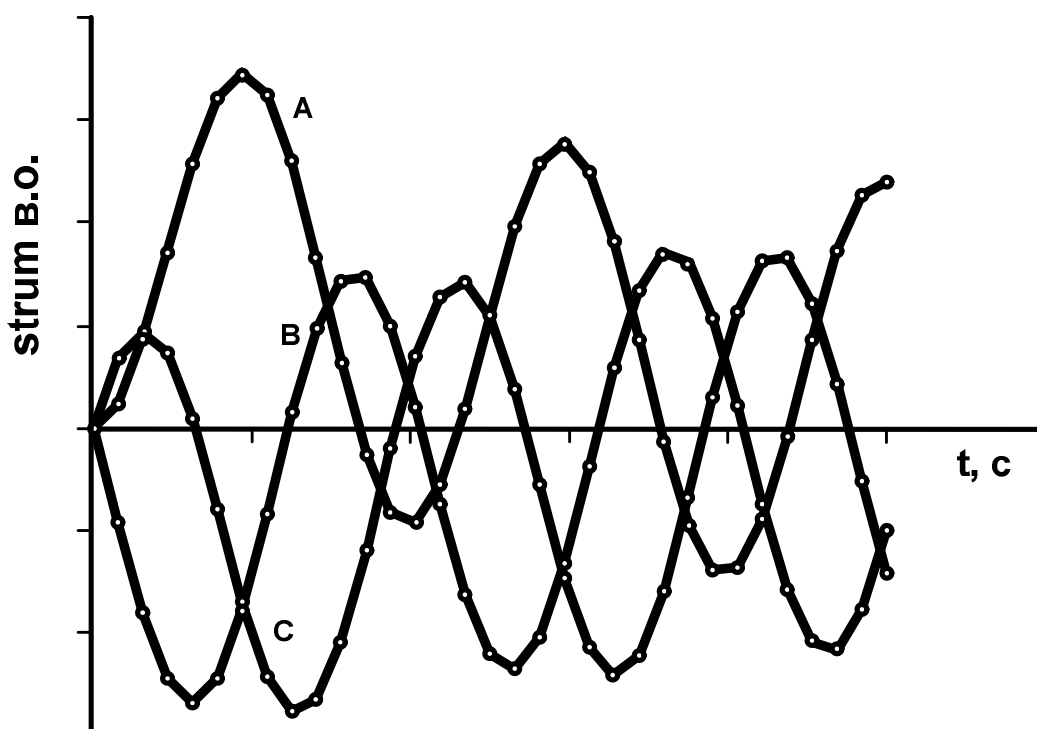


В.Г. АВВАКУМОВ
Л.Б. ТЕРЕШКЕВИЧ

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ: елементи теорії, програми, ілюстрації



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аввакумов В.Г., Терешкевич Л.Б.

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ:
ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ, ПРОГРАМИ, ІЛЮСТРАЦІЇ**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
електроенергетичних спеціальностей

Вінниця ВНТУ 2013

УДК 621.311
А18

Рецензенти:

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Аввакумов В.Г., Терешкевич Л.Б.

А18 **Перехідні процеси в системах електропостачання: елементи теорії, програми, ілюстрації.** Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2013. - 241 с.

В навчальному посібнику розглядаються роль і значення розрахунків аварійних режимів для надійного електропостачання народного господарства.

Розкриваються методологія і короткі теоретичні відомості техніки розробки математичних моделей перехідних процесів при розрахунках аварійних режимів в системах електропостачання.

Викладена технологія використання чисельних методів і програмного забезпечення при розрахунках аварійних режимів.

Ілюструються розв'язування на основі математичних моделей з використанням, переважно, оригінальних машинних програм, а також відомих пакетів прикладних програм.

В додатках приводяться методичні матеріали для самоконтролю і проведення лабораторних і практичних занять.

Навчальний посібник призначений для студентів електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів I – ІУ рівня акредитації, а також може бути корисним для інженерно-технічних працівників в системі підвищення кваліфікації.

УДК 621.311

© В.Аввакумов, Л.Терешкевич, 2013

Зміст

Вступ	8
1 КОНЦЕПЦІЯ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ НА ЕОМ	10
1.1 Цілі розрахування аварійних режимів та ідеалізація умов протікання перехідних процесів	10
1.2 Системи одиниць і координат, що використовуються в розрахуванні аварійних режимів	13
1.3 Огляд методів розрахування аварійних режимів	15
1.4 Об'єктивний характер неповноти інформації при розрахуванні аварійних режимів	18
1.5 Формулювання розрахункових умов	19
Завдання для самостійної роботи	21
2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ В УМОВАХ ЗБЕРЕЖЕННЯ СИМЕТРІЇ СИСТЕМИ	22
2.1 Математична модель перехідного процесу при короткому замиканні в простій системі	22
2.2 Визначення основних величин, що характеризують перехідний процес при короткому замиканні	25
2.3 Алгоритм розробки заступної схеми для розрахування режиму при трифазному короткому замиканні	35
2.4 Алгоритм розрахування параметрів заступної схеми	35
Завдання для самостійної роботи	38
3 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ В УМОВАХ ПОРУШЕННЯ СИМЕТРІЇ СИСТЕМИ	40
3.1 Математична суть методу симетричних складових	40
3.2 Заступні схеми для розрахування струмів короткого замикання	44
3.3 Трансформація симетричних складових струмів і напруг	46
3.4 Суть правила еквівалентності прямої послідовності	51
3.5 Комплексні заступні схеми при поперечних пошкодженнях	55
Завдання для самостійної роботи	58
4 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ З ВЕНТИЛЬНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ	59
4.1 Цілі розрахування перехідних аварійних режимів в системах з вентильними перетворювачами	59
4.2 Математична модель зовнішнього короткого замикання трифазного мостового випрямляча	60
4.3 Чисельне дослідження перехідного процесу трифазного мостового випрямляча при зовнішньому короткому замиканні	65

4.4 Вплив АРЗ генераторів на розвиток перехідного процесу при зовнішньому короткому замиканні випрямляча	70
4.5 Математичне моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового перетворювача	72
Завдання для самостійної роботи	79
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ РІВНЯНЬ ПАРКА-ГОРЕВА	80
5.1 Диференціальна форма рівнянь Парка-Горева	80
5.2 Ілюстрація принципового алгоритму дослідження перехідного процесу на основі рівнянь Парка-Горева	82
5.3 Дослідження перехідного процесу при короткому замиканні синхронного генератора	85
5.4 Дослідження впливу демпферних контурів на розвиток перехідних процесів в синхронній машині	87
Завдання для самостійної роботи	90
6 ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИННО-ОРІЄНТОВАНОГО МЕТОДУ ВУЗЛОВИХ НАПРУГ І ПРОГРАМ РОЗРАХУНКУ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ЙОГО ОСНОВІ	92
6.1 Вимоги до засобів автоматизації розрахунків аварійних режимів	92
6.2 Машинно-орієнтований метод вузлових напруг для інженерних розрахунків струмів короткого замикання	92
6.3 Технологія використання програми ТКZ для розрахування струмів короткого замикання	95
6.4 Сервісна програма SERVIS розрахування параметрів заступної схеми	100
6.5 Характеристика програми СТКZ розрахування струмів короткого замикання	104
Завдання для самостійної роботи	106
7 СУТЬ ПОНЯТТЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ І АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ СТІЙКОСТІ	108
7.1 Стійкість електричних систем, як прояв загального поняття стійкості динамічних систем	108
7.2 Короткий екскурс в розвиток науки про стійкість електричних систем	109
7.3 Терміни і визначення, що відносяться до розрахунку режимів електричних систем	111
7.4 Шляхи автоматизації розрахувань стійкості електричних систем	114
Завдання для самостійної роботи	117
8 ПРОСТІ РОЗРАХУНКИ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ	118
8.1 Розрахунки, що базуються на використанні практичних	

критеріїв	118
8.2 Розрахунки, основані на використанні математичних критеріїв	131
8.3 Характеристика програми STATIS для перевірки статичної стійкості	145
8.4 Автоматизація прямого пошуку коренів характеристичних рівнянь	146
Завдання для самостійної роботи	149
9 ПРОСТІ РОЗРАХУНКИ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ	151
9.1 Суть проблеми динамічної стійкості	151
9.2 Рівняння руху синхронної машини і різноманітні форми його запису	152
9.3 Практичні критерії оцінки динамічної стійкості, основані на методі площ	153
9.4 Ідеї методу послідовних інтервалів для інтегрування рівняння руху синхронної машини	155
9.5 Характеристика програми DYNAM для перевірки динамічної стійкості	157
9.6 Нове розв'язання рівняння руху синхронної машини при сильних збуреннях	161
Завдання для самостійної роботи	168
10 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ Simulink	170
10.1 Коротка характеристика системи	170
10.2 Синтез базової моделі системи електропостачання	178
10.3 Технологія дослідження конкретних завдань	183
10.4 Дослідження електромагнітного перехідного процесу при короткому замиканні в системі $U = \text{const}$	191
Завдання для самостійної роботи	195
ДОДАТКИ	198
Додаток А – Текст програми DIFUR.for	198
Додаток Б – Лістинг дослідження перехідного процесу при зовнішньому короткому замиканні.	202
Додаток В – Лістинг дослідження впливу АРЗ на перехідний процес	204
Додаток Г – Лістинг дослідження перехідного процесу за Парком (park1.dgo)	206
Додаток Д – Лістинг результатів дослідження перехідного процесу в координатах А, В, С	208
Додаток Е – Лістинг розв'язку при короткому замиканні на виводах генератора	209
Додаток Ж – Лістинг розв'язку при вивченні демпферного	

ефекту в синхронній машині	210
Додаток И – Витяг з ГОСТ 27514-87 “Короткие замыкания в электроустановках”	211
Додаток К – Витяг з керівних вказівок із визначення стійкості енергосистем	215
Додаток Л – Питання для самоконтролю при вивченні електромагнітних перехідних процесів при аварійних збуреннях.	219
Додаток М – Питання для самоконтролю при вивченні електромеханічних перехідних процесів	224
Додаток Н – Завдання і методичні вказівки до виконання лабораторних і практичних занять з теми “Дослідження перехідного процесу при трифазному короткому замиканні в простій системі”	226
Додаток П – Завдання та методичні вказівки до виконання лабораторних і практичних занять з теми “Дослідження перехідного процесу в трифазному мостовому перетворювачі ”	229
Додаток С – Завдання і методичні вказівки до виконання лабораторних та практичних занять з теми “Розрахунок аварійних режимів при коротких замиканнях”	232
Додатки Т, У – Завдання і методичні вказівки до виконання лабораторних та практичних занять з теми “Дослідження статичної стійкості режиму в системі електропостачання”	235

Список скорочень

АОМ	– аналогова обчислювальна машина
АПВ	– автоматичне повторне ввімкнення
АРЗ	– автоматичне регулювання збудження
АРШ	– автоматичне регулювання швидкості турбіни
ГОМ	– гібридна обчислювальна машина
ЕОМ	– електронна обчислювальна машина
ЕРС	– електрорушійна сила
ЕЦОМ	– електронна цифрова обчислювальна машина
ІЕД	– інститут електродинаміки
ЛЕП	– лінія електропередач
НР	– нормальний режим
ППП	– пакет прикладних програм
СХН	– статистична характеристика навантаження
СибНДІЕ	– Сибірський науково-дослідний інститут енергетики

Вступ

Розрахунки аварійних режимів в системах електропостачання мають важливе значення при плануванні розвитку систем, проектуванні або експлуатації систем електропостачання. Це зумовлюється тими негативними наслідками, які можуть бути при аваріях:

- порушення або обмеження електропостачання споживачів;
- порушення чи зниження запасу стійкості енергосистем;
- порушення термічної або динамічної стійкості елементів систем електропостачання;
- відмова чи помилкова робота систем релейного захисту і автоматики;
- зниження якості електроенергії біля споживачів в післяаварійних режимах і т.д.

Передбачити можливість розвитку таких негативних наслідків та завчасно вжити заходи для адаптації систем електропостачання до аварійних режимів дозволяють масові розрахунки таких режимів на стадії проектування і експлуатації систем електропостачання.

Існує безліч причин виникнення аварійних режимів, які супроводжуються складними перехідними процесами. Відзначимо деякі з них:

- безперервне, неконтрольоване зростання навантажень ліній електропередач і пов'язане з цим порушення статичної стійкості системи;
- неконтрольоване зниження напруги у вузлах навантаження, що викликає порушення їх стійкості;
- обрив однієї або двох фаз лінії електропередач;
- втрата збудження синхронних машин і пов'язаний з цим їх асинхронний хід і т.д.

Але найголовнішою причиною є різноманітні короткі замикання, під якими розуміють будь-які, не передбачені нормальними умовами роботи, замикання між фазами (полюсами), а в системах із заземленою нейтраллю також між фазами і землею.

Зазначені вище причини можуть виникати і в складних поєднаннях за місцем виникнення та часом настання, що створює картину надзвичайної складності, ще не повністю осмислену наукою. Тому в практичних розрахунках вдаються до рішучої ідеалізації зовнішніх умов протікання аварійних режимів, але такої, яка дозволяла б одержати корисну для практики інформацію.

Викладене вище дозволяє стверджувати, що складні і масові розрахунки аварійних режимів можуть бути виконані лише з використанням сучасної обчислювальної техніки, а орієнтація на ручний рахунок – безперспективна.

У зв'язку з цим пропонована увазі читачів книга орієнтована на широке використання ЕОМ в розрахунках аварійних режимів. Така орієнтація визначила і побудову книги.

В першому розділі викладені основні концептуальні міркування стосовно розрахунків аварійних режимів і їх автоматизації.

Розділ другий присвячений теоретичним передумовам розрахунків аварійних режимів при коротких замиканнях в умовах збереження симетрії системи.

Порушення симетрії системи в точці короткого замикання призводить до ряду серйозних особливостей протікання аварійних режимів порівняно з трифазними короткими замиканнями. Ці особливості стисло розглядаються у розділі третьому.

Значна частка електроенергії, що виробляється, передається і споживається на постійному струмі. Це викликає появу в системах електропостачання вентильних перетворювачів. Поява цього елемента збільшує множину причин аварійних режимів і створює серйозні відмінності в методах їх аналізу. Теоретичні передумови розрахунків для таких умов стали предметом четвертого розділу.

Глави п'ята і шоста присвячені характеристикам сучасних методів, алгоритмів і програм розрахування аварійних режимів при коротких замиканнях, зокрема, на основі рівнянь Парка-Горєва.

Аналогічний підхід до викладу стійкості режимів реалізовано в розділах 7 . . . 9. Від коротких теоретичних уявлень до методів, алгоритмів і програм дозволяє читачу практично і швидко торкнутися проблематики статичної і динамічної стійкості режимів.

Глава десята “Дослідження електричних режимів з використанням системи Simulink” присвячена проблемам, так званого, блокового моделювання систем, коли процес синтезу структури системи, яка досліджується, здійснюється у вигляді окремих блоків, що математично реалізують відповідні елементи структури. В межах блокового моделювання у розділі розглядаються завдання дослідження сталих і перехідних режимів в системах електропостачання.

Навіть широко використаний в книзі апарат додатків не може замінити вузькоспеціалізованих видань, присвячених окремим актуальним питанням аварійних режимів в електричних системах. Завдання навчального посібника полягає в переконанні студентів у тому, що розрахунки аварійних режимів інтегрують теоретичні, математичні і обчислювальні аспекти досліджень перехідних процесів.

1 КОНЦЕПЦІЯ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ НА ЕОМ

1.1 Цілі розрахування аварійних режимів та ідеалізація умов протікання перехідних процесів

Умовимося під режимом електричної системи розуміти її стан, що характеризується різноманіттям процесів, які в ній відбуваються. Режими систем електропостачання як частини електричної системи можна умовно розділити на нормальні, аварійні і післяаварійні. Для кожного з них, в свою чергу, можна здійснити глибшу класифікацію, наприклад, виділити ремонтні режими і т.д. Режими як стани системи електропостачання кількісно характеризуються параметрами режиму - струмами, напругами, потужностями, ЕРС генерувальних елементів, кутами зсуву між ЕРС, частотою і т.д.

У даній роботі основна увага приділяється аварійним режимам. Умовимося розуміти під аварійними режимами такі відносно нетривалі режими, при яких всі або деякі параметри режиму набувають значення різко відмінні від їх нормальних величин.

У контексті такого визначення до аварійних режимів систем електропостачання можна віднести:

- різноманітні короткі замикання;
- обриви однієї або двох фаз;
- втрату збудження генератора;
- гойдання синхронних генераторів при порушенні статичної стійкості;
- невдалі несинхронні ввімкнення окремих частин системи;
- порушення динамічної стійкості системи і т.д.

Більшість з аварійних режимів починається з коротких замикань. *Коротким замиканням називається будь-яке, не передбачене нормальними умовами роботи, замикання між фазами (полюсами в системах постійного струму), а в системах із заземленими нейтраллями – також замикання однієї або декількох фаз на землю. Короткі замикання є наслідком порушення ізоляції між струмопровідними частинами, що належать різним фазам (полюсам), або ізоляції між фазою (полюсом) і землею.*

При виникненні короткого замикання в системі її результуючий опір зменшується, що призводить до збільшення струму в її вітках, порівняно із струмами нормального режиму. Це, у свою чергу, викликає зниження напруги у вузлах системи, особливо в електричній близькості від місця короткого замикання. У вітках, що безпосередньо примикають до точки короткого замикання, фази струмів різко змінюються.

Збільшення струму внаслідок короткого замикання може призводити до значного підвищення температури струмопровідних частин і подальшого руйнування ізоляції. У цьому полягає проблема термічної стійкості електроустаткування.

При великій потужності короткого замикання можливе механічне руйнування струмопровідних частин внаслідок значних електродинамічних зусиль між ними. У цьому полягає проблема електродинамічної стійкості електроустаткування.

У вузлах системи, електрично наближених до точки пошкодження, має місце значне зниження напруги. Робота струмоприймачів, наприклад, асинхронних навантажень, різко погіршується, а іноді виникає ефект “перекидання” навантаження. У цьому полягає проблема статичної стійкості вузлів навантаження.

Відмічені вище негативні наслідки короткого замикання, яке виникло, мають все ж таки місцевий, локальний характер. Проте можливі і загальносистемні негативні наслідки.

Відомо, що нормальний режим системи характеризується рівновагою активних і реактивних потужностей, які генеруються в систему, і тих, які споживаються навантаженням (з врахуванням втрат). З цим пов'язані поняття балансів потужностей. Існування балансів потужності і енергії є об'єктивною властивістю системи. Завдяки цьому в нормальному режимі кути зсуву між ЕРС окремих генераторів і напругами у вузлах системи змінюються несуттєво.

При короткому замиканні міняється розподіл потужностей між станціями. Відбувається порушення балансу потужностей. Одні генератори виявляються перевантаженими, інші недовантаженими в порівнянні з потужністю, яка розвивається первинними двигунами. Рівновага не може бути швидко встановленою, оскільки регулятори первинних двигунів мають значну інерцію. Тому перевантажені генератори починають гальмуватися, недовантажені прискорюватися, що призводить до гойдань роторів і до зміни взаємних кутів ЕРС генераторів. При досягненні цими кутами деяких критичних величин, генератори випадають з синхронізму, система переходить в асинхронний режим, при якому споживачі працювати не можуть. Так відбувається порушення динамічної стійкості системи.

Приблизно до таких же негативних наслідків призводить не тільки коротке замикання, але і неконтрольоване зростання навантаження будь-якого елемента електропередачі, наприклад, при вимкненні одного кола двокової лінії на ремонт. Такий хід подій пов'язаний з поняттям статичної стійкості системи.

Очевидно, що при такій різноманітності подій, пов'язаних з аварійними режимами, людина не може бути простим свідком або навіть їх фіксувальником. Вона повинна керувати розвитком подій при аварійних

режимах. А це досягається завчасним програванням їх в розрахунках і подальшим аналізом результатів.

Цілями розрахування аварійних режимів при коротких замиканнях можуть бути:

- вибір і перевірка електрообладнання на термічну і динамічну стійкість;
- вибір уставок релейного захисту і перевірка їх чутливості;
- оцінка впливу струмів нульової послідовності ліній електропередач на лінії зв'язку;
- вибір заземлювальних пристроїв;
- дослідження впливу деяких чинників на характер перехідного процесу та ін.

Цілком обґрунтованим є і формулювання цілого ряду підцілей для специфічних умов окремих систем електропостачання. Для прикладу приведемо задачу виявлення вимикачів на всіх підстанціях системи електропостачання, розривна потужність яких стала меншою від очікуваної потужності короткого замикання. Важливість цієї підцілі не вимагає аргументування.

Цілями розрахування стійкості систем можуть бути:

- виявлення обмежень при перспективному плануванні системи для електропостачання деякого регіону;
- виявлення запасів стійкості нормальних і післяаварійних режимів при проектуванні системи електропостачання;
- уточнення вимог до релейного захисту, системної автоматики та регуляторів збудження синхронних машин і швидкості первинних двигунів;
- перевірка запасів стійкості при експлуатації, наприклад, в ремонтних режимах;
- наукові дослідження, пов'язані з виявленням чинників, що сприяють стійкості, наприклад, джерел реактивної потужності з тиристорним керуванням і т.д.

Різноманітність цілей розрахування аварійних режимів, вимагає різних припущень, неоднакових вимог до точності розрахунків, і, отже, різних методів та алгоритмів розрахунку. Все це об'єднується поняттям розрахункових умов і повинно бути сформульовано та обґрунтовано ще до початку обчислювального процесу.

Попередній досвід розрахунків зафіксований у керівних документах [1, 2, 3, 4] і ними необхідно користуватися. Ці документи рекомендують ідеалізувати реальну картину аварійних режимів, тобто вводити ряд допущень для спрощення.

Так, розрахування струмів короткого замикання виконуються, виходячи із:

- симетрії параметрів по фазах елементів електроенергетичної системи;
- симетрії і синусоїдальності ЕРС та напруг;
- лінійності опорів елементів системи;
- відсутності струмів намагнічення трансформаторів і автотрансформаторів;
- відсутності насичення магнітних систем електричних машин;
- відсутності зсувів по фазі ЕРС, діючих в системі, і зміни частоти обертання роторів синхронних машин в початковий період перехідного процесу;
- відсутності поперечної ємності повітряних ліній електропередач для деяких класів напруг і довжин ліній та ін.

При розрахуванні струмів короткого замикання в колах постійного струму до цих допущень зазвичай додається ряд інших, наприклад, передбачається, що вентилі напівпровідникових перетворювачів є ідеальними елементами, тобто їх опір в провідному напрямі відсутній, а в непровідному напрямі - нескінченно великий.

Зрозуміло, що при розрахуванні струмів короткого замикання для спеціальних цілей деякі з цих допущень або послабляються, або знімаються зовсім. Це підвищує точність розрахунків. Наприклад, при дослідженні аварійного режиму при короткому замиканні за межами часу 0,5с рекомендується враховувати електромеханічні перехідні процеси, тобто зміну величин ЕРС і взаємних кутів між ними.

При розрахуванні стійкості більша частина з приведених вище допущень зберігається. Але залежно від цілей розрахунків стійкості з'являється ряд специфічних допущень. Наприклад, перевірка стійкості існуючого режиму часто проводиться за умови незмінності перехідних ЕРС синхронних машин, тобто ЕРС за їх перехідними опорами.

Розрахування стійкості для уточнення та налагодження, як правило, проводять відповідно до повних заступних схем елементів, з урахуванням статичних і динамічних характеристик регуляторів збудження та первинних двигунів.

Отже, різноманітність цілей розрахування аварійних режимів породжує різну ідеалізацію перехідних процесів і тому обґрунтованому вибору допущень слід приділяти найпильнішу увагу.

1.2 Системи одиниць і координат, що використовуються в розрахунках аварійних режимів

В розрахунках аварійних режимів у принципі можуть використовуватися будь-які системи одиниць, але традиції і особисті переваги дослідників зазвичай звужують межі можливих варіантів.

При розрахуванні струмів короткого замикання, як правило, використовуються:

- система відносних одиниць з приведенням параметрів заступних схем до вибраного основного ступеня напруги системи, що досліджується, з врахуванням фактичних коефіцієнтів трансформації трансформаторів і автотрансформаторів;
- система іменованих одиниць з приведенням параметрів заступних схем до вибраного основного ступеня напруги з врахуванням фактичних коефіцієнтів трансформації трансформаторів і автотрансформаторів;
- система іменованих одиниць з приведенням параметрів заступних схем до одного ступеня напруги без врахування фактичних коефіцієнтів трансформації трансформаторів і автотрансформаторів;
- система одиниць, “приведених” до 1 кВ параметрів заступних схем та ін.

В умовах недостатньої інформації про фактичні коефіцієнти трансформації трансформаторів і автотрансформаторів допускається наближений спосіб їх врахування. Він зводиться до заміни їх середніми значеннями, які визначаються відношеннями середніх лінійних напруг відповідних ступенів трансформації. Рекомендується використовувати такий ряд середніх напруг: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18,0; 20,0; 24,0; 27,5; 37,0; 115,0; 154,0; 230,0; 340,0; 515,0 кВ.

В розрахунках струмів короткого замикання в електроустановках до 1 кВ ряд середніх напруг доповнюється такими величинами: 0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ. При цьому розрахунки рекомендується виконувати в системі іменованих одиниць, а опори елементів заступних схем виражати в міліомах.

При розрахуванні стійкості систем використовується система відносних одиниць, яка доповнюється деякими іменованими параметрами, наприклад, градусами для абсолютних, взаємних або критичних кутів роторів синхронних машин. Ряд середніх напруг при розрахуванні стійкості прийнято використовувати такий: 1150; 750; 500; 330; 230; 154; 115; 37; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,525 кВ.

Що стосується систем координат, то залежно від мети розрахунків і виду аварійного режиму використовуються наступні системи координат:

- фазні (А, В, С);
- симетричні координати, які витікають з методу симетричних складових;
- прямокутна d-q-0 (нерухома);
- що обертається d-q-0;
- прямокутна з координатами виділених параметрів (у методі D-розбиття) і т.д.

Обґрунтування систем координат виконується при формуванні розрахункових умов.

1.3 Огляд методів розрахування аварійних режимів

Принципово будь-які перехідні процеси при аварійних режимах можуть бути розглянуті як розв'язок відповідної системи диференціальних рівнянь. Найбільшою трудністю тут є не техніка розв'язування, а синтез математичної моделі, яка з потрібною повнотою враховує найбільш суттєві зв'язки. Проте у багатьох випадках цілі розрахування аварійних режимів виправдовують спрощені підходи до їх дослідження. Вони класифікуються як інженерні методи розрахунку.

При розрахуванні струмів короткого замикання використовуються такі методи.

1. Аналітичний метод, оснований на перетвореннях заступної схеми. Результатом такого перетворення є еквівалентна (результуюча) ЕРС заступної схеми і еквівалентний (результуючий) її опір, які і визначають струм та потужність. Цей метод рекомендується використовувати в малоконтурних розрахункових схемах.

2. Метод вузлових напруг, заснований на розв'язуванні такого векторно-матричного рівняння:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} \mathbf{U}, \quad (1.1)$$

де \mathbf{I} – вектор-стовпець вузлових струмів;

\mathbf{Y} – квадратна матриця власної і взаємної вузлової провідності;

\mathbf{U} – вектор-стовпець вузлових напруг.

Цей метод рекомендується для багатоконтурних розрахункових схем.

3. Метод контурних струмів, оснований на розв'язуванні такого векторно-матричного рівняння:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} \mathbf{I}, \quad (1.2)$$

де \mathbf{E} – вектор-стовпець контурних ЕРС;

\mathbf{Z} – квадратна матриця власних і взаємних опорів незалежних контурів;

\mathbf{I} – вектор-стовпець контурних струмів.

Цей метод також рекомендується для багатоконтурних розрахункових схем.

4. Різноманітні версії методів розрахункових кривих, в яких аварійні струми визначаються на основі спеціальних кривих, що враховують конструктивні особливості генерувальних елементів даної схеми, їх системи збудження, поточний час і ряд інших координат [5, 6].

5. Метод випрямлених характеристик (метод Баскакова-Ульянова), основу якого складають розрахункові (фіктивні) ЕРС і опір генератора, що задається спеціальними кривими у функції часу.

6. Метод “потужностей”, основу якого складають розрахункові формули, що визначають потужність короткого замикання кожного елемента розрахункової схеми. До таких параметрів кожного елемента заступної схеми можна створити власну алгебру “потужностей” і розрахувати параметри аварійного режиму.

7. Метод, заснований на використанні статичних або динамічних моделей (столів постійного або змінного струму). При цьому в певному масштабі на мнемосхемі столу подається розрахункова схема і на моделях вимірюються (у певному масштабі) параметри аварійного режиму.

З наведеного вище короткого огляду методів розрахунку струмів короткого замикання видно, що більшість з них орієнтована на ручний рахунок і швидше є ілюстрацією розвитку науки про перехідні процеси. Деякі з них в даний час можуть розглядатися як архаїзми.

Сучасні методи розрахування струмів короткого замикання – це методи, орієнтовані на застосування ЕОМ. Це, перш за все, методи, основані на інтегруванні систем звичайних диференціальних рівнянь, диференціальних рівнянь Парка-Горєва і машинно-орієнтованому методі вузлових напруг.

При розрахуванні аварійних режимів, пов'язаних з порушенням стійкості електричних систем, використовують спеціальні методи розрахунків статичної стійкості і методи розрахунку динамічної стійкості [8, 9, 10].

Відзначимо такі методи розрахування статичної стійкості режиму.

1. Метод малих коливань, заснований на розв'язуванні системи рівнянь (у диференціальній або операторній формі) руху роторів синхронних машин. Результатом прямого розв'язування такої системи може бути зміна взаємних кутів від часу і висновок на цій основі про можливість виникнення монотонно або коливально наростаючого перехідного процесу.

2. Метод, що використовує математичні критерії, які витікають з методу малих коливань. При цьому замість прямого розв'язування системи диференціальних або операторних рівнянь, синтезується лінеаризована система рівнянь та її головний визначник, а потім характеристичне рівняння.

До одержаного характеристичного рівняння застосовуються математичні критерії Гурвиця, Рауса, Лъєнара-Шипара, Михайлова або метод D-розбиття. При деяких допущеннях на основі цих критеріїв робиться висновок про можливість порушення статичної стійкості режиму.

Метод, що використовує практичні критерії статичної стійкості. Вони є нерівностями вигляду:

$$\frac{dA}{dB} [\langle \rangle]_C, \quad (1.3)$$

у лівій частині яких знаходяться похідні від деяких режимних параметрів А по “сумнівних” координатах В. Граничні співвідношення (на межі стійкості) набувають вигляду рівності, причому $C \notin (0; \pm\infty)$.

Практичні критерії мають взаємозв'язок із строгими умовами статичної стійкості і за відсутності саморозгойдування в системі відповідають позитивності вільного члена характеристичного рівняння.

4. Метод, заснований на використанні розрахункових столів змінного струму. Розрахунки статичної стійкості тут зводяться до послідовного встановлення ряду режимів, що відрізняються один від одного зміною одного або декількох параметрів, наприклад, фази ЕРС передавальної станції чи напруги в приймальній системі, тобто все більш і більш ускладнених режимів. Оцінювання стійкості зазвичай проводиться на основі практичних критеріїв:

$$\frac{dP}{d\delta} = 0 \quad (1.4)$$

(тобто за межею потужності), або

$$\frac{d\Delta Q}{dU} = 0 \quad (1.5)$$

(тобто за граничним зниженням напруги).

В (1.4 і 1.5):

Р – активна потужність, яка передається по “сумнівній” лінії;

δ – кут передавальної станції;

ΔQ – приріст реактивної потужності;

U – напруга.

Динамічна стійкість систем пов'язана з сильними збуреннями режиму і вимагає для розрахунку спеціальних методів. Кінцевою метою дослідження динамічної стійкості режиму є виявлення відносного руху роторів синхронних генераторів і на цій основі висновок про їх здатність зберігати синхронну роботу.

1. Найбільш довершеним методом аналізу динамічної стійкості є метод, заснований на повних рівняннях Парка-Горєва в диференціальній або операторній формі для синхронних машин, що входять в систему. Моделі синхронних машин зазвичай доповнюються рівняннями динаміки автоматичних регуляторів збудження (АРЗ) генераторів, автоматичних регуляторів швидкості первинних двигунів (АРШ) і рівняннями динамічних характеристик вузлів навантаження.

2. Дещо спрощеним, порівняно з відміченим вище, є метод, заснований на рівняннях Лебедєва-Жданова (рівняннях Лонглея). Ця модель також іноді уточнюється рівняннями АРЗ, АРШ і вузлів навантаження.

3. Для простої системи (еквівалентний генератор – шини незмінної напруги) математична модель спрощується до одного диференціального

рівняння другого порядку і воно інтегрується методом послідовних інтервалів.

Відмічені вище три методи аналізу динамічної стійкості по-суті вичерпують весь апарат дослідження, якщо не брати до уваги натурні експерименти, фізичні моделі змінного струму і ручний розрахунок. Маючи на увазі складність перехідного процесу при великих збуреннях, всі відмічені вище методи реалізуються в даний час тільки на ЕОМ.

Ще складніших розрахунків вимагає аналіз результуючої стійкості, мається на увазі здатність енергосистеми відновлювати синхронну роботу після виникнення асинхронного ходу. Сам асинхронний режим в системі виникає після порушення її статичної або динамічної стійкості.

Зазвичай розрізняють тривалий асинхронний режим, для ліквідації якого потрібне ділення системи на несинхронні частини, і короткочасний асинхронний режим, що завершується ресинхронізацією. Предметом розрахунків в цьому випадку є встановлення самого факту можливості самовільної ресинхронізації. Одночасно вирішуються питання поведінки споживачів під час асинхронного ходу системи, проведення заходів, що сприяють ресинхронізації і т.д. Сам перелік завдань, пов'язаних із забезпеченням результуючої стійкості, говорить про їх складність і необхідність автоматизації розрахунків.

1.4 Об'єктивний характер неповноти інформації при розрахунках аварійних режимів

На практиці часто доводиться оцінювати параметри аварійних режимів у вузлах при недостатньо повній інформації про живильну систему в частині її топології і параметрів. Яскравим прикладом цього є перспективні розрахунки аварійних режимів, коли остаточної і повної ясності про майбутнє живильної системи немає. Як інший приклад, вкажемо випадок, коли людина, що проводить розрахунки, просто не володіє повною інформацією, яка в принципі є, але знаходиться на іншому рівні керування.

Таким чином, природа недостатньої інформації в тому, що електрична система – об'єкт з ієрархічною структурою, планування розвитку якого ведеться на достатньо великому часовому горизонті при деякій невизначеності потреби в її потужності і електроенергії. Крім того, для експлуатаційних розрахунків струмів короткого замикання часто відсутня надійна інформація про поточний стан системи, зважаючи на її ієрархічний характер.

Узагальнюючи викладене, можна стверджувати, що інформаційне забезпечення для розрахування аварійних режимів має таку природу:

- певна інформація (про топологію і параметри) про систему живлення;
- частково невизначена, коли деяка інформація про живильну систему знаходиться в параметрах аварійних режимів ($S_{кз}$, $I_{кз}$) в будь-яких заданих вузлах;
- значно невизначена, коли недостатність інформації в якійсь мірі долається шляхом використання непрямих відомостей, наприклад, про параметри встановленого комутаційного обладнання або результати подібних розрахунків в аналогічних системах.

Зрозуміло, що точність розрахунків аварійних режимів істотно визначаються інформаційним забезпеченням і це необхідно брати до уваги при формулюванні розрахункових умов.

1.5 Формулювання розрахункових умов

Розрахункові умови – це сукупність заданих ззовні і принципових положень, які приймаються самою людиною, що проводить розрахунки, на основі яких базуватиметься аналіз аварійних режимів. По-суті, розрахункові умови є концепцією майбутньої розрахункової роботи.

До принципових положень, що задаються ззовні, відносяться:

- мета розрахування аварійних режимів, що проводяться (для вибору і перевірки струмопровідних частин та комутаційної апаратури, для розрахування уставок і чутливості релейного захисту, для дослідження поведінки системної автоматики під час аварій, для розрахування динамічної стійкості і т. д.);
- розрахунковий вузол (вузли) на заданій схемі енергосистеми;
- розрахунковий вид короткого замикання (трифазне або будь-яке із несиметричних);
- розрахунковий час перехідного процесу і ін.

Існує ряд принципових положень, що приймаються самою людиною, яка виконує розрахунки. До них можна віднести такі.

1. Вибір розрахункової схеми. У розрахункову схему в загальному випадку повинні включатися всі генератори, що беруть участь, і всі елементи, через які зв'язуються генератори між собою та точкою пошкодження. Навантаження, залежно від мети розрахунків, або взагалі не вводяться, або вводяться узагальненою схемою, шунтом реактивного опору чи статичними (динамічними) характеристиками.

В деяких випадках виявляється доцільним еквівалентувати окремі частини електричної системи або значно спрощувати схему електропостачання.

2. Вибір розрахункового режиму, підхід до якого істотно відмінний при розрахуванні струмів короткого замикання і стійкості системи.

При розрахуванні струмів короткого замикання зазвичай береться до розгляду максимальний або мінімальний режими. У термін “максимальний режим” вкладається такий зміст:

а) увімкнені всі джерела живлення, іноді навіть ті, що з’являються в перспективі;

б) увімкнені всі трансформатори і автотрансформатори, які нормально працюють із заземленою нейтраллю;

в) підсхема, яка безпосередньо примикає до точки пошкодження така, що по елементу, який вибирається, проходить найбільший струм.

Мінімальний режим системи характеризується умовами протилежними максимальному. Цей режим дає найменший струм і він необхідний, наприклад, для оцінення чутливості релейного захисту.

При розрахуванні динамічної стійкості, як правило, береться до уваги відмічений вище максимальний режим, оскільки короткі замикання є найбільш сильними збуреннями.

Розрахування статичної стійкості виконуються для таких режимів:

- режиму нормальної роботи за найбільш напружених тривалих умов функціонування енергосистеми;
- післяаварійного режиму;
- ремонтних режимів;
- короточасних особливо важких режимів, тих, що відрізняються від нормальних меншою надійністю і тому реалізуються в крайніх випадках.

3. Метод розрахунку, адекватний заданій меті. Тут з існуючих альтернативних методів потрібно виділити один і мотивувати свій вибір (метод на основі рівнянь Парка-Горєва, метод розрахункових кривих, метод випрямлених характеристик, метод “потужностей”, ручний аналітичний метод, машиноорієнтований метод вузлових напруг і ін.)

4. Врахування або відмова від врахування активних опорів елементів енергосистеми, причому слід привести хоча б коротке аргументування свого рішення з цього питання.

5. Міркування щодо точності, де важливе місце займає обґрунтування врахування дійсних коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів, якими зв’язуються різні ступені напруг в заданій енергосистемі.

6. Системи одиниць, в яких здійснюватиметься розрахунок (відносні, іменовані, “приведені”). На це необхідно вказати відразу, щоб не виникало різночитань.

7. Система координат, в якій будуть проводитись розрахунки (фазні А, В, С - координати, координати симетричних складових, d-q-0-координати).

Людиною, яка проводить розрахунки, усувається або згладжується об’єктивно існуюча неповнота зовнішньої інформації для розрахування

аварійних режимів. Це найчастіше стосується такого елемента, як система умов передаварійного режиму роботи, конструктивного виконання ліній електропередач, що має значення для визначення їх реактансів і т.д.

Таким чином, формулювання розрахункових умов повинно бути виконано за наступним алгоритмом.

1. Відзначити найважливіші компоненти зовнішньої інформації, виходячи із завдання і вимоги керівних документів.

2. Позначити додаткові міркування, основані на суб'єктивних уявленнях людини, яка виконує розрахунки.

3. Прийняти допущення, які виходять з неповноти зовнішньої інформації.

Завдання для самостійної роботи

1. Назвати причини виникнення аварійних режимів, що супроводжуються перехідними процесами, та яка ймовірність появи кожного з них?

2. Які явища відбуваються при коротких замиканнях в електричній мережі (характер зміни параметрів режиму; термічні та динамічні впливи на електромережі та електрообладнання; робота електроприймачів; загальносистемні негативні явища)?

3. Для чого здійснюється розрахування коротких замикань?

4. Розрахункові умови та допущення, в межах яких виконується розрахування короткого замикання, і основні етапи його виконання. Сформулюйте розрахункові умови для випадків, коли:

а) за результатами буде вибрано комутаційне обладнання;

б) те ж, вибір уставок релейного захисту та перевірка їх чутливості.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ В УМОВАХ ЗБЕРЕЖЕННЯ СИМЕТРІЇ СИСТЕМИ

2.1 Математична модель перехідного процесу при короткому замиканні в простій системі

Під простою системою при дослідженні перехідного процесу прийнято вважати систему з одним еквівалентним генератором нескінченної потужності, що працював в передаварійному режимі на активно-індуктивне навантаження через електропередачу з активним і реактивним опором.

З врахуванням допущень, зазначених у розділі 1, перехідний процес для фаз А, В, С описується такими диференціальними рівняннями, які є математичною моделлю процесу, що досліджується:

$$\begin{cases} i_A R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_A}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \\ i_B R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_B}{dt} = U_m \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2}{3}\pi\right) \\ i_C R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_C}{dt} = U_m \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{2}{3}\pi\right), \end{cases} \quad (2.1)$$

де i_A, i_B, i_C – перехідні струми фаз А, В, С, що розраховуються;

R_k – результуючий активний опір заступної схеми на фазу;

X_k – результуючий реактивний опір заступної схеми на фазу;

U_m – амплітуда напруг фаз А, В, С;

ω – кутова частота;

α – фаза увімкнення на коротке замикання.

Коротке замикання може відбуватися за різних початкових умов щодо струмів, які визначаються розрахунком:

- передаварійний режим – холостий хід;
- передаварійний режим – навантаження.

У самій заступній схемі можуть бути різні співвідношення між R_k і X_k . До моменту початку аварії ($t = 0$) положення \dot{U}_A на комплексній площині може бути різним – $\alpha = 0$ або $\alpha \neq 0$. Все це створює безліч варіантів умов протікання аварійного режиму.

У табл. 2.1 приведений розв'язок системи рівнянь (1.1) на основі програми DIFUR (див. додаток А), в якій проводиться інтегрування за методом Кутта-Мерсона. Розв'язок наведено для перехідних струмів фаз А, В, С у відносних одиницях для таких умов:

$$\begin{aligned}
t = 0, i_A = i_B = i_C = 0; \\
U_m = 1; \\
\alpha = 0; \\
f = 50 \text{ Гц}; \\
R_k = 0,2; \\
X_k = 1.
\end{aligned}$$

Таблиця 2.1 – Лістинг розв’язку системи диференціальних рівнянь перехідного процесу

Файл даних до програми DIFUR
.000 .050 .001 3
.000 .000 .000

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

Аргумент t, сек	i_A	i_B	i_C
1	2	3	4
.00000	.00000	.00000	.00000
.00156	.11427	-.44560	.33132
.00313	.41581	-.85598	.44017
.00469	.81338	-1.12769	.31432
.00625	1.19491	-1.19063	-.00428
.00781	1.45386	-1.02455	-.42931
.00938	1.51413	-.66379	-.85034
.01094	1.34798	-.18913	-1.15884
.01250	.98237	.29134	-1.27370
.01406	.49253	.66779	-1.16032
.01563	-.01593	.85461	-.83868
.01719	-.43209	.81067	-.37859
.01875	-.66593	.54905	.11687
.02031	-.66974	.13399	.53574
.02188	-.44942	-.33427	.78369
.02344	-.06318	-.74313	.80631
.02500	.39218	-.99421	.60203
.02656	.80406	-1.02656	.22250
.02813	1.07060	-.83103	-.23956
.02969	1.12468	-.45245	-.67223
.03125	.94976	.02103	-.97078
.03281	.58372	.47869	-1.06241

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
.03438	.10991	.81348	-.92339
.03594	-.36260	.94726	-.58466
.03750	-.72476	.84925	-.12449
.03906	-.89337	.54337	.34999
.04062	-.83069	.10253	.72816
.04219	-.55343	-.36854	.92197
.04375	-.12879	-.75803	.88682
.04531	.34139	-.97345	.63206
.04687	.74466	-.96346	.21880
.04844	.98451	-.73001	-.25450
.05000	1.00312	-.32784	-.67527

Осцилограма перехідних фазних струмів, отримана з табл. 2.1, приведена на рис. 2.1.

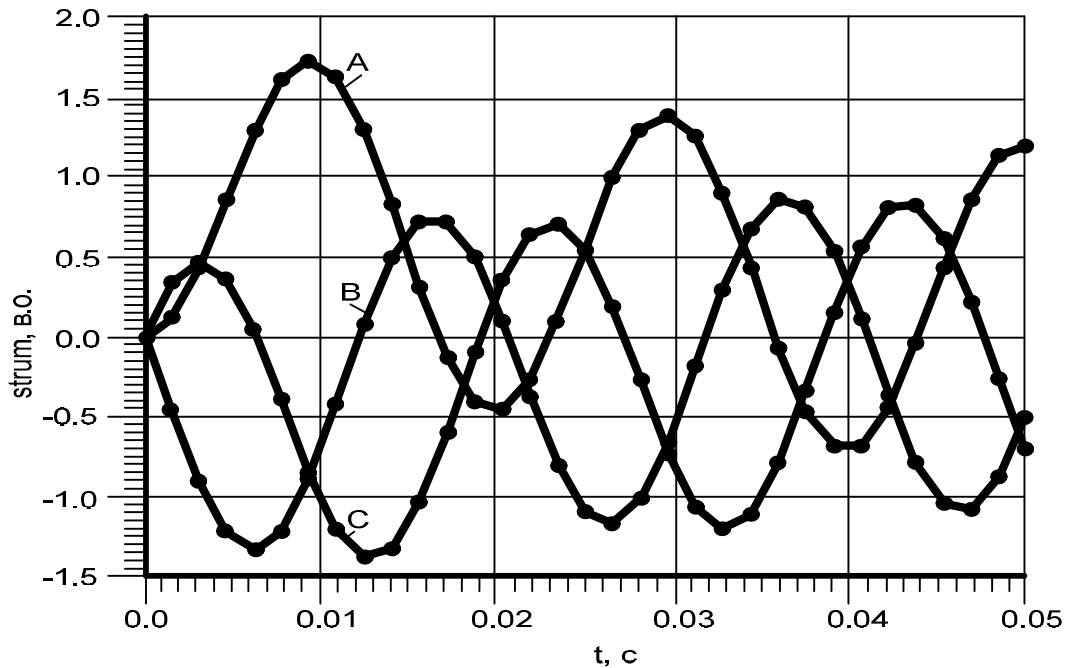


Рисунок 2.1 – Фазні струми в умовах перехідного процесу

Аналітичний вид функції перехідного струму i_A для довільних початкових умов буде:

$$i_A = I_{m \Pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + \left[I_{m H} \sin(\alpha - \varphi_H) - I_{m \Pi} \sin(\alpha - \varphi_K) \right] e^{-\frac{R_K \omega}{X_K} t}, \quad (2.2)$$

де $I_{мп}$ – амплітуда періодичного струму;
 $I_{мн}$ – амплітуда попереднього (передаварійного) струму;
 φ_n ; φ_k – кут зсуву між струмом і напругою в передаварійному та сталому аварійному режимах,

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k}. \quad (2.3)$$

В рівнянні (2.2) перший доданок є періодичною складовою повного перехідного струму. Важливо, що ця складова – синусоїдальна, незмінна за амплітудою функція часу. Це відповідає сформульованій умові: еквівалентний генератор нескінченної потужності, тобто $U = \text{const}$.

Другий доданок (2.2) є експоненціально спадаючою функцією часу і називається аперіодичним струмом.

Видно, що в (2.2) міститься тільки одна періодична складова і одна аперіодична. В перехідному струмі короткого замикання в реальній системі з генераторами кінцевої потужності ця умова не виконується.

Не дивлячись на це, подібне спрощене представлення перехідного процесу вельми корисне в пізнавальному відношенні. Наприклад, на його основі можна виділити багато величин, що характеризують перехідний процес при сильному збуренні режиму, а також встановити деякі закономірності щодо цих величин.

2.2 Визначення основних величин, що характеризують перехідний процес при короткому замиканні

До визначеного вище поняття аперіодичного струму додамо поняття, що відображає швидкість його згасання.

Постійна часу T – це такий час, після закінчення якого змінна величина повністю зникла б, якщо швидкість її згасання була б постійною і рівною тій, яка була в початковій точці експоненти, тобто при $t = 0$. Стосовно аперіодичного струму (i_a) це поняття можна сформулювати інакше. З'ясуємо величину аперіодичного струму через час, який дорівнює T . Виділимо другий доданок (2.2) і запишемо його так:

$$i_a = [I_{мн} \sin(\alpha - \varphi_n) - I_{мп} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-t/T_a}. \quad (2.4)$$

Частина (2.4), яка знаходиться в квадратних дужках, є початковим значенням аперіодичного струму – i_{a0} :

$$i_{a0} = [I_{мн} \sin(\alpha - \varphi_n) - I_{мп} \sin(\alpha - \varphi_k)]. \quad (2.5)$$

Із врахуванням (2.5) вираз (2.4) буде:

$$i_a = i_{a0} e^{-t/T_a}. \quad (2.6)$$

Припустимо $t = T_a$ для того, щоб встановити значення i_a для часу рівного постійній часу:

$$i_a = i_{a0} e^{-T_a/T_a} = i_{a0} e^{-1} = \frac{i_{a0}}{e}. \quad (2.7)$$

Якщо пригадати, що неперове число
 $e \approx 2,7182$,

то

$$i_a \approx 0,368 i_{a0}. \quad (2.8)$$

Отже, постійна часу згасання аперіодичного струму – це час, після закінчення якого аперіодичний струм стане рівним приблизно 36,8 % від своєї початкової величини. Це визначення може виявитися корисним при експериментальному визначенні T_a , наприклад, з осцилограм.

Корисно з'ясувати умови, при яких виникає максимальне значення аперіодичного струму. Ці умови розкриває наступне твердження.

ТЕОРЕМА 2.1

Якщо має місце коротке замикання в активно індуктивному колі, то найбільше значення аперіодичного струму виникає при

$$\begin{cases} I_{mH} = 0 \text{ (х.х.)} \\ \alpha = 0. \end{cases} \quad (2.9)$$

ДОВЕДЕННЯ

Представимо (2.4) так:

$$i_{a0} = I_{mH} \sin(\alpha - \varphi_H) e^{-t/T_a} - I_{mH} \sin(\alpha - \varphi_K) e^{-t/T_a}.$$

Виділимо:

$$\begin{cases} \frac{\partial i_a}{\partial I_{mH}} = \sin(\alpha - \varphi_H) e^{-t/T_a} = 0 \\ \frac{\partial i_a}{\partial \varphi_H} = I_{mH} \cos(\alpha - \varphi_H) (-1) e^{-t/T_a} = 0. \end{cases}$$

Інакше:

$$\begin{cases} \sin(\alpha - \varphi_H) e^{-t/T_a} = 0 \\ -I_{mH} \cos(\alpha - \varphi_H) e^{-t/T_a} = 0. \end{cases}$$

В активно-індуктивному колі коефіцієнт згасання $e^{-t/T_a} \neq 0$ (доведіть самостійно!) і тому

$$\begin{cases} \sin(\alpha - \varphi_H) = 0 & \text{а)} \\ -I_{mH} \cos(\alpha - \varphi_H) = 0. & \text{б)} \end{cases} \quad (2.10)$$

Якщо має місце (2.10, а), то

$$\cos(\alpha - \varphi_H) = 1 \quad \text{та}$$

з (2.10, б) виходить:

$$I_{mH} = 0, \quad (2.11)$$

що інтерпретується як холостий хід.

Якщо справедливо (2.11), то в (2.10, а) зникає φ_H (немає навантаження, немає і його фази!) і тоді

$$\sin \alpha = 0, \quad (2.12)$$

а це може бути коли $\alpha = 0$. Неважко було б показати, що знайдені умови (2.11, 2.12) відповідають максимуму аперіодичного струму (за зміною знака першої похідної при малій зміні аргументів вліво і вправо від точки оптимуму). Отже, теорема доведена.

НАСЛІДОК

В умовах виникнення максимального значення аперіодичного струму, його початкове значення i_{a0} (при $t = 0$) дорівнює амплітуді періодичного струму.

ДОВЕДЕННЯ

Введемо в (2.4) вираз (2.9):

$$i_a = -I_{mH} \sin(-\varphi_k) e^{-t/T_a}.$$

Інакше:

$$i_a = -I_{mH} \sin \varphi_k e^{-t/T_a}.$$

При $\varphi_k \approx \pi/2$ $\sin \varphi_k \approx 1$ і

$$i_a \approx I_{m\pi} e^{-t/T_a}.$$

При $t = 0$ $i \approx I_{m\pi}$, це і потрібно було довести.

Інтуїтивно можна припустити, що найбільше миттєве значення повного перехідного струму короткого замикання тісно пов'язане з умовами, що забезпечують максимум аперіодичного струму в короткозамкнутому колі (теорема 2.1).

Введемо в (2.2) умову попереднього холостого ходу короткозамкнутого кола ($I_H = 0$, $\varphi_H = 0$):

$$i = I_{m\pi} [\sin (\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin (\alpha - \varphi_k) e^{-t/T_a}]. \quad (2.13)$$

З останнього виразу видно, що серед аргументів перехідного струму при короткому замиканні присутні час t і кут α :

$$i = f(t, \alpha).$$

Для дослідження на максимум функції перехідного струму, розглянемо умову:

$$\begin{cases} \frac{\partial i}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial i}{\partial \alpha} = 0. \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial i}{\partial t} = I_{m\pi} \left[\cos (\omega t + \alpha - \varphi_k) \omega - \sin (\alpha - \varphi_k) e^{-t/T_a} \left(-\frac{1}{T_a} \right) \right] = 0 \\ \frac{\partial i}{\partial \alpha} = I_{m\pi} \left[\cos (\omega t + \alpha - \varphi_k) - \cos (\alpha - \varphi_k) e^{-t/T_a} \right] = 0 \end{cases}.$$

Оскільки $I_{m\pi} \neq 0$, маємо:

$$\begin{cases} \cos (\omega t + \alpha - \varphi_k) \omega = -\frac{1}{T_a} \sin (\alpha - \varphi_k) e^{-t/T_a} \\ \cos (\omega t + \alpha - \varphi_k) = \cos (\alpha - \varphi_k) e^{-t/T_a}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Від ділення першого рівняння на друге отримаємо:

$$\omega = -\frac{1}{T_a} \operatorname{tg} (\alpha - \varphi_k). \quad (2.16)$$

Пригадаємо, що

$$T_a = \frac{X_k}{\omega R_k},$$

і тоді (2.16) перепишемо так:

$$\begin{aligned} -\frac{X_k}{R_k} &= \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_k); \\ -\operatorname{tg}(\varphi_k) &= \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_k); \\ \operatorname{tg}(-\varphi_k) &= \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_k), \end{aligned}$$

а це може бути лише при $\alpha = 0$.

Таким чином, зазначене вище інтуїтивне міркування одержало доказову силу:

найбільше миттєве значення перехідного струму при короткому замиканні має місце при попередньому холостому ході і фазі ввімкнення на коротке замикання $\alpha = 0$.

Для встановлення часу, коли миттєве значення перехідного струму набуває найбільшого значення, бажано спочатку звернутися до табл. 2.1 і до осцилограми струму короткого замикання для фази А (рис. 2.1). При розгляді можна встановити, що час, який цікавить нас, становить приблизно 0,01 с, що відповідає половині періоду при частоті 50 Гц. Відповідне миттєве значення струму, зважаючи на його особливу важливість, одержало назву ударного струму.

Отже, *ударним струмом називається максимальне миттєве значення повного перехідного струму при короткому замиканні і визначається він для умов холостого ходу короткозамкнутого кола при $\alpha = 0$ та часу 0,01 с.*

Поняття ударного струму настільки важливе для практики, що є сенс вникнути в нього дещо глибше.

ТЕОРЕМА 2.2

Якщо має місце коротке замикання в електричному колі без активного опору, то час настання ударного струму

$$\omega t = \pi \text{ рад}, \quad (2.17)$$

а його відносне значення при $I_6 = I_{\text{мп}}$.

$$i_y = 2. \quad (2.18)$$

ДОВЕДЕННЯ

Повернемося до розгляду рівняння (2.13). На основі теореми 2.1 приймемо в ньому $\alpha = 0$. Оскільки розглядаємо короткозамкнуте коло без

активного опору ($R_k = 0$), то згасання аперіодичного струму не буде. Дійсно, коефіцієнт згасання e^{-t/T_a} залишається незмінним і дорівнює 1:

$$T_a = \frac{X_k}{R_k \cdot \omega} = \frac{X_k}{0 \cdot \omega} = \infty;$$

$$e^{-t/T_a} = e^{-t/\infty} = e^{-0} = \frac{1}{e^0} = \frac{1}{1} = 1.$$

Візьмемо до уваги, що при $R_k = 0$

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k} = \arctg(\infty) = \frac{\pi}{2}.$$

З урахуванням цього (2.13) буде

$$i_{y*} = \frac{i}{I_{мп}} = \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \sin \frac{\pi}{2};$$

$$i_{y*} = \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + 1. \quad (2.19)$$

Умова максимуму:

$$\frac{di_{y*}}{dt} = \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \omega = 0;$$

$$\cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = 0, \quad (2.20)$$

а це положення виконується, якщо аргумент косинусоїдальної функції буде рівним $\pi/2$:

$$\omega t - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2};$$

$$\omega t = \pi \quad (\text{вираз 2.17 доведений!}),$$

що відповідає $t = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi}{2\pi \cdot f} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ с}$.

Введемо (2.17) в (2.19):

$$i_{y*} = \sin \left(\pi - \frac{\pi}{2} \right) + 1;$$

$$i_{y*} = \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + 1 = 1 + 1 = 2 \quad (\text{вираз 2.18 доведений!}).$$

НАСЛІДОК

В активно-індуктивному короткозамкненому колі за найсприятливіших умов ($\alpha = 0$, х. х.) для ударного струму маємо:

$$\left. \begin{array}{l} t < 0,01; \\ i_{y*} < 2 \end{array} \right\}. \quad (2.21)$$

Доведення (2.21) залишимо читачу, а відхилення t від 0,01 с рекомендуємо подивитися в табл. 2.2 ... 2.4.

Таблиця 2.2 – Визначення часу настання і величини ударного струму ($R_K=0$; $X_K=1$.)

Аргумент t , с	Значення функції $i(t)$, в. о.
0,00000	0,00000
0,00900	1,95106
0,00910	1,96029
0,00920	1,96858
0,00930	1,97592
0,00940	1,98229
0,00950	1,98769
0,00960	1,99212
0,00970	1,99556
0,00980	1,99803
0,00990	1,99951
0,01000	2,00000
0,01010	1,99951
0,01020	1,99803
0,01030	1,99556
0,01040	1,99212
0,01050	1,98769

Таблиця 2.3 – Визначення часу настання і величини ударного струму
($R_K=0,1; Z_K=1$)

Аргумент t, с	Значення функції i(t) відн. од.
0,00000	0,00000
0,00850	1,69272
0,00860	1,70126
0,00870	1,70886
0,00880	1,71554
0,00890	1,72127
0,00900	1,72606
0,00910	1,72989
0,00920	1,73275
0,00930	1,73465
0,00940	1,73557
0,00950	1,77552
0,00960	1,73449
0,00970	1,73248
0,00980	1,72949
0,00990	1,72553
0,01000	1,72058

З ударним струмом тісно пов'язаний інший важливий параметр – ударний коефіцієнт K_y , який вважається безвимірною величиною, що показує у скільки разів ударний струм більший від амплітуди періодичного струму. Згідно з цим визначенням:

$$K_y = \frac{i_y}{I_{мп}}. \quad (2.22)$$

При попередньому режимі холостого ходу, амплітуда періодичного струму, природно, настає через половину періоду, тобто, при $t = 0,01$ с. Саме для цього часу і потрібно записати всі величини, які визначають ударний коефіцієнт.

Тоді:

$$K_y = \frac{I_{мп} + i_{a0} \exp(-0,01/T_a)}{I_{мп}}. \quad (2.23)$$

Таблиця 2.4 – Визначення часу настання і величини ударного струму
($R_K=0,05$; $Z_K=1$)

Аргумент t, с	Значення функції i(t) відн. од.
0,00000	0,00000
0,00850	1,78636
0,00860	1,79738
0,00870	1,80749
0,00880	1,81668
0,00890	1,82493
0,00900	1,83225
0,00910	1,83861
0,00920	1,84401
0,00930	1,84845
0,00940	1,85192
0,00950	1,85441
0,00960	1,85593
0,00970	1,85646
0,00980	1,85601
0,00990	1,85457
0,01000	1,85215

Врахуємо, що в (2.23) $i_{a_0} = I_{мп}$ і матимемо:

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \quad (2.24)$$

Оскільки $T_a \in 0 \dots \infty$, то ударний коефіцієнт

$$1 \leq K_y \leq 2. \quad (2.25)$$

При дослідженні перехідного процесу при короткому замиканні зазвичай цікавляться не тільки миттєвими величинами перехідного струму, але і рядом діючих величин, у визначенні яких існує немало умовностей. Для однозначності розуміння, нижче приводяться ці терміни.

Діюче значення періодичного струму у момент часу t I_{nt} – це середньоквадратичне значення струму за період, в центрі якого знаходиться t за умови, що амплітуда періодичної складової не

змінюється за даний період і залишається рівною своєму значенню у момент t .

З урахуванням цього:

$$I_{пт} = \frac{I_{мп} t}{\sqrt{2}}. \quad (2.26)$$

Надперехідний струм I'' – це діюче значення періодичного струму за перший період перехідного процесу, в центрі якого знаходиться час $t = 0,01$ с.

Сталий струм I_{∞} – діюче значення періодичного струму після закінчення перехідного процесу.

Діюче значення аперіодичного струму у момент часу t $I_{ат}$ – це його миттєве значення у момент t за умови незмінності аперіодичної складової за даний період, в центрі якого знаходиться t :

$$I_{ат} = i_{ат}. \quad (2.27)$$

Діюче значення повного струму короткого замикання у момент часу t I_t визначається як

$$I_t = \sqrt{I_{пт}^2 + I_{ат}^2} \quad (2.28)$$

при прийнятих допущеннях про незмінність складових за даний період, в центрі якого знаходиться t .

Найбільше діюче значення повного струму короткого замикання I_y – це діюче значення повного струму за перший період, в центрі якого знаходиться час $t = 0,01$ с за найбільш несприятливих умов, відмічених вище (попередній холостий хід, $\alpha = 0$):

$$I_y = \sqrt{I_{пт=0,01}^2 + I_{ат=0,01}^2}. \quad (2.29)$$

Зважаючи на введені раніше визначення

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (2.30)$$

Миттєві та діючі величини струму при короткому замиканні в сукупності характеризують перехідний процес за окремими його часовими перетинами. На це орієнтується багато інженерних методів розрахунку аварійних режимів. Проте треба усвідомлювати, що найбільш повна інформація про динаміку процесу міститься в розв'язку системи диференціальних рівнянь.

2.3 Алгоритм розробки заступної схеми для розрахування режиму при трифазному короткому замиканні

Інженерні методи розрахунків аварійних режимів при короткому замиканні спираються на попередньо синтезовану заступну схему. Заступна схема відіграє ключову роль в розрахунках, тому корисно керуватися таким алгоритмом.

1. Побудову заступної схеми треба почати з активних елементів енергосистеми (генератори, система, синхронні компенсатори і двигуни, асинхронні двигуни, узагальнені навантаження), за опорами яких показати відповідні ЕРС.

2. Всі елементи енергосистеми, через які здійснюється підживлення точки короткого замикання, представити опорами, зв'язаними між собою електрично.

При цьому:

- двообмоткові трансформатори і реактори представляються кожен окремим опором;
- триобмоткові трансформатори, автотрансформатори і здвоєні реактори представляються схемою трипроменевої зірки;
- автотрансформатори і трансформатори з розщепленою обмоткою низької напруги – за повною схемою (див. ГОСТ 27514, табл. 4);
- лінії електропередач без врахування взаємоіндукції – одним опором.

3. Виділити будь-яким чином, наприклад, шинками, всі вузли заступної схеми, в яких з'єднуються хоча б два опори, і вузли з ЕРС.

4. Пронумерувати всі вузли (шинки) і опори заступної схеми довільним чином (при ручному рахунку) або за правилами опису вибраної машинної програми (при автоматизованому рахунку).

5. Початком заступної схеми слід вважати всі вузли (шинки) з ЕРС, а кінцем – вузол (шинку) короткого замикання.

2.4 Алгоритм розрахування параметрів заступної схеми

1. Проглядаючи схему енергосистеми і попередньо синтезовану заступну схему, визначити та записати приналежність частин заступної схеми до певного ступеня базисної напруги.

2. Для активних елементів заступної схеми (генератори, синхронні компенсатори, крупні електродвигуни і узагальнені навантаження) визначити відносне базисне значення ЕРС – $E_{*(\delta)}$:

$$E_{*(\delta)} = \frac{E}{U_{(\delta)}} \quad (2.31)$$

або

$$E_{*(\sigma)} = E_{*(H)} \frac{U_{(H)}}{U_{(\sigma)}}, \quad (2.32)$$

де $U_{(\sigma)}$ – базисна напруга того ступеня, на якому знаходиться даний елемент, кВ;

E – ЕРС активного елемента, кВ;

$E_{*(H)}$ – відносне номінальне значення ЕРС активного елемента;

$U_{(H)}$ – номінальна напруга даного елемента, кВ.

Значення $E_{*(H)}$ визначити таким чином.

Для синхронних генераторів і електродвигунів, які працювали в попередньому (індекс 0) режимі з недозбудженням проти номінального:

$$E''_{*(H)} = \left[(U_{*(H)0} - I_{*(H)0} X''_d \sin \varphi_0)^2 + (I_{*(H)0} X''_d \cos \varphi_0)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.33)$$

де $U_{*(H)}$, $I_{*(H)}$ – відповідно, відносні напруга і струм в попередньому режимі;

X''_d – надперехідний відносний номінальний опір по поздовжній осі.

Для синхронних генераторів і електродвигунів, які працювали в попередньому (індекс 0) режимі з Perezбудженням проти номінального:

$$E''_{*(H)} = \left[(U_{*(H)0} + I_{*(H)0} X''_d \sin \varphi_0)^2 + (I_{*(H)0} X''_d \cos \varphi_0)^2 \right]^{1/2}. \quad (2.34)$$

Для синхронних компенсаторів, які працювали в попередньому режимі з Perezбудженням проти номінального:

$$E''_{*(H)} = U_{*(H)0} + I_{*(H)0} X''_d. \quad (2.35)$$

Для синхронних компенсаторів, які працювали в попередньому режимі з недозбудженням проти номінального:

$$E''_{*(H)} = U_{*(H)0} - I_{*(H)0} X''_d. \quad (2.36)$$

Для асинхронних двигунів – за виразом (2.33).

3. Для всіх елементів заступної схеми визначити відносні базисні опори, керуючись виразами (2.37 ... 2.39);

$$Z_{*(\sigma)} = Z \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2}; \quad (2.37)$$

$$Z_{*(\bar{6})} = Z_{*(H)} \frac{I_{\bar{6}}}{I_H} \cdot \frac{U_H}{U_{\bar{6}}}; \quad (2.38)$$

$$Z_{*(\bar{6})} = Z_{*(H)} \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} \cdot \left(\frac{U_H}{U_{\bar{6}}} \right)^2. \quad (2.39)$$

В цих виразах:

Z – опір елемента заступної схеми, Ом;

$Z_{*(H)}$ – відносний номінальний опір елемента заступної схеми;

I_H , U_H , S_H – відповідно, номінальний струм (кА), напруга (кВ) і потужність (МВА);

$I_{\bar{6}}$, $U_{\bar{6}}$, $S_{\bar{6}}$ – відповідно, базисні струм (кА), напруга (кВ) і потужність (МВА).

Корисно зважити на те, що:

- вираз (2.37) зручно використовувати для повітряних, кабельних ліній і реакторів;

- вираз (2.38) – для реакторів, опір яких заданий у відносних номінальних одиницях;

- вираз (2.39) – для генераторів, трансформаторів та автотрансформаторів, причому для трансформаторів і автотрансформаторів

$$Z_{*(H)} = \frac{e_k \%}{100},$$

а для генераторів, якщо враховуються тільки реактивні опори, можна взяти з множини (X_d'' , X_d' , X_d , X_2) залежно від характеру конкретного завдання.

Вирази (2.37 ... 2.39), переведені в “практичну площину” при неврахуванні активних опорів можуть виглядати для елементів енергосистем так:

- генератори, синхронні компенсатори і двигуни –

$$X_{*(\bar{6})} = X_d'' \frac{S_{\bar{6}} \cos \varphi_H}{P_H} \left(\frac{U_H}{U_{\bar{6}}} \right)^2;$$

- трансформатори і автотрансформатори –

$$X_{*(\bar{6})} = \frac{e_k \%}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_H} \left(\frac{U_H}{U_{\bar{6}}} \right)^2;$$

- лінії електропередач –

$$X_{*(\delta)} = X_0 l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2};$$

- реактори –

$$X_{*(\delta)} = \frac{X_p \% I_{\delta} U_H}{100 I_H U_{\delta}};$$

- узагальнені навантаження –

$$X_{*(\delta)} = X_{*(H)} \frac{S_{\delta}}{S_H} \left(\frac{U_H}{U_{\delta}} \right)^2;$$

- система –

$$X_{*(\delta)} = \frac{S_{\delta}}{S''}.$$

4. При автоматизації розрахування параметрів заступної схеми на ЕОМ зовнішню інформацію представити у формі, яка вимагається програмою.

Завдання для самостійної роботи

1. Які умови визначають хід перехідного процесу при короткому замиканні?

2. Сплануйте числовий експеримент дослідження перехідного процесу при короткому замиканні в залежності від кутів зсуву між струмом та напругою φ_H та φ_K .

Для одного із випадків підготуйте файл даних до програми DIFUR та отримайте розв'язки.

Сформулюйте перелік допущень, при яких вирішувалась задача.

3. Якими основними параметрами характеризується перехідний процес при короткому замиканні та як вони залежать від параметрів електричної мережі?

4. Для схеми мережі, що зображена на рис. 2.2, складіть заступну схему для розрахування короткого замикання в позначеній точці.

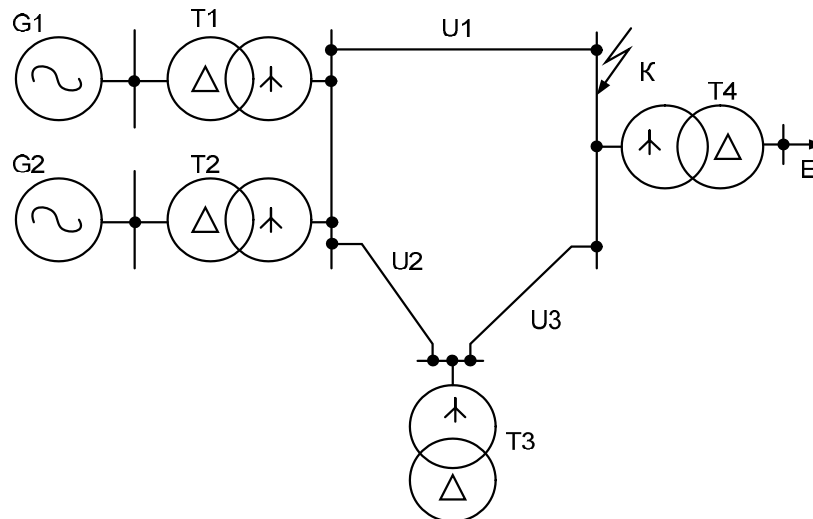


Рисунок 2.2 – Схема електричної мережі

На рис. 2.2:

$G1, G2$ – 176 МВА; 15,75 кВ; $X_d''=0,15$; $X_2=0,2$;

$T1, T2$ – 160 МВА; 242/15,75; $U_k=12\%$;

$T3$ – 80 МВА; 230/35; $U_k=10,5\%$;

$T4$ – 40 МВА; 230/121; $U_k=8,5\%$;

$U1$ – 110 км, $X_l=0,4$ Ом/км; $X_0=3X_l$ Ом/км;

$U2$ – 80 км, $X_l=0,4$ Ом/км; $X_0=3X_l$ Ом/км;

$U3$ – 75 км, $X_l=0,4$ Ом/км; $X_0=3X_l$ Ом/км.

Розрахуйте параметри заступної схеми в системах іменованих та відносних одиниць за точним і наближеним приведенням.

Розрахунком визначте ЕРС активних елементів.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ В УМОВАХ ПОРУШЕННЯ СИМЕТРІЇ СИСТЕМИ

3.1 Математична суть методу симетричних складових

Раніше наголошувалося, що аналіз аварійних режимів принципово можна робити в різних системах координат, але стосовно режимів з порушенням симетрії системи доцільніше виконувати розрахунки в координатах симетричних складових. Така рекомендація навіть зафіксована [1].

Ідея методу (Фортеською, 1918 р.) стосовно електроенергетики полягає в однозначному перетворенні несиметричної трифазної системи комплексних чисел, що становлять вектор фазних координат \mathbf{F} ,

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

в суму трьох симетричних систем комплексних чисел, що становлять вектор координат симетричних складових \mathbf{F}_s ,

$$\mathbf{F}_S = \begin{pmatrix} \dot{F}_{A\Pi} \\ \dot{F}_{A\Pi} \\ \dot{F}_{A0} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

і в перетворенні зворотного напрямку.

Компоненти вектора \mathbf{F}_s отримали, відповідно, назву систем прямої, зворотної і нульової послідовності, для яких справедливі такі співвідношення:

- в системі прямої послідовності

$$\begin{cases} \dot{F}_{BI} = a^2 \dot{F}_{AI} ; \\ \dot{F}_{CI} = a \dot{F}_{AI} \end{cases} \quad (3.3)$$

- в системі зворотної послідовності

$$\begin{cases} \dot{F}_{В\Pi} = a \dot{F}_{A\Pi} ; \\ \dot{F}_{C\Pi} = a^2 \dot{F}_{A\Pi} \end{cases} \quad (3.4)$$

- в системі нульової послідовності

$$\dot{F}_{B0} = \dot{F}_{C0} = \dot{F}_{A0}, \quad (3.5)$$

де $a = \exp j 2 / 3 \cdot \pi$.

ТЕОРЕМА 3.1

Якщо \mathbf{F}_S – тривимірний вектор комплексних величин фази А в координатах симетричних складових, то тривимірний вектор \mathbf{F} комплексних величин у фазних координатах буде:

$$\mathbf{F} = \mathbf{S} \mathbf{F}_S, \quad (3.6)$$

де

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$

ДОВЕДЕННЯ

За визначенням

$$\begin{cases} \dot{F}_A = \dot{F}_{AI} + \dot{F}_{A\Pi} + \dot{F}_{A0} \\ \dot{F}_B = \dot{F}_{BI} + \dot{F}_{B\Pi} + \dot{F}_{B0} \\ \dot{F}_C = \dot{F}_{CI} + \dot{F}_{C\Pi} + \dot{F}_{C0} \end{cases} .$$

З врахуванням (3.3) ... (3.5) ця система буде такою:

$$\begin{cases} \dot{F}_A = \dot{F}_{AI} + \dot{F}_{A\Pi} + \dot{F}_{A0} \\ \dot{F}_B = a^2 \dot{F}_{BI} + a \dot{F}_{B\Pi} + \dot{F}_{B0} \\ \dot{F}_C = a \dot{F}_{CI} + a^2 \dot{F}_{C\Pi} + \dot{F}_{C0} \end{cases} .$$

Інакше у векторно-матричній формі

$$\begin{pmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{F}_{AI} \\ \dot{F}_{AII} \\ \dot{F}_{A0} \end{pmatrix}.$$

Із врахуванням (3.1), (3.2) і (3.7) початкова система алгебраїчних рівнянь може бути записана в такій узагальненій матричній формі:

$$\mathbf{F} = \mathbf{S} \mathbf{F}_S.$$

Це і потрібно було довести.

НАСЛІДОК

Матриця \mathbf{S} – не особлива.

Це очевидно з того, що головний визначник матриці \mathbf{S} відмінний від нуля:

$$\det \mathbf{S} = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} = 3a(1-a) \neq 0.$$

ТЕОРЕМА 3.2.

Якщо \mathbf{F} тривимірний вектор комплексних величин у фазних координатах, то тривимірний вектор \mathbf{F}_S комплексних величин в координатах симетричних складових буде:

$$\mathbf{F}_S = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{F}, \quad (3.8)$$

$$\text{де} \quad \mathbf{S}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

ДОВЕДЕННЯ

На основі наслідку теореми 3.1 матриця \mathbf{S} не особлива. Отже, існує зворотна матриця \mathbf{S}^{-1} .

Помножимо зліва на \mathbf{S}^{-1} матричне рівняння (3.6):

$$\mathbf{S}^{-1} \mathbf{F} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{S} \mathbf{F}_S.$$

Звідси $\mathbf{F}_S = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{F}$, що і потрібно було довести.

Із теорем 3.1 і 3.2 витікає, що ідея про однозначність перетворень, яка лежить в основі методу симетричних складових, одержала доказове

підтвердження. Зокрема, на основі (3.6) і (3.7) можна записати систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{F}_{AI} = \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a\dot{F}_B + a^2\dot{F}_C) \\ \dot{F}_{AII} = \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a^2\dot{F}_B + a\dot{F}_C) \\ \dot{F}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C) \end{cases} \quad (3.10)$$

Векторами \mathbf{F} і \mathbf{F}_S ми можемо вважати будь-які електричні параметри, що мають комплексну природу і відношення до фаз А, В, С трифазної системи – потужність, струм, напруга, падіння напруги, опір і провідність і т.д. та для всіх них справедливі одержані вище закономірності.

Для даного методу є вельми важливим питання про незалежність дії симетричних складових, який стосовно електричних кіл виконується лише для трифазних симетричних систем, тобто таких, опори на фазу яких однакові для фаз А, В і С.

Якщо ж $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$, то самі опори можна розкласти на симетричні складові і падіння напруги, наприклад, прямої послідовності, залежатиме не тільки від струму прямої, але і струмів інших послідовностей. В цьому випадку принцип незалежності дії симетричних складових не виконується.

Інше важливе питання полягає в тому, чи повинні ми шукати в симетричних складових електричних величин будь-який реальний фізичний сенс? На це питання треба з усією певністю дати негативну відповідь, бо як будь-який математичний метод - це зручна абстракція і не більше того. Досить пригадати, що при обриві однієї фази трифазної лінії, струму в цій фазі, природно, немає, але на основі даного методу, можна обчислити струми всіх послідовностей в обірваній фазі, їх аргументи і т.д.

І останнє важливе зауваження – про термінологію. Якщо відповідно до даного методу обчислити симетричні складові струмів, то для їх циркулювання треба позначити відповідні шляхи. На шляхах циркулювання цих струмів зустрічатимуться елементи енергосистем, наприклад, лінії, трансформатори, генератори і т.д., які можуть чинити струмам різних послідовностей неоднакові опори.

У цьому сенсі було б правильно говорити про опір якого-небудь елемента струмам прямої послідовності, струмам зворотної послідовності, струмам нульової послідовності. В несиметричних електропередачах ця правильна термінологія ще б більше ускладнилася.

Проте в розрахунковій практиці укорінялася спрощена термінологія. Наприклад, говорять про опір зворотної послідовності генератора, трансформатора і т.д. навіть при їх симетричному виконанні. Це є своєрідним жаргоном. Адже мають на увазі опір генератора,

трансформатора і т.д. струмам зворотної послідовності. Та до цього потрібно звикнути.

3.2 Заступні схеми для розрахування струмів короткого замикання

Оскільки розрахування несиметричних режимів виконуються в координатах симетричних складових, то найбільш важливі параметри режиму – струми, напруги, потужності знаходять з відповідних заступних схем. Отже, параметри режиму прямої послідовності можуть бути знайдені із заступної схеми прямої послідовності, параметри режиму зворотної послідовності зі схеми зворотної послідовності, а струми і напруги нульової послідовності зі схеми нульової послідовності. Тому уміння синтезувати ці заступні схеми є ключовим моментом в розрахунках аварійних режимів.

Алгоритм розробки заступної схеми прямої послідовності для розрахування аварійних режимів при несиметричних коротких замиканнях

1. Побудову заступної схеми треба почати з активних елементів енергосистеми (генератори, система, синхронні компенсатори і двигуни, асинхронні двигуни, узагальнені навантаження), за опорами яких показати відповідні ЕРС.

2. Всі елементи енергосистеми, через які здійснюється підживлення точки короткого замикання, представити опорами, зв'язаними між собою електрично.

При цьому:

- двообмоткові трансформатори і реактори представляються кожен одним опором;
- триобмоткові трансформатори, автотрансформатори і здвоєні реактори представляються схемою трипроменевої зірки;
- автотрансформатори і трансформатори із розщепленою обмоткою низької напруги – повною схемою (див. ГОСТ 27514, табл. 4);
- лінії електропередач без врахування взаємодукції – одним опором.

3. Виділити будь-яким чином, наприклад, шинками всі вузли заступної схеми, в яких з'єднуються хоча б два опори, і вузли з ЕРС.

4. Пронумерувати всі вузли (шинки) і опори заступної схеми довільним чином (при ручному рахунку) або за правилами вибраної машинної програми (при автоматизованому рахунку).

5. Початком заступної схеми слід вважати всі вузли (шинки) з ЕРС, а кінцем – вузол (шинку) короткого замикання.

Алгоритм розробки заступної схеми зворотної послідовності для розрахування аварійних режимів при несиметричних коротких замиканнях

1. Синтезувати заступну схему зворотної послідовності, керуючись такими міркуваннями:

1.1. Топологія схеми зворотної послідовності не відрізняється від топології заступної схеми прямої послідовності.

1.2. Генерувальні елементи енергосистем в схемі зворотної послідовності є пасивними, тобто, це опори (ЕРС таких елементів відсутня).

2. Виділити будь-яким чином, наприклад, шинками, всі вузли заступної схеми зворотної послідовності, в яких з'єднуються хоча б два опори.

3. “Вільні” кінці опорів, що відносяться до генерувальних елементів енергосистем, з'єднати між собою загальною шинкою.

4. Виділити (позначити) початок схеми зворотної послідовності, яким вважається вузол (загальна шинка), одержаний на кроці 3.

5. Виділити (позначити) кінець схеми зворотної послідовності, яким вважається вузол (шинка) короткого замикання.

Алгоритм розробки заступної схеми нульової послідовності для розрахування аварійних режимів при несиметричних коротких замиканнях

1. При необхідності синтезувати схему нульової послідовності, слід керуватися наступними міркуваннями.

1.1. Синтез схеми необхідно почати від точки короткого замикання, яку виділити вузлом (шинкою) і вважати джерелом струмів нульової послідовності.

1.2. В межах кожного електрично зв'язаного кола виявити можливі шляхи протікання струмів нульової послідовності. Вони виникають, якщо в межах електрично зв'язаного кола є хоча б одна заземлена нейтраль (при декількох заземлених нейтралях утворюються паралельні шляхи для циркулювання струмів нульової послідовності). За відсутності заземлених нейтралей в межах електрично зв'язаного кола шляхів для циркулювання струмів нульової послідовності взагалі немає.

1.3. Якщо нейтраль заземлена не “глухо”, а через опір, то опір нейтралі вводиться потрібною величиною.

1.4. Відпрацювати питання трансформації струмів нульової послідовності стосовно трансформаторів (автотрансформаторів), вхідні обмотки яких зі сторони точки короткого замикання мають заземлену нейтраль.

При цьому:

- якщо трансформатор має схему з'єднань "зірка із заземленою нейтраллю – трикутник", то струм нульової послідовності трансформується на сторону трикутника, протікає у фазах обмотки, але за межі трикутника не виходить;

- якщо трансформатор має схему з'єднань "зірка із заземленою нейтраллю – зірка із заземленою нейтраллю", то трансформація струмів нульової послідовності можлива тільки в тому випадку, якщо у вторинному колі є шляхи циркулювання струмів нульової послідовності;

- якщо трансформатор має схему з'єднань "зірка із заземленою нейтраллю – зірка з ізольованою нейтраллю", то трансформація струмів нульової послідовності на вторинну сторону неможлива.

1.5. Якщо декілька повітряних ліній прокладені по одній трасі, то слід враховувати взаємоіндукцію між ними, і в схемі нульової послідовності відобразити лінії повними заступними схемами (див. ГОСТ 27514, додаток 8).

2. Виділити будь-яким чином, наприклад, шинками, всі вузли заступної схеми нульової послідовності, в яких з'єднуються хоча б два опори.

3. "Вільні" кінці елементів, що є шляхами повернення струмів нульової послідовності до джерела, з'єднати між собою загальною шинкою.

4. Виділити (позначити) початок схеми нульової послідовності, тобто вузол (загальна шинка), одержаний на кроці 3.

5. Виділити (позначити) кінець схеми нульової послідовності, яким вважається вузол (шинка) точки короткого замикання.

При уважному вивченні цих алгоритмів можна виявити деякі важливі положення. Наприклад, заступна схема прямої послідовності взагалі не відрізняється від розрахункової заступної схеми при трифазному короткому замиканні (див. розділ 2.3). І це абсолютно природно: адже режим трифазного короткого замикання, по суті, і є режимом прямої послідовності.

Також видно, що схеми зворотної і нульової послідовності не мають ЕРС і в цьому сенсі є пасивними. Звідси витікає, що хоча вони і мають деяке самостійне значення, використовуються, головним чином, в сукупності зі схемою прямої послідовності.

3.3 Трансформація симетричних складових струмів та напруг

При вирішенні ряду важливих електроенергетичних задач виникає необхідність оцінки симетричних складових струмів і напруги у вузлах, електрично віддалених від точки короткого замикання. Ці вузли можуть бути розділені одним або декількома трансформаторами. Самі

трансформатори можуть мати різні схеми з'єднання і коефіцієнти трансформації.

Прикладом необхідності знань трансформації симетричних складових є задача оцінки чутливості і взагалі поведінки релейних захистів елементів, електрично віддалених від точки несиметричного короткого замикання. Іншим прикладом могла б бути проблема якості електроенергії у вузлах, електрично віддалених від вузлів генерування струмів зворотної і нульової послідовностей.

Зважаючи на різноманітність можливих умов, розглянемо спочатку трансформатор “зірка – трикутник – 11”, а потім узагальнимо результати на інші схеми трансформаторів. Пригадаємо спочатку, що розрізняють фазний K_ϕ і лінійний K_Δ коефіцієнти трансформації. Перший з них розуміють так:

$$K_\phi = \frac{\omega_{\mathcal{K}}}{\omega_\Delta} = \frac{U_{\phi \mathcal{K}}}{U_{\phi \Delta}} = \frac{U_{\phi \mathcal{K}}}{U_{\Delta \mathcal{K}}}, \quad (3.11)$$

де ω – кількість витків;

U_ϕ, U_Δ – відповідно, фазна і лінійна напруги.

У розрахунках режимів великого поширення набув лінійний коефіцієнт трансформації:

$$K_\Delta = \frac{U_{\Delta \mathcal{K}}}{U_{\Delta \Delta}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi \mathcal{K}}}{U_{\Delta \Delta}}. \quad (3.12)$$

Видно, що $K_\Delta = K_\phi \sqrt{3}$, а $K_\phi = \frac{K_\Delta}{\sqrt{3}}$.

ТЕОРЕМА 3.3

Якщо T – трансформатор $\mathcal{K} \Delta - 11$ і $\dot{I}_{A I}$ та $\dot{I}_{A II}$ – струми прямої і зворотної послідовностей на стороні “зірки”, то лінійні струми відповідної послідовності на стороні “трикутника” будуть:

$$\begin{cases} \dot{I}_{a I} = K_\Delta \dot{I}_{A I} \exp j \frac{p}{6} \\ \dot{I}_{a II} = K_\Delta \dot{I}_{A II} \exp j \left(- \frac{p}{6} \right). \end{cases} \quad (3.13)$$

Д О В Е Д Е Н Н Я

З рис. 3.1 видно, що для вузлів a, b і c справедливе наступне:

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{aД} - \dot{I}_{bД} = \dot{I}_A K_\Phi - \dot{I}_B K_\Phi = K_\Phi (\dot{I}_A - \dot{I}_B) = \frac{K_\Delta}{\sqrt{3}} (\dot{I}_A - \dot{I}_B) \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{bД} - \dot{I}_{cД} = \dot{I}_B K_\Phi - \dot{I}_C K_\Phi = K_\Phi (\dot{I}_B - \dot{I}_C) = \frac{K_\Delta}{\sqrt{3}} (\dot{I}_B - \dot{I}_C) \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{cД} - \dot{I}_{aД} = \dot{I}_C K_\Phi - \dot{I}_A K_\Phi = K_\Phi (\dot{I}_C - \dot{I}_A) = \frac{K_\Delta}{\sqrt{3}} (\dot{I}_C - \dot{I}_A) \end{cases} \quad (3.14)$$

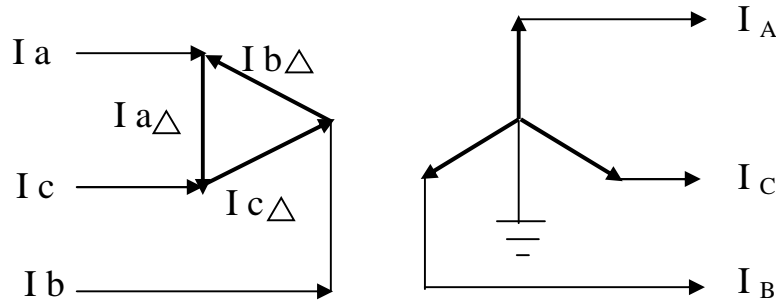


Рисунок 3.1 – Струморозподіл по вітках

Виразивши \dot{I}_A , \dot{I}_B та \dot{I}_C через їх симетричні складові, приймаючи кожного разу за основну фазу, відповідно, А, В або С, отримаємо:

$$\begin{cases} \dot{I}_a = K_\Delta [\dot{I}_{A\text{I}} \exp j p/6 + \dot{I}_{A\text{II}} \exp j(-p/6)] \\ \dot{I}_b = K_\Delta [\dot{I}_{B\text{I}} \exp j p/6 + \dot{I}_{B\text{II}} \exp j(-p/6)] \\ \dot{I}_c = K_\Delta [\dot{I}_{C\text{I}} \exp j p/6 + \dot{I}_{C\text{II}} \exp j(-p/6)] \end{cases} \quad (3.15)$$

Оскільки в лінійних виводах сторони “трикутника” струмів нульової послідовності немає (вони скоротилися при отриманні 3.15), то перші і другі доданки (3.15) це, відповідно, струми прямої і зворотної послідовності, тобто, наприклад, для фази “а”:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{a\text{I}} \\ \dot{I}_{a\text{II}} \\ \dot{I}_{a0} \end{pmatrix} = K_\Delta \begin{pmatrix} \dot{I}_{a\text{I}} \exp j p/6 \\ \dot{I}_{a\text{II}} \exp j(-p/6) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.16)$$

що і потрібно було довести.

А як зв'язуються повні струми у фазних координатах на стороні “трикутника” з симетричними складовими струмів сторони “зірки”? Для

встановлення цього факту скористаємося результатами доведеної теореми і виразами (3.6) і (3.7):

$$I_{j\Pi} = K_{\Pi} I_{j\Pi} \exp(jP/6) \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} K_{\Pi} \begin{pmatrix} \dot{I}_{aI} \exp(jP/6) \\ \dot{I}_{a\Pi} \exp(j(-P/6)) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix} = K_{\Pi} \begin{pmatrix} \exp(jP/6) & \exp(j(-P/6)) \\ -j & j \\ \exp(jP/6) & \exp(j(-P/6)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{aI} \\ \dot{I}_{a\Pi} \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

В узагальненій матричній формі для довільної фази останній вираз буде

$$I_{\Delta} = N I_{\mathcal{K}}, \quad (3.18)$$

де

$$N = K_{\Pi} \begin{pmatrix} \exp(jP/6) & \exp(j(-P/6)) \\ -j & j \\ \exp(j5/6 P) & \exp(j(-5/6 P)) \end{pmatrix}. \quad (3.19)$$

За аналогією зі струмами можна сформулювати правило трансформації симетричних складових напруг. Нижче воно дається без доведення.

ТЕОРЕМА 3.4

Якщо Т – трансформатор $\mathcal{K}^{\circ} / \Delta - 11$ і \dot{U}_{aI} та $\dot{U}_{a\Pi}$ напруги прямої і зворотної послідовностей на стороні “зірки”, то фазні напруги відповідної послідовності в мережі, яка приєднана до сторони “трикутника”, будуть:

$$\begin{cases} \dot{U}_{aI} = \frac{1}{K_{\Pi}} \dot{U}_{aI} \exp(jP/6) \\ \dot{U}_{a\Pi} = \frac{1}{K_{\Pi}} \dot{U}_{a\Pi} \exp(j(-P/6)). \end{cases} \quad (3.20)$$

Теореми 3.3 і 3.4 встановлюють закони трансформації симетричних складових для трансформатора $\mathcal{K}/\Delta - 11$ в напрямі від “зірки” до “трикутника”. Отже, якщо вирази (3.13) і (3.20) “прочитати” навпаки, то легко виходять закони трансформації в напрямі від “трикутника” до “зірки”.

Для того, щоб узагальнити отримані результати на інші трансформатори, введемо в розгляд комплексні коефіцієнти трансформації для прямої \dot{K}_I і зворотної \dot{K}_{II} послідовностей:

$$\begin{cases} \dot{K}_I = \frac{1}{K_L} \exp(jP/6) \cdot N_0 \\ \dot{K}_{II} = \frac{1}{K_L} \exp(j(-P/6)) \cdot N_0, \end{cases} \quad (3.21)$$

де N_0 – номер групи з'єднань трансформатора.
Тоді для довільної j -ої фази можна записати:

$$\begin{cases} \dot{U}_{jI} = \frac{\dot{U}_{jI}}{\dot{K}_I} = \frac{1}{K_L} \dot{U}_{jI} \exp(-jP/6) \cdot N_0 \\ \dot{U}_{jII} = \frac{\dot{U}_{jII}}{\dot{K}_{II}} = \frac{1}{K_L} \dot{U}_{jII} \exp(jP/6) \cdot N_0. \end{cases} \quad (3.22)$$

Закономірності для струмів, одержані з умови інваріантності потужностей, будуть:

$$\begin{cases} \dot{I}_{jI} = K_L \dot{I}_{jI} \exp(-jP/6) \cdot N_0 \\ \dot{I}_{jII} = K_L \dot{I}_{jII} \exp(jP/6) \cdot N_0. \end{cases} \quad (3.23)$$

Правильність (3.22) і (3.23) можна перевірити на трансформаторі 11 групи, закономірності трансформації симетричних складових для якого раніше розкриті в теоремах 3.3 і 3.4.

Проблеми трансформації симетричних складових прямої і зворотної послідовностей розглянуті для звичайних трифазних трансформаторів, опори на фазу у яких однакові. Їх ще називають симетричними трансформаторами.

Проте симетричні трансформатори не вичерпують всієї множини трансформаторів, що використовуються в енергосистемах і системах електропостачання споживачів. Існують неповнофазні, просто,

несиметричні трансформатори і трансформатори, хоч і симетричні, але виконані за складними схемами з'єднання, наприклад, зигзагом. Для цієї підмножини трансформаторів, розкриті раніше, закони трансформації не виконуються. Тому актуальним завданням науки є виявлення законів трансформації симетричних складових і для таких трансформаторів.

3.4 Суть правила еквівалентності прямої послідовності

Ключове для автоматизації розрахунків несиметричних аварійних режимів правило еквівалентності прямої послідовності було вперше сформульоване Н.Щедріним. Воно пов'язує струм прямої послідовності будь-якого несиметричного короткого замикання зі струмом трифазного короткого замикання в деякій фіктивній точці. А оскільки будь-який параметр несиметричного аварійного режиму є деякою функцією струму прямої послідовності, то виявляється, що всі параметри несиметричних коротких замикань при їх інженерних розрахунках можуть бути знайдені на основі правила еквівалентності прямої послідовності. У цьому його найважливіше значення.

Для того, щоб це правило мало узагальнений характер, сформулюємо (без доведення) ряд тверджень стосовно окремих видів несиметричних коротких замикань, що зв'язують струми і напруги відповідних послідовностей.

ТЕОРЕМА 3.5

Якщо в деякій точці трифазної симетричної системи має місце двофазне коротке замикання фаз В і С, то

$$\begin{cases} \dot{I}_{AII} = -\dot{I}_{AI} \\ \dot{U}_{AII} = \dot{U}_{AI} \end{cases} \quad (3.24)$$

ТЕОРЕМА 3.6

Якщо в деякій точці трифазної симетричної системи із заземленою нейтраллю має місце однофазне коротке замикання фази А, то

$$\begin{cases} \dot{I}_{AII} = \dot{I}_{AI} \\ \dot{U}_{AII} + \dot{U}_{A0} = -\dot{U}_{AI} \end{cases} \quad (3.25)$$

ТЕОРЕМА 3.7

Якщо в деякій точці трифазної симетричної системи із заземленою нейтраллю має місце двофазне коротке замикання фаз В і С на землю, то

$$\begin{cases} \dot{I}_{A\Pi} + \dot{I}_{A0} = -\dot{I}_{AI} \\ \dot{U}_{A\Pi} = \dot{U}_{A0} = \dot{U}_{AI} \end{cases} \quad (3.26)$$

ТЕОРЕМА 3.8

Якщо в деякій точці трифазної симетричної системи із заземленою нейтраллю одночасно має місце однофазне коротке замикання фази А і двофазне коротке замикання фаз В і С, то

$$\begin{cases} \dot{I}_{A\Pi} = -\dot{I}_{AI} \frac{Z_0}{4Z_{\Pi} + Z_0} \\ \dot{I}_{A0} = 2\dot{I}_{AI} \frac{Z_{\Pi}}{4Z_{\Pi} + Z_0} \\ \dot{U}_{A\Pi} = \dot{U}_{AI} \\ \dot{U}_{A0} = -2\dot{U}_{AI} \end{cases} \quad (3.27)$$

Z_{Π} і Z_0 – відповідно, результуючі опори заступних схем зворотної і нульової послідовностей.

Приведені вище твердження стосуються симетричних складових характерних аварійних режимів. Природно, що для цих пошкоджень є необхідність отримати параметри режиму у фазних координатах. Це зробити зовсім нескладно, спираючись на загальну закономірність, розкриту в теоремі 3.1. По суті, все зводиться до множення на матрицю перетворення \mathbf{S} у відповідності з рівнянням (3.6).

Якби виконати цю роботу і ще раз звернутися до теорем 3.5 . . . 3.8, то ми би виявили, що всі параметри несиметричних аварійних режимів в координатах симетричних складових та у фазних координатах залежать від струму прямої послідовності в явній (для струмів) або неявній (для напруг) формі.

Отже, визначальним параметром будь-якого несиметричного аварійного режиму (n) є струм прямої послідовності. Можна показати, що сам цей струм визначається так:

$$\dot{I}_{AI}^n = \frac{\dot{E}_A}{Z_I + Z_{\text{дод}}^{(n)}}, \quad (3.28)$$

де $Z_{\text{дод}}^{(n)}$ – деякий додатковий опір, характерний для даного (n) виду несиметричного короткого замикання.

Вираз (3.28) представимо інакше:

$$\dot{i}_{AI}^{(n)} = \frac{\dot{E}_A}{Z_I \left(1 + \frac{Z_{\text{дод}}^{(n)}}{Z_I} \right)} = \frac{\dot{E}_A}{Z_I} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Z_{\text{дод}}^{(n)}}{Z_I}} \quad (3.29)$$

Із (3.29) видно, що компонента $\frac{E_A}{Z_I}$, яка входить в нього, це не що інше, як фазний струм трифазного короткого замикання в дійсній точці пошкодження, бо, як вказувалося раніше, заступна схема прямої послідовності є заступною схемою для трифазного короткого замикання. Виходить, що (3.29) дає, по суті, струм трифазного короткого замикання, але не в дійсній точці, а в іншій – електрично більш віддаленій на $Z_{\text{дод}}^{(n)}$.

На основі цього і сформулюємо правило еквівалентності прямої послідовності.

Струм прямої послідовності будь-якого несиметричного короткого замикання може бути визначений як струм трифазного короткого замикання в точці, віддаленій від дійсної точки короткого замикання на додатковий опір, який не залежить від часу перехідного процесу, параметрів заступної схеми прямої послідовності і для кожного виду короткого замикання визначається результируючими опорами схем зворотної і нульової послідовностей щодо даної точки короткого замикання.

Згадані тут додаткові опори для різних видів коротких замикань зведені до табл. 3.1 в стовпчику $Z_{\text{дод}}^{(n)}$.

Таблиця 3.1 – Значення додаткового опору і коефіцієнта пропорційності для різних видів коротких замикань

Вид короткого замикання	n	$Z_{\text{дод}}^{(n)}$	$m^{(n)}$
1	2	3	4
Трифазне	(3)	0	1
Двофазне	(2)	Z_{II}	$\sqrt{3}$
Однофазне	(1)	$Z_{II} + Z_0$	3

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
Двофазне на землю	(1,1)	$\frac{Z_{II}Z_0}{Z_{II} + Z_0}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{Z_{II}Z_0}{(Z_{II} + Z_0)^2}}$
Однофазно-двофазне	(1,2)	$\frac{Z_{II}Z_0}{4Z_{II} + Z_0}$	$\frac{6Z_{II}}{4Z_{II} + Z_0}$ (для фази А) $\sqrt{3} \frac{2Z_{II} + Z_0}{4Z_{II} + Z_0}$ (для фаз В і С)

Як наголошувалося раніше, метою розрахунків є визначення струмів в пошкоджених фазах у фазних координатах. Виявляється, що ці струми пов'язані зі струмом прямої послідовності простим співвідношенням

$$\dot{I}^{(n)} = m^{(n)} \dot{I}_I^{(n)}, \quad (3.30)$$

справедливим як для модулів, так і для комплексів.

У (3.30) $m^{(n)}$ – деякий коефіцієнт, числове значення якого для кожного виду короткого замикання видно з табл. 3.1.

Зміст цього розділу дає підстави для роздумів.

1. Напряга прямої послідовності в точці несиметричного короткого замикання не буде рівною нулю, як при трифазному короткому замиканні, а буде більшою від нуля, бо фіктивне трифазне коротке замикання електрично віддаляється за додатковий опір. Отже,

$$\dot{U}_{AI} = \dot{I}_{AI} Z_{\text{ДОД}}^{(n)}, \quad (3.31)$$

2. Створюється можливість порівняння тяжкості різних несиметричних коротких замикань між собою і з трифазним коротким замиканням.

Дійсно, повний струм у фазних координатах для будь-якого несиметричного короткого замикання, з врахуванням викладеного, може бути записаний так:

$$\dot{I}^{(n)} = \frac{m^{(n)} E_A}{Z_I \left(1 + \frac{Z_{\text{ДОД}}^{(n)}}{Z_I} \right)}. \quad (3.32)$$

Струм трифазного короткого замикання, як наголошувалося вище, буде:

$$I^{(3)} = \frac{E_A}{Z_I} \quad (3.33)$$

Розглянемо величину

$$k^{(n,3)} = \frac{I^{(n)}}{I^{(3)}} = \frac{m^{(n)}}{k + \frac{Z_{\text{дод}}^{(n)}}{Z_I}} \quad (3.34)$$

і вона дасть можливість з'ясувати, чи буде струм (n) -го виду несиметричного короткого замикання більшим від струму симетричного короткого замикання (>1) чи ні (<1).

3. Розгляд табл. 3.1. і виразу (3.33) дозволяє ранжирувати додаткові опори, а разом з цим струми і напруги прямої послідовності в точці пошкодження:

$$\begin{aligned} Z_{\text{дод}}^{(1)} > Z_{\text{дод}}^{(2)} > Z_{\text{дод}}^{(1,1)} > Z_{\text{дод}}^{(3)}; \\ I_I^{(1)} < I_I^{(2)} < I_I^{(1,1)} < I^3; \\ U_I^{(1)} > U_I^{(2)} > U_I^{(1,1)} > U^{(3)}. \end{aligned}$$

Ці відомості можуть бути корисні в практичних розрахунках.

3.5 Комплексні заступні схеми при поперечних пошкодженнях

Наслідки, що витікають з правила еквівалентності прямої послідовності і теорем 3.5 . . . 3.8, дозволяють синтезувати, так звані, комплексні заступні схеми, які мають вагоме значення при автоматизації розрахунків аварійних режимів при коротких замиканнях.

Комплексні заступні схеми – це узагальнені схеми, що складаються з підсхем прямої, зворотної і нульової послідовностей, які з'єднані між собою так, що вони реалізують правило еквівалентності прямої послідовності для поперечної несиметрії і відображають співвідношення для симетричних складових струму і напруги в точці пошкодження.

Правильний синтез комплексних схем настільки важливий, що доцільно здійснювати його за приведеним нижче алгоритмом.

Алгоритм розробки комплексної заступної схеми для розрахування аварійних режимів при несиметричних коротких замиканнях

1. Синтезувати заступну підсхему прямої послідовності, спираючись на алгоритм розробки заступної схеми для розрахування режиму при трифазному короткому замиканні.

2. Виділити (позначити) початок і кінець підсхеми прямої послідовності.

3. Синтезувати заступну підсхему зворотної послідовності, керуючись такими міркуваннями:

3.1. Топологія підсхеми зворотної послідовності не відрізняється від топології підсхеми прямої послідовності.

3.2. Генерувальні елементи енергосистем в підсхемі зворотної послідовності є пасивними, тобто, зображаються опорами і не містять ЕРС.

4. Виділити будь-яким чином, наприклад, шинками, всі вузли заступної підсхеми зворотної послідовності, в яких з'єднуються хоча б два опори.

5. “Вільні” кінці опорів, що відносяться до генерувальних елементів енергосистем, з'єднати між собою загальною шинкою.

6. Виділити (позначити) початок підсхеми зворотної послідовності, яким вважається вузол (загальна шинка), одержаний на кроці 5.

7. Виділити (позначити) кінець підсхеми зворотної послідовності, яким вважається вузол (шинка) короткого замикання.

8. Якщо необхідно синтезувати підсхему нульової послідовності, керуються такими міркуваннями.

8.1. Синтез підсхеми почати від точки короткого замикання, яку виділити вузлом (шинкою) і вважати джерелом струмів нульової послідовності.

8.2. В межах кожного електрично зв'язаного кола виявити можливі шляхи протікання струмів нульової послідовності. Вони виникають, якщо в межах електрично зв'язаного кола є хоча б одна заземлена нейтраль (при декількох заземлених нейтралях утворюються паралельні шляхи для циркулювання струмів нульової послідовності). За відсутності заземлених нейтралей в межах електрично зв'язаного кола, шляхів для циркулювання струмів нульової послідовності взагалі немає.

8.3. Якщо нейтраль заземлена через опір, то опір нейтралі вводить потрійною величиною.

8.4. Проробити питання трансформації струмів нульової послідовності стосовно трансформаторів (автотрансформаторів), вхідні обмотки яких з боку точки короткого замикання мають заземлену нейтраль.

При цьому:

- якщо трансформатор має схему з'єднань “зірка із заземленою нейтраллю – трикутник”, то струм нульової послідовності трансформується на сторону трикутника, протікає у фазах обмотки, але за межі трикутника не виходить;

- якщо трансформатор має схему з'єднань “зірка із заземленою нейтраллю – зірка із заземленою нейтраллю”, то трансформація струмів

нульової послідовності можлива тільки тоді, коли у вторинному колі є шляхи циркулювання струмів нульової послідовності;

- якщо трансформатор має схему з'єднань “зірка із заземленою нейтраллю – зірка з ізольованою нейтраллю”, то трансформація струмів нульової послідовності на вторинну сторону неможлива.

8.5. Якщо декілька повітряних ліній прокладені по одній трасі, то слід враховувати взаємоіндукцію між ними і в підсхемі нульової послідовності відображати лінії за повними заступними схемами (див. ГОСТ 27514, додаток 8).

9. Виділити будь-яким чином, наприклад, шинками, всі вузли заступної підсхеми нульової послідовності, в яких з'єднуються хоч би два опори.

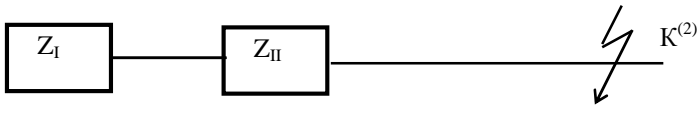
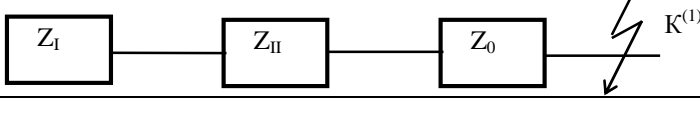
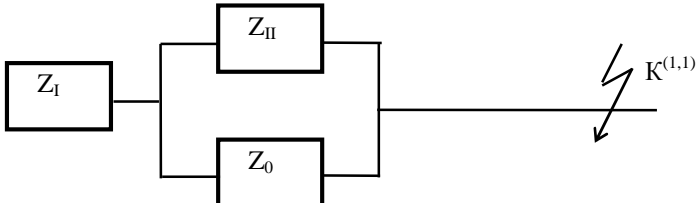
10. “Вільні” кінці елементів, які є шляхами повернення струмів нульової послідовності до джерела, з'єднати між собою загальною шинкою.

11. Виділити (позначити) початок підсхеми нульової послідовності, яким є вузол (загальна шинка), одержаний на кроці 10.

12. Виділити (позначити) кінець підсхеми нульової послідовності, яким вважається вузол (шинка) точки короткого замикання.

13. Об'єднати синтезовані підсхеми в єдину комплексну заступну схему для несиметричного короткого замикання, що досліджується, керуючись правилом еквівалентності прямої послідовності Н.Щедрина. Мнемосхеми такого об'єднання приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Мнемосхеми комплексних заступних схем для всіх видів несиметричного пошкодження

Вид короткого замикання	З'єднання підсхем Z_I, Z_{II}, Z_0
Двофазне	
Однофазне	
Двофазне на землю	

14. Пронумерувати довільно всі вузли (шинки) і опори синтезованої комплексної заступної схеми (при ручному рахунку) або за правилами опису вибраної машинної програми (при автоматизованому розрахунку).

Завдання для самостійної роботи

1. В чому полягає ідея методу симетричних складових, що використовується для розрахування несиметричних перехідних процесів? Чим обумовлена доцільність його використання для аналізу несиметричних коротких замикань?

2. Для схеми рис. 2.2 складіть заступні схеми прямої, зворотної та нульової послідовностей і розрахуйте їх параметри в одній із систем.

Виконайте перетворення схем та знайдіть Z_I Z_{II} Z_0 .

3. Складіть для схеми рис. 2.2 комплексну заступну схему для розрахування однофазного короткого замикання в точці К схеми.

За отриманими результатами розрахунку вкажіть у вузлах схеми електричної мережі напруги, а в її вітках – струми окремих послідовностей.

4 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ З ВЕНТИЛЬНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

4.1 Цілі розрахунків перехідних аварійних режимів в системах з вентильними перетворювачами

В багатьох системах електропостачання з необхідністю з'являються вентильні перетворювачі. Вони є невід'ємною частиною електропередач постійного струму різних класів напруг, елементів, що зв'язують системи різної частоти, навантажень постійного струму, струмообмежувальних і комутуючих пристроїв і т.д.

Будучи частиною систем електропостачання, вентильні перетворювачі, з одного боку, виявляються схильними до впливу аварійних режимів, що виникають в системі, а, з іншого боку, – самі провокують аварійні режими в системі, наприклад, при пробії вентильного плеча.

У зв'язку з цим, множина цілей розрахунків аварійних режимів в системах електропостачання з вентильними перетворювачами розширюється в порівнянні з цілями, відміченими в розділі 1.1. Стає актуальним визначення максимального струму короткого замикання у вентильному плечі при зовнішньому короткому замиканні або внутрішньому пошкодженні. Важливого значення набуває тривалість протікання аварійного струму по елементах вентильного плеча. Все це необхідне для вибору вентилів, розрахування захисту вентильних перетворювачів і оцінення поведінки системи керування (для керованих перетворювачів) в умовах аварійних перехідних процесів.

Нові цілі розрахунків аварійних режимів вимагають ряду додаткових допущень до тих, що сформульовані в 1.1. Так, наприклад, передбачається таке:

- вентиля перетворювачів є ідеальними елементами;
- незмінність в часі амплітуди ЕРС;
- всі вентиля зберігають свої властивості, а тиристори – керованість за винятком пошкоджених;
- не враховуються захисні РС-кола вентилів від перенапруги.

Зрозуміло, що при розгляді специфічних, наприклад, автономних систем електропостачання, деякі допущення можуть і повинні бути упущені. Для ілюстрації зазначимо, що наявність АРЗ генераторів автономних систем електропостачання або систем з електрично близькими генераторами робить невиправданим допущення $E_m = \text{const}$.

Різноманітність схем вентильних перетворювачів робить неможливим розгляд аварійних режимів для всіх них. Більш виправданим є встановлення методології дослідження перехідних режимів і ілюстрація її застосування до будь-якої однієї схеми перетворювача. Зважаючи на

широке розповсюдження трифазної мостової схеми приймемо до розгляду саме її. Іншою обставиною, яка виправдовує цей вибір є те, що багатопульсові схеми перетворення реалізуються як багатомостові схеми, і аварійні режими в окремих мостах виникають незалежно один від одного.

Для мостової схеми додатково до приведених вище, приймемо допущення про те, що при зовнішніх і внутрішніх коротких замиканнях перетворювач переходить в режим “три”, яким вважається режим одночасної роботи трьох вентилів, два з яких належать, наприклад, до катодної групи, а один – до анодної.

Підставою до цього допущення є відоме положення про те, що нормальний режим роботи, коли в провідності струму беруть участь спочатку два, а потім три вентиля (режим “два-три”), закінчується тоді, коли залежний від струму кут комутації стає рівним $\pi/3$. Іншими словами, позакомутаційний період зникає і весь проміжок повторюваності заповнюється кутом комутації. Це має місце при досягненні струмом деякої граничної величини, який апріорі менший від струму короткого замикання. Звідси неминучість настання режиму “три”.

4.2 Математична модель зовнішнього короткого замикання трифазного мостового випрямляча

Умовимося вважати зовнішніми короткими замиканнями на стороні постійного струму замикання між полюсами відразу після перетворювача, за згладжувальним реактором або в глибині мережі постійного струму. Припустимо також, що розглядатимемо некерований випрямляч, бо введення управління дає за інших рівних умов менші значення аварійних струмів. Корисно мати “під рукою” також діаграми напруг (рис. 4.1), на яких дані фазні і випрямлені напруги разом з номерами вентилів, що заміщають вентиляльні плечі.

При умові, як було відмічено вище, що перетворювач при зовнішньому короткому замиканні переходить в режим “три”, то коротке замикання математично описується системою диференціальних рівнянь (2.1), введеною раніше для розгляду аварійного режиму в простій системі. Проте необхідно зробити деякі зміни в позначеннях, спрощення, які витікають з наслідку теореми 2.1, і ввести часові межі існування відповідних рівнянь, пов'язані з роботою окремих “трійок” вентилів. Все це необхідно зробити для отримання адекватної математичної моделі.

Розглянемо спочатку праві частини системи (2.1). Живлення від системи нескінченної потужності припускало незмінність напруги на її виводах ($U_m = \text{const}$). Якщо послабити цю умову і припустити кінцеву потужність еквівалентного живильного генератора, то можна говорити про

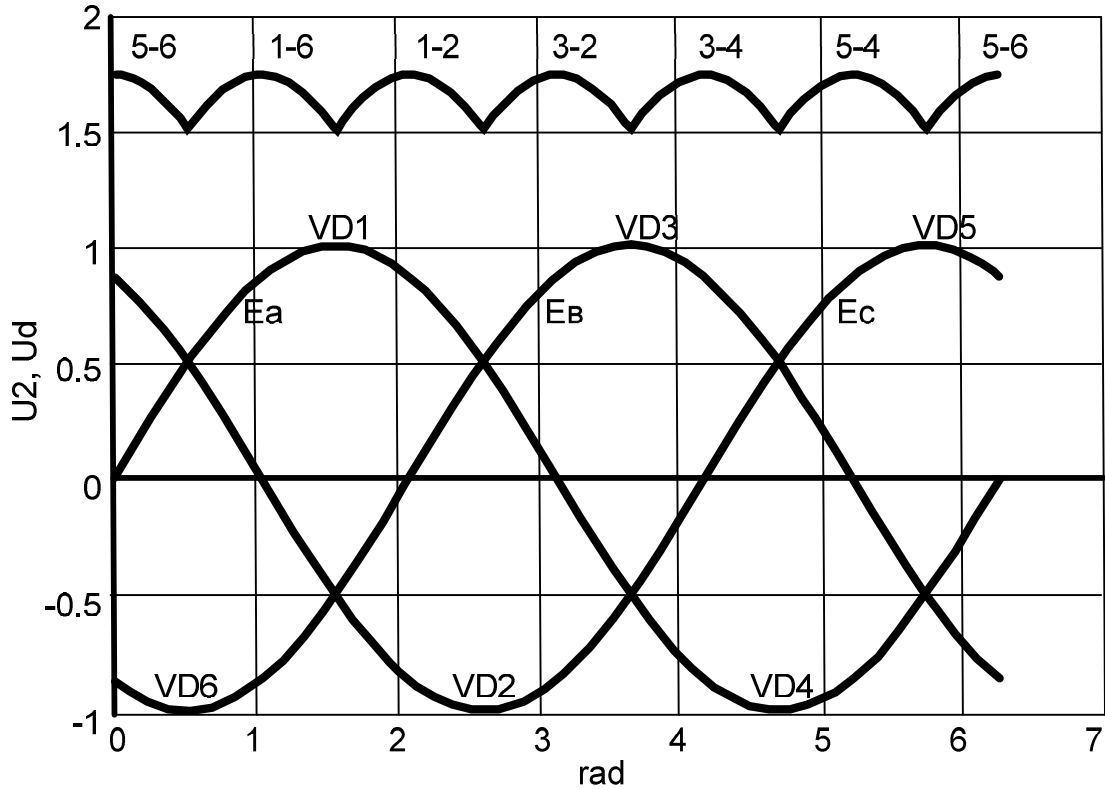


Рисунок 4.1 – Діаграми фазних ЕРС і випрямлених напруг

незмінність перехідної або надперехідної ЕРС за його відповідним опором до тих пір, поки не розпочнеться дія АРЗ.

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t + \alpha) \\ e_B = E_m \sin(\omega t + \alpha - 2\pi/3) \\ e_C = E_m \sin(\omega t + \alpha + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4.1)$$

Оскільки, як правило, цікавляться найбільшими значеннями аварійних струмів, то в (4.1) відразу доцільно задати $\alpha = 0$, оскільки наслідок теореми 2.1 якраз доводить це твердження. Тоді:

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t) \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ e_C = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4.2)$$

Умова $\alpha = 0$ для фази А відображена на рис. 4.2.

З огляду на те, що однією з важливих цілей розрахування аварійних режимів є вибір вентилів, то і рівняння доцільно записувати в термінах вентиляльних струмів, супроводжуючи їх номерами відповідно до рис. 4.1.

Тоді значення аварійних струмів в точці короткого замикання в різний час перехідного процесу будуть очевидними функціями струмів по вентилях.

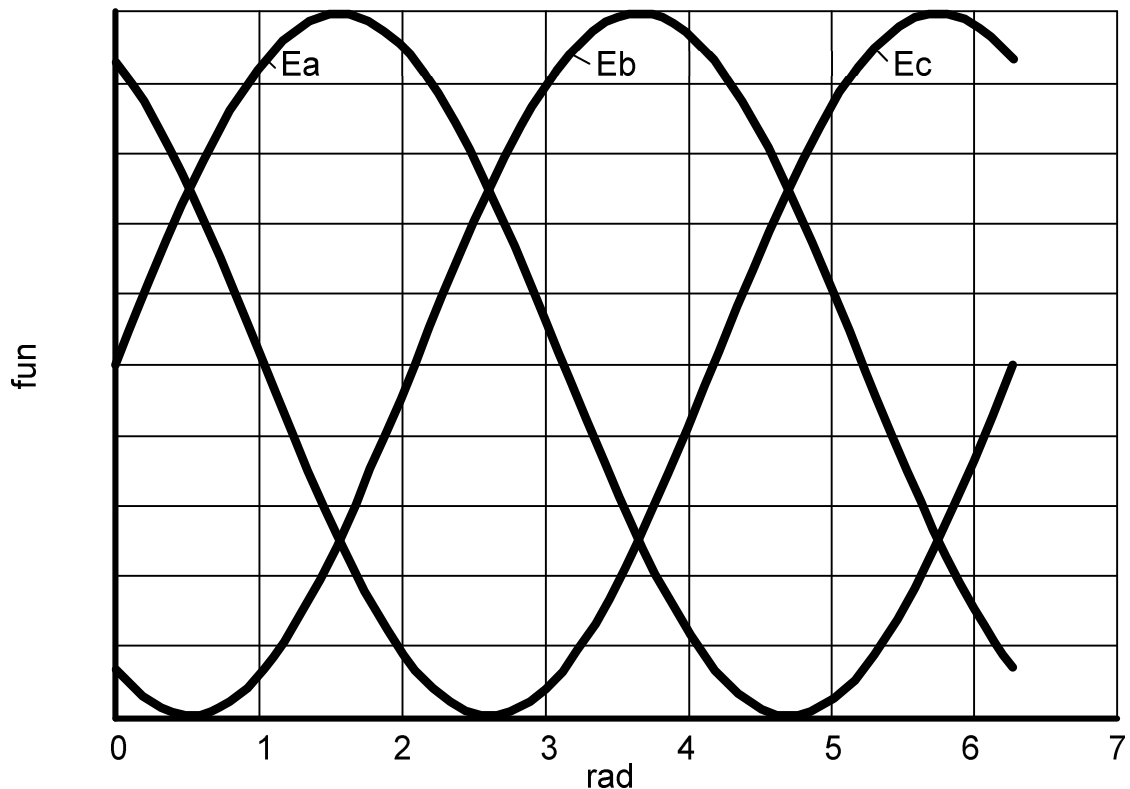


Рисунок 4.2 – Хвильові діаграми ЕРС при $\alpha = 0$

З розгляду рис. 4.1 видно, що одночасно проводять струм такі “трійки” вентилів:

- 5, 1, 6;
- 1, 6, 2;
- 1, 3, 2;
- 3, 2, 4;
- 4, 5, 3;
- 4, 6, 5 і т.д.

Вентилі належать різним фазам трифазної системи, навантажуючи їх струмом відповідно до своїх ключових властивостей. Тривалість існування струмів у вентилях визначають інтервали часу перехідного процесу і залежать від параметрів короткозамкнутого кола за рис. 4.1. Звідси витікає, що математична модель даного перехідного процесу повинна мати шість систем диференціальних рівнянь, що відрізняються початковими умовами і умовами існування.

При формуванні підмоделі першого етапу, в якому взаємодіють вентилі 5, 1, 6, врахуємо, що згідно з теоремою 2.1, найбільш важкі умови виникають, коли передаварійним режимом був режим холостого ходу:

$$\begin{cases} i_1 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_1}{dt} = E_m \sin(\omega t) & | i_1(0) = 0 \\ i_6 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_6}{dt} = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) & | i_6(0) = 0 \\ i_5 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_5}{dt} = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) & | i_5(0) = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Система (4.3) буде правильно відображати перехідний процес до тих пір, поки струм i_5 не почне дорівнювати нулю. Назвемо цей час $t^{(1)}$. Це i буде тривалістю першого етапу. Струми вентилів в кінці першого етапу позначимо так:

$$i_1^{(1)}; i_6^{(1)}; i_5^{(1)} = 0.$$

Модель другого етапу, в якому взаємодіють вентилі 1, 6, 2, сформуємо умовившись, що початкові значення струмів в цих вентилях дорівнюють струмам, які були в кінці першого етапу для вентилів, що належать однойменним фазам:

$$\begin{cases} i_1 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_1}{dt} = E_m \sin(\omega t) & | i_1(t^{(1)}) = i_1^{(1)} \\ i_6 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_6}{dt} = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) & | i_6(t^{(1)}) = i_6^{(1)} \\ i_2 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_2}{dt} = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) & | i_2(t^{(1)}) = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Перехідний процес розвиватиметься відповідно до підмоделі (4.4) поки струм у вентилі 6 не досягне нуля. Назвемо цей час на безперервній шкалі часу $t^{(2)}$. Тоді тривалість другого етапу складе:

$$t^{(2)} - t^{(1)}.$$

Струми вентилів в кінці другого етапу позначимо так:

$$i_1^{(2)}; i_6^{(2)} = 0; i_2^{(2)}.$$

Міркуючи аналогічно, підмодель третього етапу буде:

$$\begin{cases} i_1 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_1}{dt} = E_m \sin(\omega t) & | i_1(t^{(2)}) = i_1^{(2)} \\ i_3 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_3}{dt} = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) & | i_3(t^{(2)}) = 0 \\ i_2 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_2}{dt} = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) & | i_2(t^{(2)}) = i_2^{(2)}. \end{cases} \quad (4.5)$$

Важливим моментом перехідного процесу є час $t^{(3)}$, коли $i_1=0$. Тривалість третього етапу становитиме $t^{(3)}-t^{(2)}$. Струми вентилів у момент $t^{(3)}$ позначимо:

$$i_1^{(3)} = 0; i_3^{(3)}; i_2^{(3)}.$$

Підмодель четвертого етапу буде:

$$\begin{cases} i_4 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_4}{dt} = E_m \sin(\omega t) & | i_4(t^{(3)}) = 0 \\ i_3 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_3}{dt} = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) & | i_3(t^{(3)}) = i_3^{(3)} \\ i_2 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_2}{dt} = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) & | i_2(t^{(3)}) = i_2^{(3)}. \end{cases} \quad (4.6)$$

Як і раніше, відмітимо час $t^{(4)}$, коли $i_2=0$. Етап триватиме $t^{(4)} - t^{(3)}$. Струми вентилів у момент $t^{(4)}$ позначимо так:

$$i_4^{(4)}; i_3^{(4)}; i_2^{(4)} = 0.$$

Підмодель п'ятого етапу представимо так:

$$\begin{cases} i_4 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_4}{dt} = E_m \sin(\omega t) & | i_4(t^{(4)}) = i_4^{(4)} \\ i_3 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_3}{dt} = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) & | i_3(t^{(4)}) = i_3^{(4)} \\ i_5 R_{\kappa} + \frac{X_{\kappa}}{\omega} \frac{di_5}{dt} = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) & | i_5(t^{(4)}) = 0. \end{cases} \quad (4.7)$$

Позначимо $t^{(5)}$ як час, коли $i_3=0$. Тривалість п'ятого етапу буде $t^{(5)} - t^{(4)}$. Струми вентилів у момент $t^{(5)}$ позначимо так:

$$i_4^{(5)}; i_3^{(5)} = 0; i_5^{(5)}.$$

На 6-му етапі підмодель набуває вигляду:

$$\begin{cases} i_4 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_4}{dt} = E_m \sin(\omega t) & | i_4(t^{(5)}) = i_4^{(5)} \\ i_6 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_6}{dt} = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) & | i_6(t^{(5)}) = 0 \\ i_5 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_5}{dt} = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3) & | i_5(t^{(5)}) = i_5^{(5)}. \end{cases} \quad (4.8)$$

Відмітимо час $t^{(6)}$ як час, для якого $i_4=0$. Тривалість шостого етапу буде $t^{(6)} - t^{(5)}$. Струми вентилів у момент $t^{(6)}$ позначимо так:

$$i_4^{(6)} = 0; i_6^{(6)}; i_5^{(6)}.$$

Надалі перехідний процес розвиватиметься на основі підмоделей (4.3) – (4.7) з початковими умовами, забезпечуючи неперервність перехідних струмів по фазах. У сукупності вирази (4.3) – (4.7) і є математичною моделлю зовнішнього короткого замикання трифазного мостового випрямляча.

Сформулюємо тепер загальний алгоритм аналізу перехідного процесу при зовнішньому короткому замиканні трифазного мостового випрямляча на основі розробленої математичної моделі.

1. На основі попереднього дослідження визначити час, коли функція вентильного струму i_5 набуває нульового значення, тобто, тривалість першого етапу.

2. На основі підмоделі (4.3) провести дослідження перехідного процесу на першому етапі.

3. Зафіксувати початкові умови чергового k -ого етапу.

4. Визначити час настання нуля вентильного струму, характерного для k -ого етапу.

5. Якщо знайдений час більший від часу перехідного процесу, який заданий, то припинити розрахунки, інакше перейти до кроку 6.

6. На основі підмоделі k -ого етапу провести дослідження перехідного процесу на k -ому етапі.

7. Прийняти $k = k + 1$, зафіксувати початкові умови для нього і повернутися до кроку 4.

4.3 Числове дослідження перехідного процесу трифазного мостового випрямляча при зовнішньому короткому замиканні

Математичні моделі, розроблені в попередньому розділі, дають можливість досліджувати перехідний процес при будь-якому зовнішньому

короткому замиканні випрямляча (відмінність буде в параметрах X_k і R_k) і будь-якій тривалості перехідного процесу.

Відповідно до приведеного раніше алгоритму, важливим моментом дослідження є з'ясування точних часових меж окремих етапів перехідного процесу. Оскільки стандартні алгоритми розв'язування диференціальних рівнянь можуть знайти тільки деякі нулі рівняння, та й то випадково, потрібно знайти більш довершений інструмент.

Таким інструментом може бути підпрограма RK1 пакету прикладних програм SSP. За її допомогою можна здійснити попереднє інтегрування диференціального рівняння, але таке, що дозволить одержати шукані нулі.

Звернення до RK1 здійснюється так:

```
call RK1 (fun, hi, xi, yi, xf, yf, ansx, ansy, ier). (4.9)
```

Значення формальних параметрів подано далі.

fun – підпрограма – функція, що поставляється користувачем, і дає dy/dx ;

hi – довжина повного кроку інтегрування за аргументом x;

xi – початкове значення x;

yi – початкове значення y, отже $y_i = y(x_i)$;

xf – кінцеве значення x;

yf – кінцеве значення y;

ansx – кінцеве значення x, що виводиться;

ansy – кінцеве значення y, що виводиться, причому

або $ansx = xf$,

або $ansy = yf$, в залежності від того, що

виконується раніше;

ier – код повернення, так

$ier = 0$ – немає помилки і

$ier = 1$ – помилка в розрахунках або

фактичних параметрах.

Дослідимо перехідний процес в мостовому випрямлячі при

$E_m = 1$, $\alpha = 0$, $f = 50$ Гц, $R_k = 0.1$, $z_k = 1$.

Головний модуль із зверненням до RK1 з підпрограмою – функцією fun може бути таким:

* Program RK1

c Эксперимент с RK1 по выявлению нуля функции тока

external fun

pause 'Установите дискету на устройство A'

open(6,file='a:RK.txt',status='new')

write(6,1)

1 format(/20x,30h*****/20x,

```

*30h  Разработчик В.Аввакумов  /20х,
*30h*****//)
call RK1(fun,0.0001,0.02812,1.29226,0.037,0.,ansx,ansy,ier)
write(6,10)
10  format(10х,'Результаты нахождения нуля функции тока'/)
write(6,20)ansx,ansy,ier
20  format(10х,'Значение аргумента -',f8.5/
*10х,'Значение функции - ',f8.5/
*10х,'Код возврата - ',i3)
write(*,50)
50  format(1х, 'Выходной листинг смотрите на дискете в
файле ',
*'RK.txt')
close(6)
stop
end
function fun(x,y)
Um=1.
alfa=0.
f=50.
pi=3.14159
omega=2.*pi*f
Rk=0.1
Xk=sqrt(1.-Rk*Rk)
*  fun=Um*omega/Xk*sin(omega*x+alfa-2.*pi/3.)-
y*omega*Rk/Xk
  fun=Um*omega/Xk*sin(omega*x+alfa)-y*omega*Rk/Xk
*  fun=Um*omega/Xk*sin(omega*x+alfa+2.*pi/3.)-
y*omega*Rk/Xk
  return
end

```

Для кожного конкретного етапу перехідного процесу в цій програмі потрібно змінювати фактичні параметри оператора

call RK1 (. . . .),

а в підпрограмі функції – блокувати два з трьох операторів привласнення

fun = . . . ,

які відповідають певним фазам.

Результат роботи за цією програмою для дев'яти етапів перехідного процесу подані нижче в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку перехідного процесу в мостовому випрямлячі

Результати знаходження нуля функції струму	VD5	VD6	VD6	VD6	VD6	VD6	VD6	VD6	VD6
Значення аргумента	.00643	.01225	.01668	.01905	.02066	.02309	.02722	.03183	.03573
Значення функції	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
Код повернення	0	0	0	0	0	0	0	0	0

У цьому фрагменті аргументом є час в секундах, а функцією – відносний струм відповідного вентиля.

Подальша робота полягає в поетапному дослідженні перехідного процесу на основі підмоделей (4.3)...(4.8). Вона полягає в інтегруванні системи трьох диференціальних рівнянь на кожному етапі. Оскільки всі підмоделі мають однакову структуру, для їх вирішення доцільно використовувати будь-який уніфікований програмний продукт.

Скористаємось програмою DIFUR, яка наведена в додатку А.

В наступних двох фрагментах вихідних лістингів дані результати дослідження перехідного процесу, відповідно, для першого і другого етапів (табл. 4.2 і 4.3), а графічне і числове відображення перехідного процесу на інтервалі 0 ... 0,05 сек. – відповідно, на рис. 4.3 та в додатку Б.

Таблиця 4.2 – Дослідження першого етапу перехідного процесу
Файл даних до програми DIFUR

.00000 .00643 .00010 3
.00000 .00000 .00000

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ t, c	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ		
	VD1	VD6	VD5
1	2	3	4
.00000	.00000	.00000	.00000
.00080	.03160	-.23050	.19890
.00161	.12335	-.47205	.34870
.00241	.26786	-.70868	.44082
.00322	.45445	-.92475	.47030

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4
.00402	.66981	-1.10597	.43615
.00482	.89884	-1.24022	.34138
.00563	1.12561	-1.31843	.19282
.00643	1.33436	-1.33506	.00071

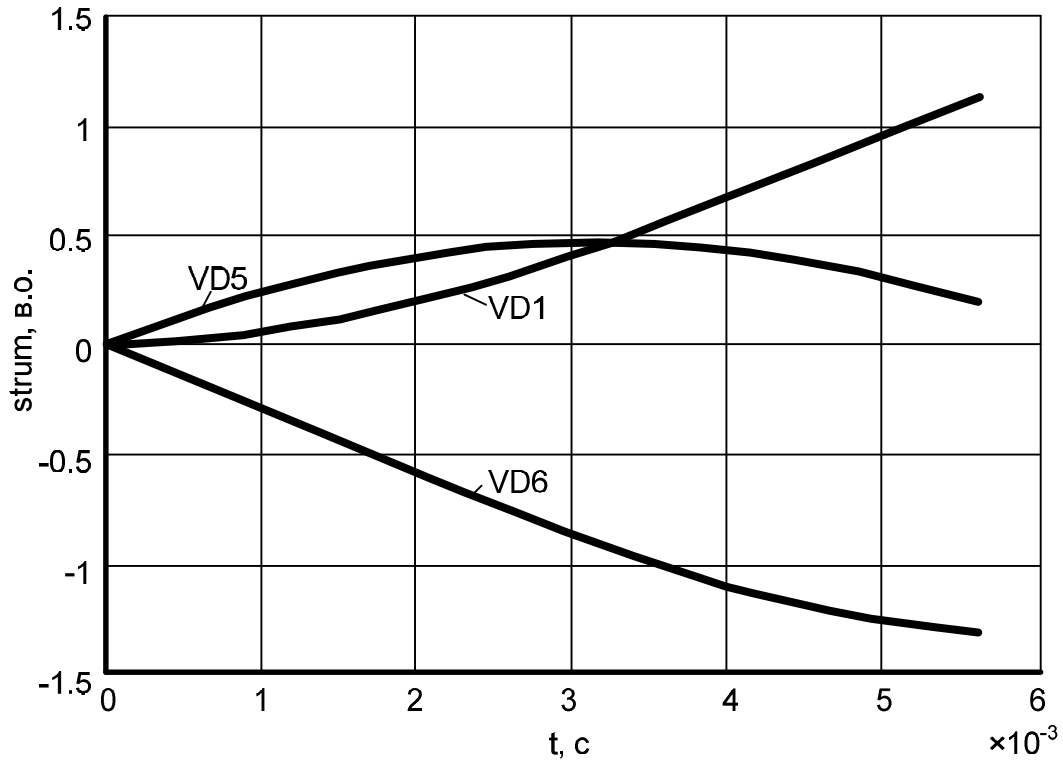


Рисунок 4.3 – Перехідні струми вентилів VD1,VD6 і VD5

Таблиця 4.3 – Дослідження другого етапу переходного процесу
Файл даних до програми DIFUR

.00643 .01225 .0001 3

1.33436-1.33506 .00071

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ t, c	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ		
	VD1	VD6	VD5
1	2	3	4
.00643	1.33436	-1.33506	.00071
.00720	1.50309	-1.29212	-.21095
.00796	1.63138	-1.19383	-.43754
.00873	1.71075	-1.04539	-.66535
.00949	1.73556	-.85490	-.88065

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4
.01026	1.70333	-.63290	-1.07041
.01102	1.61488	-.39175	-1.22312
.01179	1.47431	-.14491	-1.32939
.01225	1.36104	.00093	-1.36197

4.4 Вплив АРЗ генераторів на розвиток перехідного процесу при зовнішньому короткому замиканні випрямляча

Раніше наголошувалося, що умова $E_m = \text{const}$ при розгляді перехідного процесу створює ідеалізовану картину для перехідних струмів в колі короткого замикання. Ця умова виправдана, якщо перетворювач має значне електричне віддалення від джерела або тоді, коли генератори не мають пристроїв АРЗ при будь-якій їх електричній близькості. Інакше врахування АРЗ необхідне.

Пристрій АРЗ генераторів, як відомо, забезпечує, в залежності від налагодження, постійність різних ЕРС або навіть напруги на виводах (АРЗ сильної дії) генератора на певному інтервалі перехідного процесу в короткозамкнутому колі. Слід зважити на те, що новий стан не може встановлюватися миттєво, бо має місце перехідний процес в обмотці збуджувача і інерційність самого пристрою АРЗ.

Для розгляду впливу АРЗ в першому наближенні, задамося законом $E_m = E_m(t)$ від дії гіпотетичного АРЗ, тобто, абстрагуємося від перехідного процесу в колі збудника генератора. У нашому випадку це виправдано, оскільки ми хотіли б виявити сам факт відмінності перехідних струмів в колі, що містить АРЗ генераторів від випадку відсутності АРЗ.

В математичній моделі (4.3)...(4.8) це знайде відображення в правих частинах систем диференціальних рівнянь, де замість E_m слід підставити прийнятну функцію $E_m = E_m(t)$.

Хай закон $E_m = E_m(t)$ має вигляд, представлений на рис. 4.4.

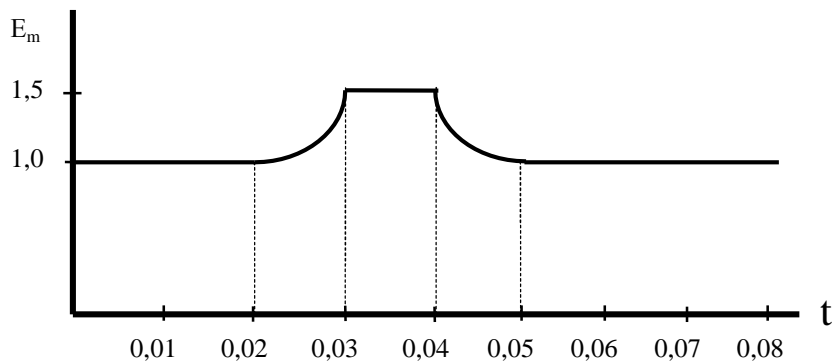


Рисунок 4.4 – Закон регулювання збудження $E_m = E_m(t)$

В усьому іншому збережемо умови, розглянуті в розділі 4.3. Кількісні умови, що стосуються E_m , відображені в нижченаведеному програмному фрагменті, де x – час:

```
if(x.ge.0..and.x.le.0.02) then
  Em=1.
else if(x.gt.0.02.and.x.le.0.03) then
  Em=exp(40.55*(x-0.02))
else if(x.gt.0.03.and.x.le.0.04) then
  Em=1.5
else if(x.gt.0.04.and.x.le.0.05) then
  Em=1.5*exp(-40.55*(x-0.04))
else
  Em=1.
endif
```

Лістинг розв'язку задачі приведений в додатку В, а осцилограми, що відповідають йому, – на рис. 4.5.

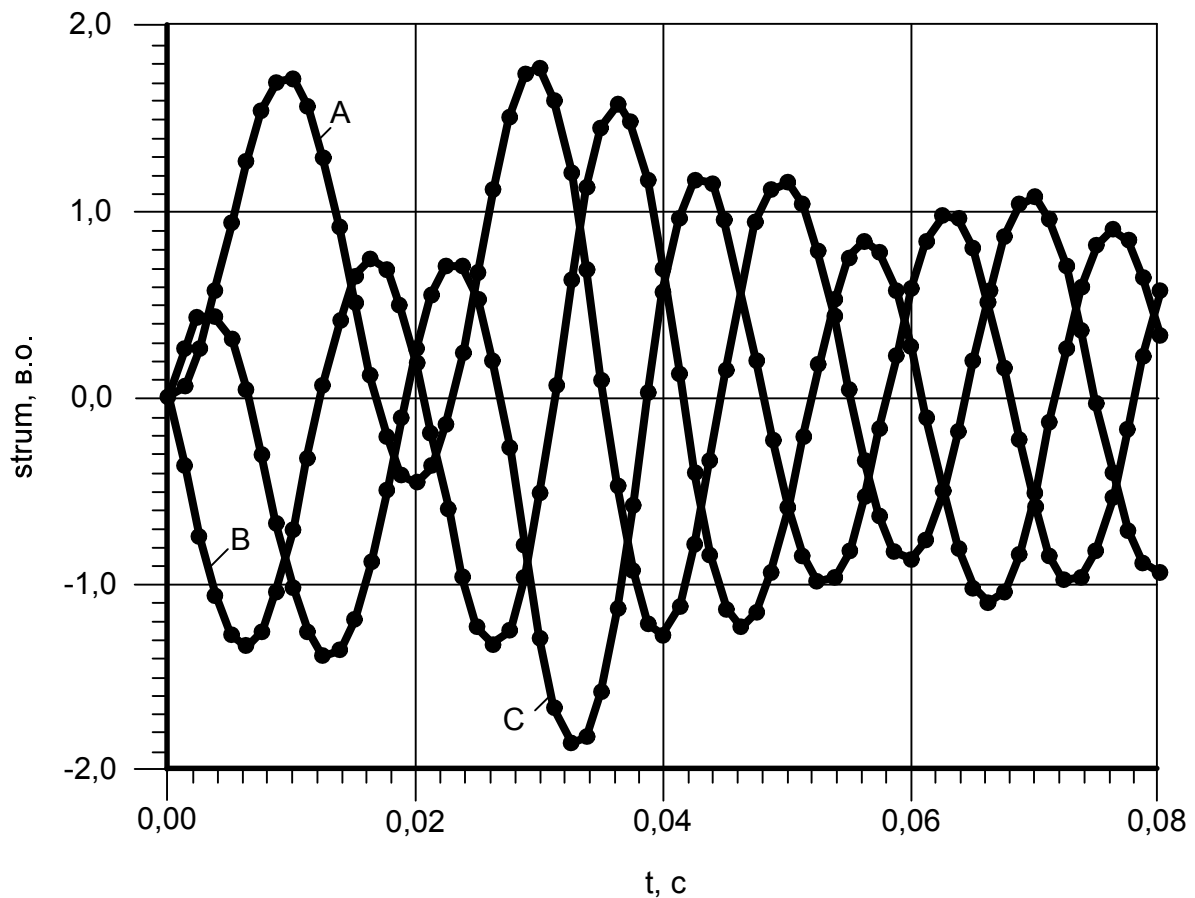


Рисунок 4.5 – Перехідні струми за наявності АРЗ

З розгляду і порівняння їх з розв'язком задачі без АРЗ видно, що має місце:

- кількісна відмінність параметрів перехідного процесу;
- переміщення моменту настання максимуму струму в іншу часову зону;
- навіть при $\alpha=0$ найбільше амплітудне значення має місце не у вентилях фази А, а у вентилях фази С.

В цілому можна говорити про серйозну зміну перехідного процесу.

4.5 Математичне моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового перетворювача

Внутрішнім коротким замиканням вентиляного перетворювача умовимося вважати коротке замикання, обумовлене пробоем вентиляного плеча. Зрозуміло, що такі пробіи можуть виникати в будь-якому вентиляльному плечі при найрізноманітніших поєднаннях зовнішніх умов.

Хай даний трифазний мостовий некерований випрямляч працює на холостому ходу і пробивається вентиль VD5, який заміщає на рис. 4.1 вентиляне плече катодної групи, що належить фазі С. Важливо встановити час початку внутрішнього короткого замикання, бо від цього значно залежать параметри аварійного режиму.

Якщо, як і раніше в розділі 4.2, прийняти $\alpha=0$, то з рис. 4.2 видно, що на інтервалі $v = \omega t \in 0 \dots \pi/6$ вентиль VD5 знаходиться у відкритому стані і пробій в цей час нічого не міняє в режимі його роботи. Струм вентиля VD5 відсутній (холостий хід) і в цьому сенсі дослідження при $\alpha=0$ не представляє інтересу.

В момент $v = \pi/6$ починається процес комутування, і якщо до цього часу віднести пробій вентиля VD5, то комутування струму з вентиля VD5 на вентиль VD1, яка і в нормальних умовах проходить “під управлінням” струму двофазного короткого замикання, затягується. Змінюється весь характер перехідного процесу в контурі комутування і це становить великий інтерес.

Отже, починаємо розгляд аварійного режиму з моменту початку комутування вентиля VD5. З цього часу починається перший етап перехідного процесу. Він проходить в контурі, що охоплює фази А і С, в ньому діє ЕРС e_{ac} . Її значення знайдемо з врахуванням (4.1):

$$\begin{aligned} e_{ac} &= e_a - e_c = E_m [\sin(\omega t + \alpha) - \sin(\omega t + \alpha + \frac{2}{3}\pi)] = \\ &= E_m [\sin(\omega t + \alpha) - \sin(\omega t + \alpha)\cos\frac{2}{3}\pi - \cos(\omega t + \alpha)\sin\frac{2}{3}\pi] = \\ &= E_m [\frac{3}{2}\sin(\omega t + \alpha) - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\omega t + \alpha)]. \end{aligned}$$

Прийmemo $\alpha = \pi/6$:

$$e_{ac} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m [\sqrt{3} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) - \cos(\omega t + \frac{\pi}{6})] = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \{ \sqrt{3} [\sin(\omega t) \cos \frac{\pi}{6} + \cos(\omega t) \sin \frac{\pi}{6}] - \cos(\omega t) \cos \frac{\pi}{6} + \sin(\omega t) \sin \frac{\pi}{6} \} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m [\frac{3}{2} \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(\omega t)] = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m 2 \sin(\omega t).$$

Звідси

$$e_{ac} = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t). \quad (4.10)$$

Зберігаючи введені раніше позначення в (2.1) і (4.3), для контура комутування вентилів VD5 і VD1 можна записати:

$$\begin{cases} i_1 R_k + \frac{x_k}{\omega} \frac{di_1}{dt} = e_a \\ -i_5 R_k - \frac{x_k}{\omega} \frac{di_5}{dt} = e_c. \end{cases} \quad (4.11)$$

Відніmemo друге рівняння (4.11) від першого, пам'ятаючи, що $i_1 = i_5$, візьmemo до уваги (4.10), що дає значення $e_a - e_c$, і тоді матимемо:

$$i_1 R_k + \frac{x_k}{\omega} \frac{di_1}{dt} = \frac{\sqrt{3}}{2} E_m \sin(\omega t). \quad (4.12)$$

Це і буде математичною моделлю етапу. Необхідно тільки обґрунтувати початкові умови і встановити часові межі, в яких перехідний процес буде адекватно описуватися рівнянням (4.12).

Що стосується початкових умов, то вони прості: для $v = (t=0.00167 \text{ с})$, $i_1=0$. Для визначення меж корисно пригадати, що у будь-який момент періоду комутування комутувальну напругу на графіку рис.4.2 можна визначити як напівсуму фазних напруг комутувальних фаз. Миттєве значення комутувальної напруги стане нулем в той момент часу, коли досягне нуля і напруга фази В. Це буде на рис. 4.2 при $v = \frac{2}{3} \pi$ ($t^{(1)}=0,00667 \text{ с}$). З цього моменту і далі напруга фази В буде додатною. Якщо врахувати, що VD5 пробитий, VD1 знаходиться під струмом, а напруга на VD3 стає позитивною, то починаючи з $v = \frac{2}{3} \pi$ характер перехідного процесу буде абсолютно іншим, оскільки почнеться трифазне коротке замикання. Це і буде кінцем першого етапу і початком другого.

Числовий приклад аналізу першого етапу наведений нижче в табл. 4.4, а його графічна ілюстрація на рис. 4.6.

Таблиця 4.4 – Дослідження першого етапу внутрішнього короткого замикання при пробі вентиля VD5

($E_m=1, R_k=0.1, Z_k=1, \alpha=\pi/6$)

Файл даних до програми DIFUR

.00167 .00667 .00010 1

.00000

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ t, с	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ VD1 та -VD5
.00167	.00000
.00334	.31158
.00501	.72018
.00667	1.10694

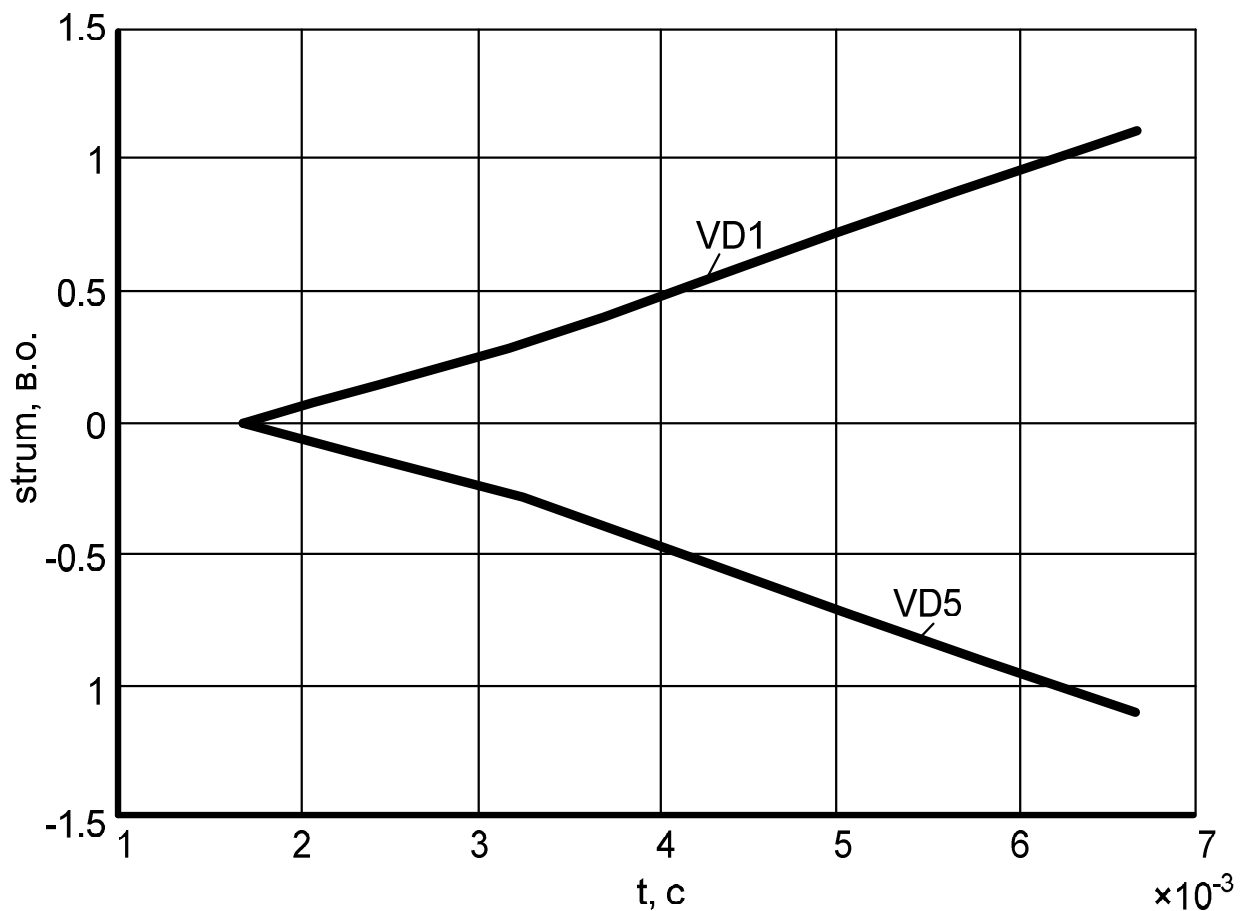


Рисунок 4.6 – Перехідний процес першого етапу

Як і раніше, струми у вентилях в кінці першого етапу позначимо так:

$$i_1^{(1)}; i_5^{(1)}$$

Підмодель другого етапу буде:

$$\begin{cases} i_1 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_1}{dt} = E_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) & | t = t^{(1)}, i_1 = i_1^{(1)} \\ i_3 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_3}{dt} = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) & | t = t^{(1)}, i_3 = 0 \\ i_5 R_k + \frac{X_k}{\omega} \frac{di_5}{dt} = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) & | t = t^{(1)}, i_5 = -i_1^{(1)}. \end{cases} \quad (4.13)$$

Перехідний процес розвиватиметься відповідно до (4.13) до тих пір, поки струм вентиля VD1 не стане нулем. Позначимо цей час $t^{(2)}$. Тоді тривалість другого етапу буде:

$$t^{(2)} - t^{(1)}.$$

Струми вентилів в кінці другого етапу позначимо $i_1^{(2)} = 0; i_3^{(2)}; i_5^{(2)}$. Визначення часу $t^{(2)}$ приведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Результати знаходження нуля функції струму VD1 при $\alpha = \pi/6$

Звернення:

call RK1(fun,0.0001,0.00667,1.10694,0.02,0.,ansx,ansy,ier)

Результати знаходження нуля функції струму	VD1
Значення аргумента	.01352
Значення функції	.00000
Код повернення	0

Числовий приклад аналізу другого етапу наведено нижче в табл. 4.6, а його графічна ілюстрація на рис. 4.7.

Таблиця 4.6 – Дослідження другого етапу внутрішнього короткого замикання при пробі вентиля VD5

($E_m=1., R_k=0.1, Z_k=1., \alpha=\pi/6.$)

Файл даних до програми DIFUR

.00667 .01352 .00010 3

1.10694 .00000-1.10694

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ t, с	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ		
	VD1	VD6	VD5
.00000	.00000	.00000	.00000
.00080	.03160	.03160	.19890
.00161	.12335	.12335	.34870
.00241	.26786	.26786	.44082
.00322	.45445	.45445	.47030
.00402	.66981	.66981	.43615
.00482	.89884	.89884	.34138
.00563	1.12561	1.12561	.19282
.00643	1.33436	1.33436	.00071

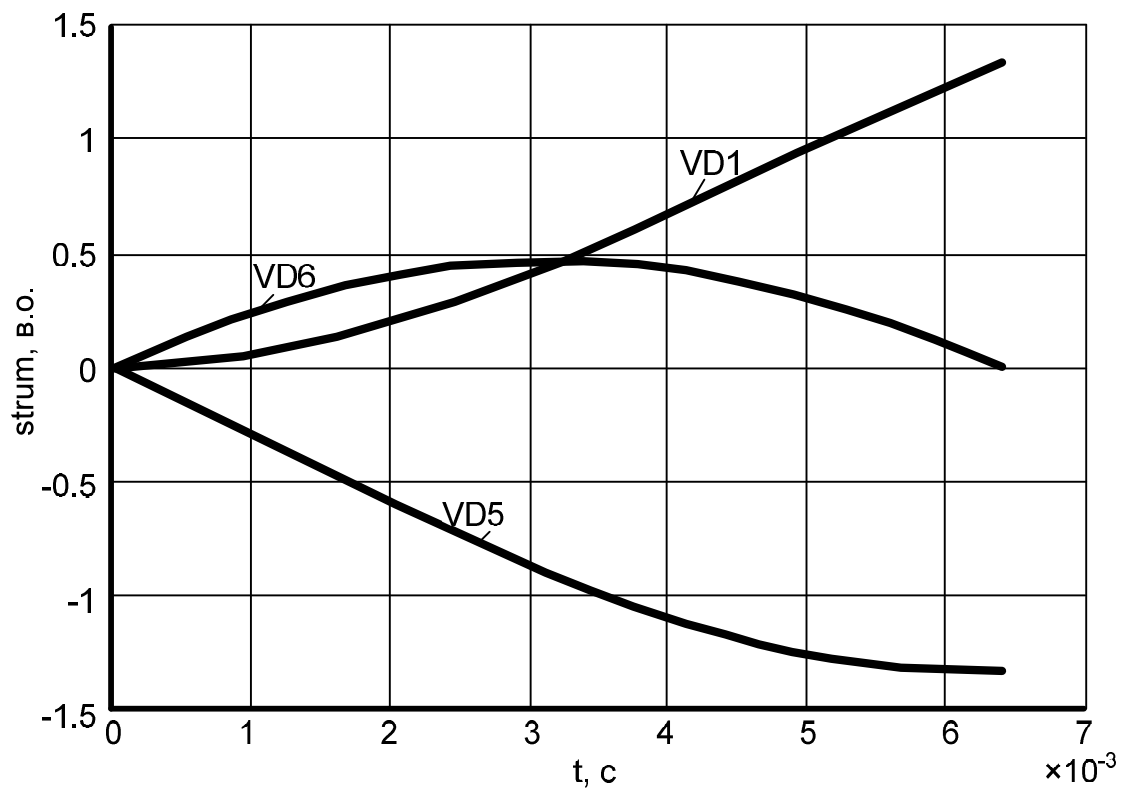


Рисунок 4.7 – Перехідний процес другого етапу

Разом із закінченням другого етапу перехідного процесу в момент часу $t^{(2)}$ починається третій етап, характерною ознакою якого є двофазне коротке замикання фаз В і С. В контурі короткого замикання тепер діє ЕРС e_{bc} . Її значення при $\alpha = \pi/6$ буде

$$e_{bc} = e_b - e_c = \sqrt{3} E_m \sin(\omega t - \pi/3). \quad (4.14)$$

Математична підмодель для третього етапу може бути записана в термінах струму i_3 або i_5 , що немає значення, бо вони однакові:

$$i_3 R_k + \frac{x_k}{\omega} \frac{di_3}{dt} = \sqrt{3}/2 E_m \sin(\omega t - \pi/3) \mid t_3 = t^{(2)}, i_3 = i_3^{(2)}. \quad (4.15)$$

Третій етап завершиться після того, як i_3 досягне нуля. Це буде час $t^{(3)}$, а тривалість третього етапу буде

$$t^{(3)} - t^{(2)}.$$

Числовий пошук нуля функції i_3 приведений в табл. 4.7, з якої видно, що $t^{(3)} = 0,02044$ с.

Таблиця 4.7 – Результати знаходження нуля функції струму VD3 для третього етапу внутрішнього короткого замикання при пробі вентиля VD5

Звернення:

call RK1(fun,0.0001,0.01352,1.59981,0.030,0.,ansx,ansy,ier)

Результати знаходження нуля функції струму	VD3
Значення аргумента	.02044
Значення функції	.00000
Код повернення	0

Характер перехідного процесу на третьому періоді видно з табл. 4.8, а його графічна ілюстрація на рис. 4.8

Таблиця 4.8 – Дослідження третього етапу внутрішнього короткого замикання при пробі вентиля VD5

($E_m=1., R_k=0.1, Z_k=1., \alpha=\pi/6.$)

Файл даних до програми DIFUR

.01352 .02500 .00001 1

1.59981

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ t, с	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ VD3, VD5
.01352	1.59981
.01430	1.52276
.01508	1.39843
.01586	1.23320
.01664	1.03592
.01743	.81741
.01821	.58976
.01899	.36564
.01977	.15755
.02055	-.02298

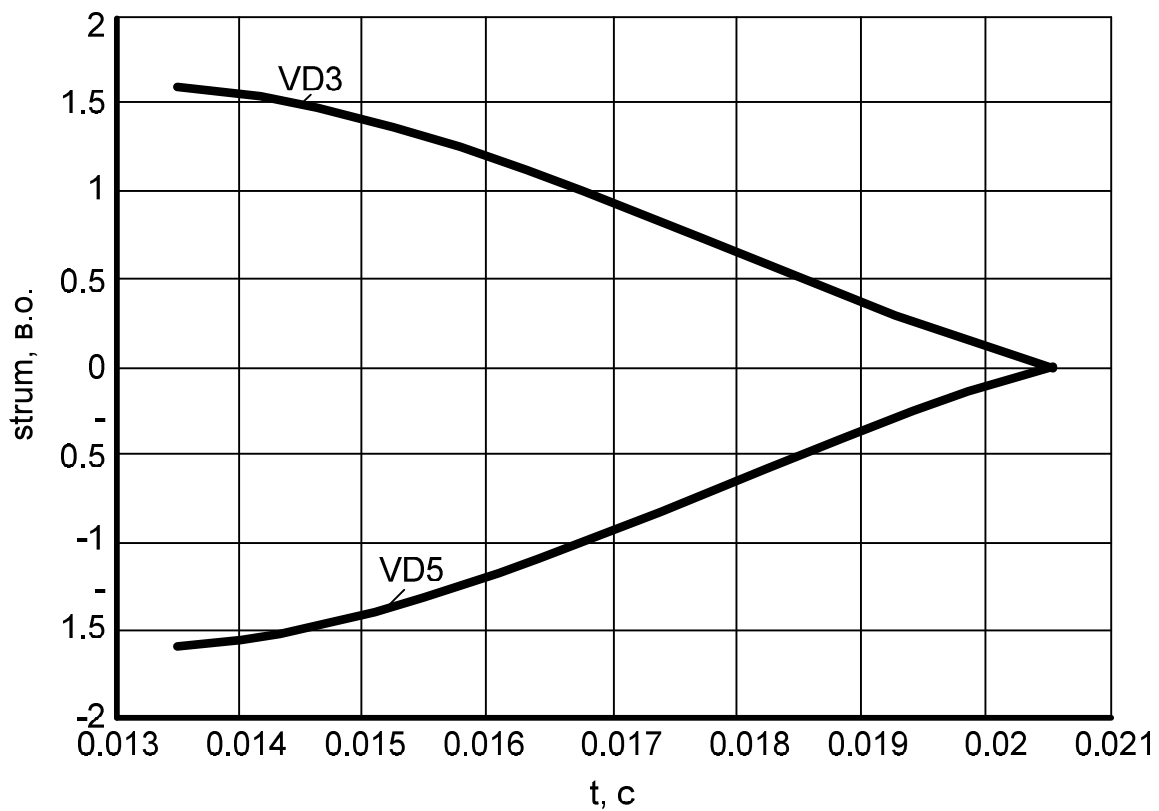


Рисунок 4.8 – Перехідний процес третього етапу

З цієї таблиці можна виявити, що зміна знака має місце вже за межами третього періоду ($t^{(3)} = 0,02044$ с), але там перехідний процес описуватиметься вже іншою моделлю, схожою з моделлю першого етапу, проте за інших початкових умов.

Отже, вважаємо, що методологія дослідження внутрішніх пошкоджень відпрацьована. Хоча пробій може статися з будь-яким вентиляем і у будь-який час, загальний підхід до числового дослідження перехідного процесу залишається незмінним.

Завдання для самостійної роботи

1. Чи зміниться форма випрямленої напруги на рис.4.1, якщо припустити, що амплітуда ЕРС фази А стане більшою від амплітуди ЕРС фази В, наприклад, на 10%?

2. Чи зміняться умови комутування, якщо припустити, що:

а) прикладені ЕРС несиметричні;

б) прикладені ЕРС несинусоїдальні?

3. В яких компонентах моделей 4.3 – 4.7 повинні бути відображені зміни ЕРС, відмічені в пункті 2?

4. Як, на вашу думку, зміняться умови комутування, якщо зовнішнє коротке замикання випрямляча відбудеться в його передаварійному режимі навантаження?

5. Запропонуйте інші програмні продукти, здатні знайти нулі перехідних струмів, що визначають межі етапів єдиного перехідного процесу при зовнішньому короткому замиканні шестипульсового мостового випрямляча.

6. Чи можливо, на вашу думку, перенести ідеологію математичного моделювання, прийняту тут, на дванадцятипульсові двомостові перетворювачі?

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ РІВНЯНЬ ПАРКА-ГОРЕВА

5.1 Диференціальна форма рівнянь Парка-Горєва

Рівняння Парка-Горєва є найбільш довершеною основою дослідження перехідних режимів в електричних системах. Повні рівняння Парка-Горєва були створені спочатку для дослідження перехідних процесів в синхронній машині, проте відразу були поширені і на електричні системи, перехідні процеси в яких істотно визначаються поведінкою синхронних машин і, зокрема, генераторів.

Як відомо, синтез рівнянь Парка-Горєва йде від представлення трифазної системи у фазних координатах А, В, С одним узагальненим вектором в координатах А, С, В, до подальшого його заміщення в прямокутній системі X, 0, Y і до остаточного представлення трифазної системи режимних параметрів в системі координат d-q-0, що обертається.

Ще в недавньому минулому рівняння Парка-Горєва використовувалися переважно в операторній формі. Це було обумовлено технікою ручного розрахунку і використанням аналогових засобів обчислення. При широкому розповсюдженні цифрових ЕОМ тепер немає перешкод для прямого використання диференціальної форми рівнянь Парка-Горєва.

При дослідженні швидкоплинних електромагнітних процесів зазвичай нехтують зміною швидкості синхронних машин. Це виправдовується значною інерційністю системи “генератор-турбіна” і малим часом, в межах якого досліджується перехідний процес. Навпаки, електромеханічні перехідні процеси зазвичай вимагають врахування зміни швидкості. Отже, при синхронній швидкості обертання рівняння Парка-Горєва приймемо в такій формі.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q - r i_q \\ u_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d - r i_q \\ u_0 = -\frac{d\psi_0}{dt} - r i_0 \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 = \frac{d\psi_{ld}}{dt} + r_{ld} i_{ld} \\ 0 = \frac{d\psi_{lq}}{dt} + r_{lq} i_{lq} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Прийmemo, що поздовжня обмотка статора і обидві обмотки ротора в поздовжній осі (обмотки збудження і поздовжня демпферна) зв'язані між собою загальним потоком взаємоіндукції, якому відповідає реактивність поздовжньої реакції якоря X_{ad} , а по поперечній – X_{aq} .

З урахуванням цього, додатково до (5.1) запишемо ще рівняння потокощеплення, і тоді визначимо позначення, що використовувались.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_d = X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_{1d} \\ \Psi_q = X_q i_q + X_{aq} i_{1q} \\ \Psi_0 = X_0 i_0 \\ \Psi_f = X_f i_f + X_{ad} i_d + X_{ad} i_{1d} \\ \Psi_{1d} = X_{1d} i_{1d} + X_{ad} i_d + X_{ad} i_f \\ \Psi_{1q} = X_{1q} i_{1q} + X_{aq} i_q \end{array} \right. \quad (5.2)$$

В (5.1) і (5.2) прийняті такі позначення:

u_d, u_q – поздовжня (d) і поперечна (q) напруга статора генератора ;

u_0 – напруга нульової послідовності генератора;

u_f – напруга обмотки збудження (f);

i_d, i_q – поздовжній і поперечний струми статора генератора;

i_0 – струм нульової послідовності генератора;

i_{1d}, i_{1q} – струми поздовжньої (1_d) і поперечної (1_q) демпферних обмоток генератора;

r, r_f – активні опори обмоток статора і збудження;

r_{1d}, r_{1q} – активні опори поздовжньої і поперечної демпферних обмоток;

Ψ_d, Ψ_q – потокощеплення по поздовжній і поперечній осях;

Ψ_0 – потокощеплення нульової послідовності;

Ψ_f – потокощеплення обмотки збудження;

Ψ_{1d}, Ψ_{1q} – потокощеплення поздовжньої і поперечної демпферних обмоток;

X_d, X_q – синхронні поздовжній і поперечний індуктивні опори генератора;

X_0 – індуктивний опір нульової послідовності генератора;

X_{ad}, X_{aq} – індуктивні опори реакції якоря по поздовжній і поперечній осях;

X_f – індуктивний опір обмотки збудження;

X_{1d}, X_{1q} – індуктивні опори поздовжньої і поперечної демпферних обмоток.

Принциповий алгоритм дослідження перехідних процесів на основі рівнянь Парка-Горєва можна сформулювати так:

1. Сформулювати граничні умови перехідного процесу, що досліджується.
2. Сформулювати вектор змінних в координатах d-q-0.
3. Ввести граничні умови в (5.1) і (5.2) та одержати модифіковані, для даних умов, рівняння Парка-Горєва і рівняння потокощеплень.
4. Ввести модифіковані рівняння потокощеплень в модифіковані рівняння Парка-Горєва і виразити їх в явному вигляді через змінні.
5. Представити одержані рівняння в канонічній формі згідно з вимогами відповідного програмного продукту.
6. Одержати числовий розв'язок перехідного процесу в координатах d-q-0.
7. Здійснити, якщо це потрібно, перехід до фазних координат.

5.2 Ілюстрація принципового алгоритму дослідження перехідного процесу на основі рівнянь Парка-Горєва

Розглянемо роботу алгоритму на прикладі такого завдання: провести дослідження перехідного процесу в синхронній машині без демпферних обмоток, що працює з синхронною швидкістю на холостому ході в незбудженому стані, при подачі в її обмотку збудження поштовхом напруги $u_f = \text{const}$.

Обмірковуючи завдання, можна з очевидністю записати такі граничні умови:

$$\begin{aligned} i_d = i_q = i_0 = 0 \text{ (холостий хід);} \\ u_f = \text{const (для } t = 0). \end{aligned}$$

При цьому вектор змінних буде:

$$\mathbf{X} = (u_d, u_q, i_f)^t.$$

Введемо граничні умови в рівняння (5.1) і (5.2) та прийнемо до уваги ту обставину, що синхронна машина не має демпферних контурів за умовою. Це означає, що по два останніх рівняння в (5.1) і (5.2) повинні бути просто відкинуті з розгляду.

Тоді (5.1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} u_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \\ u_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \\ u_0 = -\frac{d\psi_0}{dt} \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \end{cases} \quad (5.3)$$

Система (5.2) також зміниться і буде такою:

$$\begin{cases} \Psi_d = x_{ad} i_f \\ \Psi_q = 0 \\ \Psi_0 = 0 \\ \Psi_f = x_f i_f. \end{cases} \quad (5.4)$$

Введемо (5.4) в (5.3) :

$$\begin{cases} u_d = -x_{ad} \frac{di_f}{dt} \\ u_q = x_{ad} i_f \\ u_0 = 0 \\ u_f = x_f \frac{di_f}{dt} + r_f i_f. \end{cases} \quad (5.5)$$

Перевіримо останнє рівняння відносно $\frac{di_f}{dt}$ з урахуванням того, що

$$T_{f0} = \frac{x_f}{r_f},$$

де T_{f0} – постійна часу обмотки збудження при розімкненому статорі.

Маємо:

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{1}{T_{f0}} i_f + \frac{u_f}{x_f} \quad \Bigg| \quad t = 0, \quad i_f = 0. \quad (5.6)$$

Введемо (5.6) в перше рівняння (5.5) і остаточно одержимо таку математичну модель:

$$\begin{cases} \frac{di_f}{dt} = -\frac{1}{T_{f0}} i_f + \frac{u_f}{x_f} & t = 0, \quad i_f = 0 \\ u_d = -x_{ad} \left(\frac{1}{T_{f0}} i_f + \frac{u_f}{x_f} \right) \\ u_q = x_{ad} i_f \end{cases} \quad (5.7)$$

Числовий розв'язок (5.7) для умов $u_f = 1.$, $T_{f0} = 1.$, $x_{ad} = 0.9$, $x_f = 1.$, приведений в додатку Г, а графічна інтерпретація перехідного процесу в термінах змінних – на рис. 5.1.

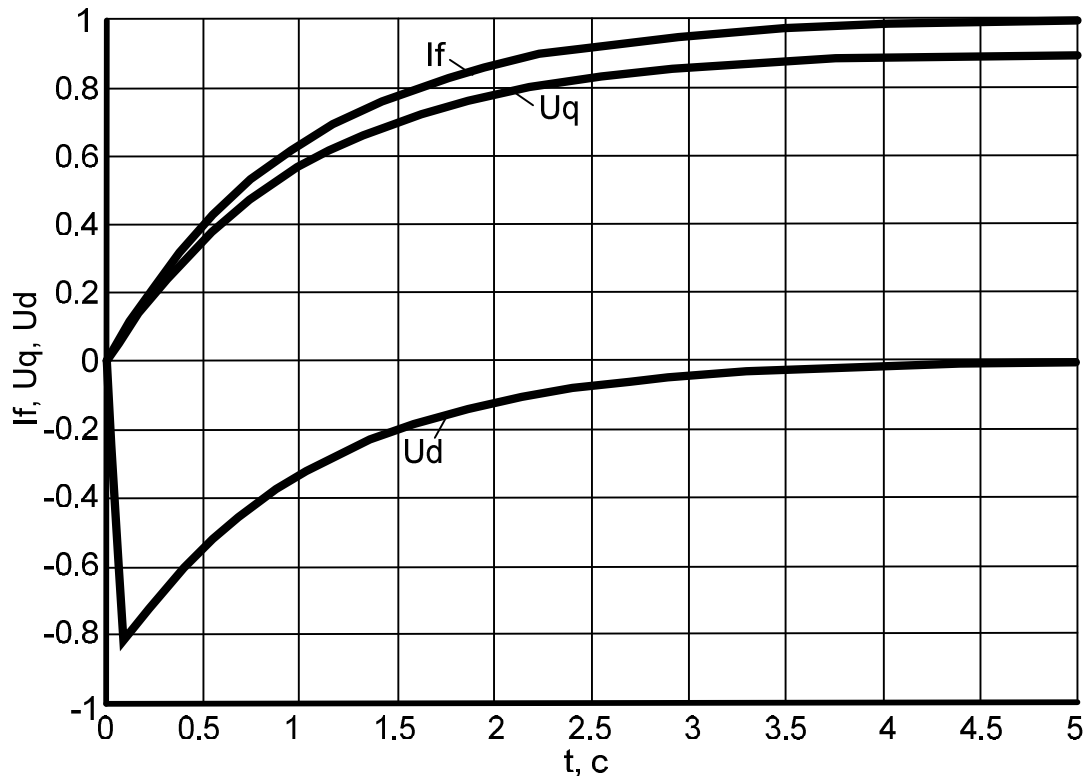


Рисунок 5.1 – Параметри перехідного процесу - $i_f(t)$, $u_d(t)$, $u_q(t)$

З рис. 5.1 видно, що функція $u_d(t)$, яка є трансформаторною ЕРС, згасає, функція $u_q(t)$, яка є ЕРС обертання, зростає і обидві досягають своїх сталих значень разом із закінченням зростання функції $i_f(t)$ – струму в обмотці збудження.

Дослідження перехідних процесів часто завершують знаходженням змінних в координатах d-q-0. В деяких випадках може представляти інтерес переведення всіх або деяких параметрів режиму у фазні координати. У нашому випадку – це напруги u_A , u_B , u_C :

$$\begin{cases} u_A = u_d \cos(\omega t + \gamma_0) + u_q \sin(\omega t + \gamma_0) \\ u_B = u_d \cos(\omega t + \gamma_0 - \frac{2}{3}\pi) + u_q \sin(\omega t + \gamma_0 - \frac{2}{3}\pi) \\ u_C = u_d \cos(\omega t + \gamma_0 + \frac{2}{3}\pi) + u_q \sin(\omega t + \gamma_0 + \frac{2}{3}\pi), \end{cases} \quad (5.8)$$

де ω – кутова частота;

γ_0 – початкова фаза узагальненого вектора напруги.

Для даного прикладу таке переведення у фазні координати на інтервалі двох з половиною періодів приведене в додатку Д.

Отже, здійснено повне дослідження перехідного процесу на основі рівнянь Парка-Горева.

5.3 Дослідження перехідного процесу при короткому замиканні синхронного генератора

Припустимо, що на виводах синхронного турбогенератора, який знаходиться на холостому ході, виникає трифазне коротке замикання. Хай генератор не має АРЗ і демпферних контурів, а в колі збудження циркулює номінальний струм.

Із словесного опису завдання можна встановити, що змінними в координатах d-q-0 будуть:

$$\mathbf{X} = (i_d, i_q, i_f)^t. \quad (5.9)$$

Що стосується перших двох змінних, то вони очевидні: ненавантажений генератор відразу входить в режим короткого замикання і в поздовжній та поперечній обмотках статора виникають перехідні струми.

В поздовжній осі взаємодіють поздовжня обмотка статора і обмотка збудження, що проявляється, зокрема, в зміні струму ротора при незмінній прикладеній напрузі u_f . Тому абсолютно природно включити перехідний струм i_f в множину змінних.

При описі граничних умов врахуємо, що при трифазному короткому замиканні на виводах генератора фазні напруги стають рівними нулю. А оскільки u_d і u_q є функціями u_A , u_B , u_C , то

$$u_d = 0 \text{ та} \quad (5.10)$$

$$u_q = 0. \quad (5.11)$$

Зважаючи на відсутність АРЗ, залишається незмінною прикладена напруга до обмотки збудження, тобто:

$$u_f = \text{const}. \quad (5.12)$$

Оскільки за умовою відсутні демпферні контури, то немає і струмів в них:

$$i_{1d} = 0 \text{ та} \quad (5.13)$$

$$i_{1q} = 0. \quad (5.14)$$

Нарешті, трифазне коротке замикання, будучи симетричним, не створює умов для циркулювання струму нульової послідовності, тобто:

$$i_0 = 0. \quad (5.15)$$

В сукупності співвідношення (5.10) – (5.15) створюють ряд граничних умов, які істотно спрощують режимні рівняння Парка-Горєва (5.1) і рівняння потокощеплення (5.2).

Якщо здійснити необхідні підстановки і подати рівняння в канонічній перевіреній, відносно похідних, формі, то математична модель перехідного процесу, який досліджується, буде:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{r}{x'_d} i_d - \frac{x_q}{x'_d} i_q + \frac{x_{ad}}{x'_d T_{f0}} i_f - u_f \frac{x_{ad}}{x'_d x_f} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{x_d}{x_q} i_d - \frac{r}{x_q} i_q + \frac{x_{ad}}{x_q} i_f \\ \frac{di_f}{dt} = \frac{r x_{ad}}{x_f x'_d} i_d + \frac{x_{ad} x_q}{x_f x'_d} i_q - \frac{1}{T_{f0}} \left(1 + \frac{x_{ad}^2}{x_f x'_d}\right) i_f + \frac{u_f}{x_f} \left(1 + \frac{x_{ad}^2}{x_f x'_d}\right), \end{cases} \quad (5.16)$$

де $x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}$ – перехідний по поздовжній осі індуктивний опір

статора.

Початкові умови для (5.16) витікають з того факту, що в момент початку раптового короткого замикання поздовжній і поперечний струми статора були відсутні, а струм в обмотці збудження був рівний сталому

значенню $i_{f \text{ ст}} = \frac{u_f}{r_f}$:

$$\begin{cases} i_{d0} = 0 \\ i_{q0} = 0 \\ i_{f0} = i_{f \text{ ст}}. \end{cases} \quad (5.17)$$

Числовий розв'язок задачі на основі математичної моделі (5.16) з початковими умовами (5.17) для параметрів $u_f = 1$, $T_{f0} = 1$, $x_{ad} = 0.9$, $x_f = 1.17$, $x_q = x_d = 0.25$, $R = 0.3$, приведений в додатку Е, а графічна ілюстрація – на рис. 5.2.

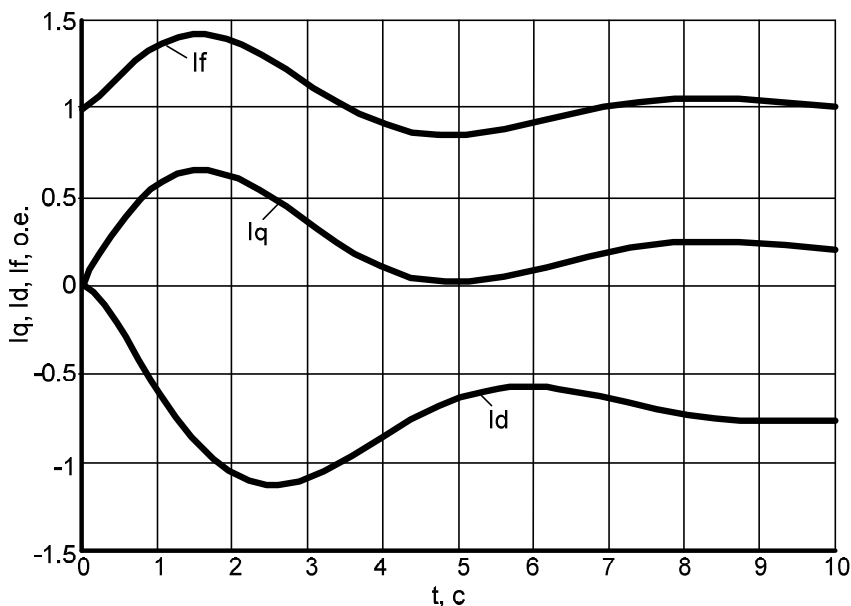


Рисунок 5.2 – Перехідні струми в обмотці збудження (i_f) і статорних обмотках (i_d , i_q) в умовах короткого замикання

5.4 Дослідження впливу демпферних контурів на розвиток перехідних процесів в синхронній машині

Заспокійливі (демпферні) обмотки відіграють, як відомо, найважливішу роль в протіканні перехідних режимів. Спробуємо розглянути їх вплив на спрощеному прикладі. Для того, щоб виявити роль демпферних обмоток, методично доцільно порівняти перехідні процеси в синхронній машині при одному і тому ж збуренні та інших однакових умовах, але таких, що відрізняються наявністю або відсутністю демпферних контурів.

У розділі 5.2 був розглянутий перехідний процес в синхронній машині для випадку відсутності демпферних обмоток. Тепер ускладнимо завдання наявністю демпферних контурів.

Отже, спробуємо провести дослідження перехідного процесу в синхронній машині з однією поздовжньою демпферною обмоткою, що знаходиться в незбудженому стані на холостому ході з синхронною швидкістю, при подачі в її обмотку збудження поштовхом напругу $u_f = \text{const}$.

Для цього випадку можна записати наступні граничні умови.

$$\begin{cases} i_d = i_q = i_0 = i_{1q} = 0 \\ u_f = \text{const}. \end{cases} \quad (5.18)$$

Вектор змінних буде:

$$\mathbf{X} = (u_d, u_q, i_f, i_{1d})^t.$$

Спрощені для умов (5.18) режимні рівняння Парка-Горєва і рівняння потокощеплень будуть:

$$\begin{cases} u_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \\ u_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \\ u_0 = -\frac{d\psi_0}{dt} \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 = \frac{d\psi_{1d}}{dt} + r_{1d} i_{1d}. \end{cases} \quad (5.19)$$

$$\begin{cases} \Psi_d = x_{ad} i_f + x_{ad} i_{1d} \\ \Psi_q = 0 \\ \Psi_0 = 0 \\ \Psi_f = x_f i_f + x_{ad} i_{1d} \\ \Psi_{1d} = x_{1d} i_{1d} + x_{ad} i_f \end{cases} \quad (5.20)$$

Якщо провести необхідну роботу з (5.19, 5.20) відповідно до наведеного вище принципового алгоритму, то остаточна математична модель досліджуваного перехідного процесу буде:

$$\begin{cases} \frac{di_f}{dt} = -\frac{r_f x_{1d}}{x_f x_{1d} - x_{ad}^2} (r_f x_{1d} i_f - x_{ad} r_{1d} i_{1d} - u_f x_{1d}) \\ \frac{di_{1d}}{dt} = \frac{1}{x_f x_{1d} - x_{ad}^2} (r_f x_{ad} i_f - x_f r_{1d} i_{1d} - u_f x_{ad}) \\ u_d = \frac{x_{ad}}{x_f x_{1d} - x_{ad}^2} [r_f (x_{1d} - x_{ad}) i_f + r_{1d} (x_f - x_{ad}) i_{1d} - u_f (x_{1d} - x_{ad})] \\ u_q = x_{ad} (i_f + i_{1d}). \end{cases} \quad (5.21)$$

Всі величини, які входять до (5.21), розтлумачені в розділі 5.1 і тому не вимагають додаткової розшифровки.

Числовий розв'язок (5.21) для тих же умов, що були прийняті раніше, приведений в додатку Ж, а графічна ілюстрація зміни змінних в часі - на рис. 5.3.

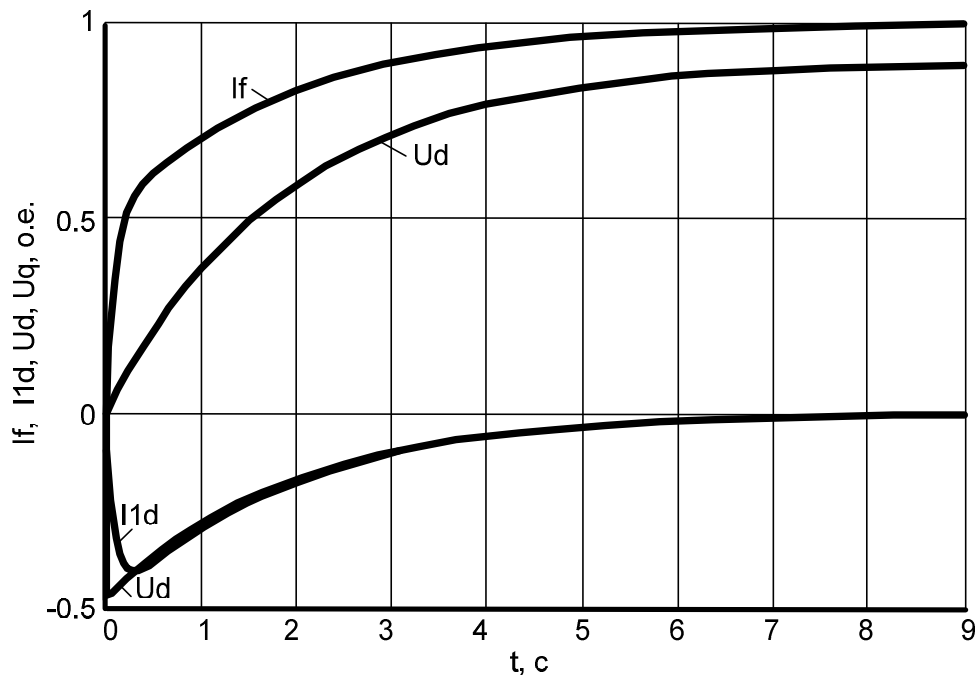


Рисунок 5.3 – Траєкторії режимних параметрів в контурах генератора за наявності поздовжньої демпферної обмотки

Уважний розгляд додатків Г і Ж, в яких відображається один і той же перехідний процес в синхронній машині без демпферних обмоток (Г) та з поздовжньою демпферною обмоткою (Ж), дає інформацію для аналізу і висновків.

Демпферний ефект виявляється в наступному:

- перехідний процес “подовжується” в часі;
- сталий режим досягається пізніше;
- швидкість зміни параметрів режиму на деяких інтервалах часу сповільнюється (похідні режимних параметрів зменшуються), що видно з рис. 5.4 – 5.6.

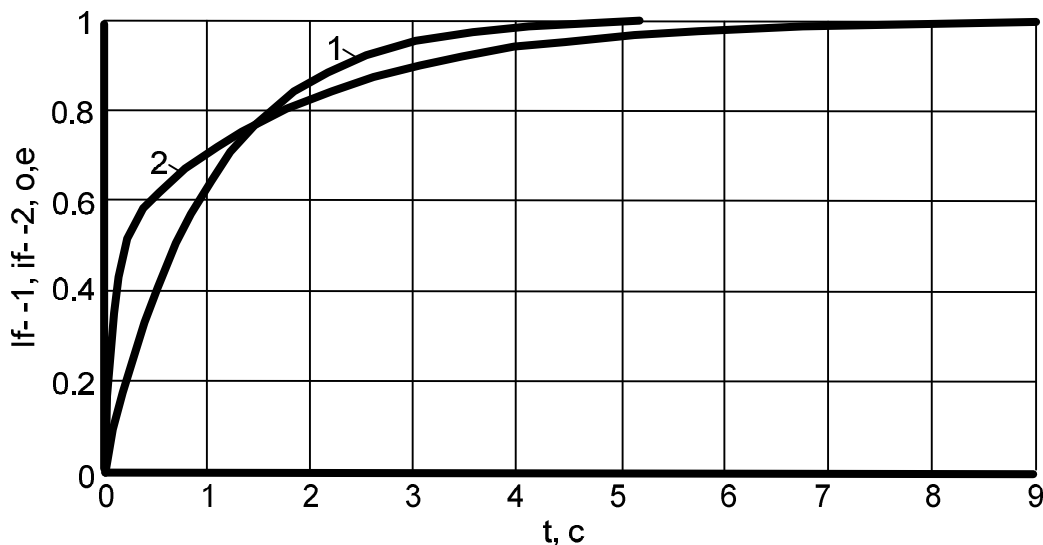


Рисунок 5.4 – Траєкторії струмів збудження за відсутності (1) і наявності (2) демпферної обмотки генератора

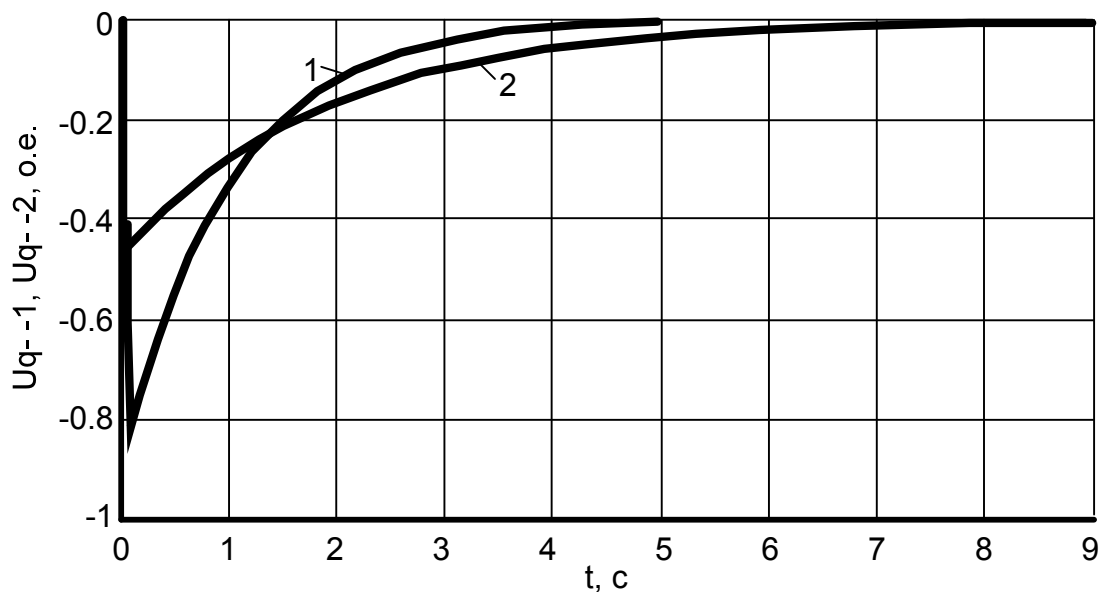


Рисунок 5.5 – Траєкторії поздовжньої напруги за відсутності (1) і наявності (2) демпферної обмотки генератора

Особливо яскраво “уповільнення” перехідного процесу показано на рис. 5.6.

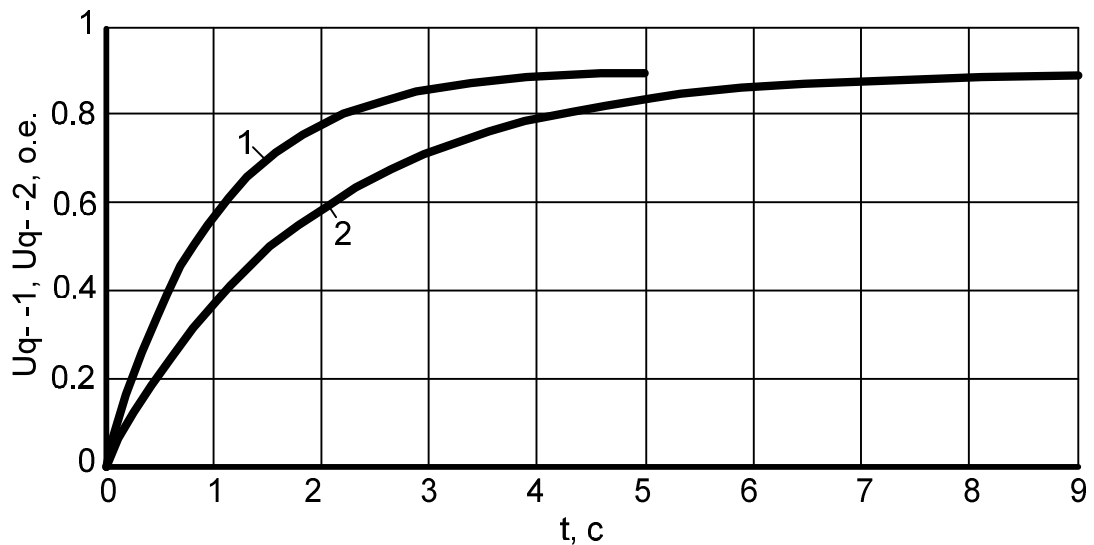


Рисунок 5.6 – Траєкторії поперечної напруги за відсутності (1) і наявності (2) демпферної обмотки генератора

Оскільки u_q залежить від суми струмів i_f та i_{ld} (5.21), то ця складова напруги статора змінюється з постійною часу приблизно рівною сумі постійних часу обмотки збудження T_{f0} і демпферної обмотки T_{ld0} та забезпечує повільніший вихід на сталий режим.

Завдання для самостійної роботи

1. Як зміняться граничні умови для прикладу, розглянутого в розділі 5.2, якщо в обмотку ротора поштовхом подати напругу, що змінюється в часі, наприклад, за таким експоненціальним законом:

$$U_f = 1 - \exp(-t) \quad | \quad t = 0 \dots 10 \text{ с. ?}$$

2. Дайте фізичне пояснення траєкторіям параметрів перехідного процесу, рис. 5.1, зокрема:

- чому напруга U_d в сталому режимі стає рівною нулю?
- чому струм i_f протягом перехідного процесу відрізняється від сталого значення?
- чому напруга U_q відразу не досягає сталого значення, а тільки поступово?

3. Як зміняться граничні умови прикладу, розглянутого в розділі 5.3, якщо на виводах виникає двофазне коротке замикання між фазами А і В?

4. Дайте фізичне пояснення траєкторіям параметрів перехідного процесу, рис. 5.2, зокрема:

- чому в струмі i_f виникає змінна складова?
- чому виникають коливання струмів i_d та i_q ?
- чому коливання струмів i_d та i_q припиняються разом з досягненням сталого значення струмом i_f ?

5. Дайте фізичне пояснення відмінностям парам траєкторій параметрів перехідного процесу на рис. 5.4, 5.5 і 5.6.

6. Розгляньте можливість інтегрування системи рівнянь 5.7 в середовищі пакету MATLAB:

- запишіть рівняння 5.7 в потрібній, за цим пакетом, канонічній формі;
- виберіть будь-яку програму з арсеналу MATLAB (наприклад, ode23, ode45 або іншу);
- задайте необхідні операнди звернення до вибраної програми;
- направте програму на виконання, збережіть вихідну інформацію і побудуйте графічні залежності $i_f(t)$, $U_d(t)$ та $U_q(t)$.

6 ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИННО-ОРІЄНТОВАНОГО МЕТОДУ ВУЗЛОВИХ НАПРУГ І ПРОГРАМ РОЗРАХУВАННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ЙОГО ОСНОВІ

6.1 Вимоги до засобів автоматизації розрахування аварійних режимів

Засобами автоматизації розрахунків, в широкому розумінні слова, є технічні засоби (власне, ЕОМ або мережі ЕОМ, цифро-аналогові і аналого-цифрові перетворювачі, пристрої відображення і т. д.), системне програмне забезпечення, сервісне програмне забезпечення і пакети прикладних програм або окремі програми прикладного призначення.

Якщо відійти від такого широкого уявлення, то дослідника аварійних режимів, в практичному плані, понад усе цікавлять прикладне програмне забезпечення і наукові ідеї, що в них використовуються, методи і алгоритми.

Вимоги, які домінуватимуть в конкретних умовах, виявляться різними і повинні визначатися цілями розрахунків. Їх широкий спектр представлений у розділі 1. Формулюючи розрахункові умови, людина, що проводить розрахунки, повинна висунути вимоги до програмного забезпечення і на основі цього зупинитися на відомому програмному продукті або розробити своє програмне забезпечення.

6.2 Машинно-орієнтований метод вузлових напруг для інженерних розрахунків струмів короткого замикання

Спочатку розглянемо ідею методу. Нехай маємо деякий фрагмент заступної схеми, рис. 6.1, з комплексними параметрами.

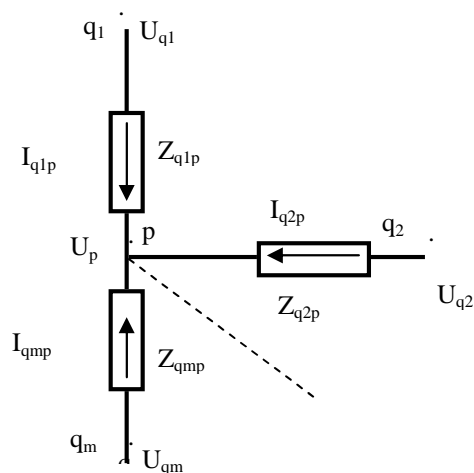


Рисунок 6.1 – Фрагмент заступної схеми

На цьому рисунку:

1, 2 .., m – вітки;

q_1, q_2, \dots, q_m – вузли, в яких задані напруги;

$\dot{U}_{q_1}, \dot{U}_{q_2}, \dots, \dot{U}_{q_m}$ – напруги у вузлах q_1, q_2, \dots, q_m ;

p – вузол з невідомою напругою \dot{U}_p ;

$Z_{q_1p}, Z_{q_2p}, \dots, Z_{q_m p}$ – опори віток 1, 2 .., m, що зв'язують вузли q_1, q_2, \dots, q_m з вузлом p.

Задамося напрямками струмів, що очікуються по вітках 1, 2 .., m і позначимо їх $\dot{I}_{q_1p}, \dot{I}_{q_2p}, \dots, \dot{I}_{q_m p}$. Для цих струмів справедливим є наступне:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{q_1p} = \frac{\dot{U}_{q_1} - \dot{U}_p}{Z_{q_1p}} \\ \dot{I}_{q_2p} = \frac{\dot{U}_{q_2} - \dot{U}_p}{Z_{q_2p}} \\ \dots \\ \dot{I}_{q_m p} = \frac{\dot{U}_{q_m} - \dot{U}_p}{Z_{q_m p}} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

Інакше:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{q_1p} = y_{q_1p} (\dot{U}_{q_1} - \dot{U}_p) \\ \dot{I}_{q_2p} = y_{q_2p} (\dot{U}_{q_2} - \dot{U}_p) \\ \dots \\ \dot{I}_{q_m p} = y_{q_m p} (\dot{U}_{q_m} - \dot{U}_p) \end{array} \right. \quad (6.2)$$

За першим законом Кірхгофа для (6.1) маємо:

$$\dot{I}_{q_1p} + \dot{I}_{q_2p} + \dots + \dot{I}_{q_m p} = 0;$$

$$\frac{\dot{U}_{q_1} - \dot{U}_p}{Z_{q_1p}} + \frac{\dot{U}_{q_2} - \dot{U}_p}{Z_{q_2p}} + \dots + \frac{\dot{U}_{q_m} - \dot{U}_p}{Z_{q_m p}} = 0;$$

$$\sum_m \frac{1}{Z_{q_m p}} (\dot{U}_{q_m} - \dot{U}_p) = 0. \quad (6.3)$$

Аналогічний підхід до (6.2) приводить до наступного:

$$\begin{aligned} y_{q_1 p} \dot{U}_{q_1} + y_{q_2 p} \dot{U}_{q_2} + \dots + y_{q_m p} \dot{U}_{q_m} &= \dot{U}_p y_{q_1 p} + \dot{U}_p y_{q_2 p} + \dots + \dot{U}_p y_{q_m p}; \\ \sum_m y_{q_m p} \dot{U}_{q_m} &= \dot{U}_p \sum_m y_{q_m p}; \\ \dot{U}_p &= \frac{1}{\sum_m y_{q_m p}} \sum_m y_{q_m p} \dot{U}_{q_m}. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Отже, якщо відомі напруги у всіх вузлах, суміжних з вузлом p , то в вузлі p на основі (6.4) напруга знаходиться за одну ітерацію і до того ж точно.

Якщо ми, як і раніше, шукаємо напругу у вузлі p , але не знаємо точно напруги в одному з суміжних вузлів, наприклад, у вузлі q_m , то точно знайти \dot{U}_p можливо, якщо напругу \dot{U}_{q_m} задати довільно і організувати багатоітераційну процедуру її обчислення у відповідності з (6.4) та перевіркою за виразом (6.3). Природно, що з інженерної точки бачення нас не цікавить абсолютне виконання вузлового закону Кірхгофа: досить задати допустиму точність ε як скалярну величину.

Тоді (6.3) буде:

$$\left| \sum_m \frac{1}{Z_{q_m p}} (\dot{U}_{q_m} - \dot{U}_p) \right| \leq \varepsilon. \quad (6.5)$$

Тепер добре було б, якби вдалося задати ітераційну процедуру, яка швидко сходиться. Тоді її можна було б застосовувати до схеми з заданою довільною напругою не в одному вузлі, а в багатьох. В будь-якій заступній схемі знайдеться немало вузлів, де напруга відома точно, причому якщо таких “опорних” вузлів буде більше, то швидкодія методу буде вища. До вузлів з відомими напругами можна віднести вузли ЕРС генерувальних віток, віток навантажень (синхронних, асинхронних, комплексних) і, нарешті, вузол короткого замикання, в якому при трифазному пошкодженні напруга рівна нулю.

У поданому вигляді машинно-орієнтований метод вузлових напруг створює основу для побудови ефективних алгоритмів розрахування струмів короткого замикання в термінах комплексних величин, тобто, при врахуванні фаз вузлових напруг, активних і реактивних опорів елементів

заступних схем. Зрозуміло, що в тих випадках, де врахування активних опорів і фаз ЕРС генерувальних елементів не потрібне, компоненти, що входять до (6.4) і (6.5), слід вважати модулями.

Нарешті, слід відмітити, що метод цілком прийнятний і для розрахування несиметричних коротких замикань: адже розрахування тоді виконується за комплексною заступною схемою.

Тепер сформулюємо принциповий алгоритм розрахунку з використанням цього методу.

1. Синтезувати заступну схему (комплексну схему) для розрахування відповідного аварійного режиму.

2. Пронумерувати вузли і вітки заступної схеми (комплексної схеми).

3. Виразити в прийнятій системі одиниць параметри заступної схеми (комплексної схеми) – ЕРС і опори.

4. Задатися напрямками струмів в елементах заступної схеми (комплексної схеми).

5. Скласти матрицю заступної схеми (комплексної схеми), що відображає її топологію.

6. Дати нульове наближення напругам у всіх вузлах, крім живильних вузлів і вузла пошкодження.

7. Прийняти рішення щодо точності.

8. Ввести всі інформаційні масиви в пам'ять ЕОМ.

9. Виконати ітераційне розрахування параметрів аварійного режиму.

10. Вивести на зовнішній носій отримані результати.

Цей принциповий алгоритм повинен щоразу деталізуватись відповідно до вибраної машинної програми. Вимоги зазвичай задаються в описі відповідного програмного продукту.

6.3 Технологія використання програми ТКЗ для розрахування струмів короткого замикання

Існує чимало програм, що використовують викладений вище машинно-орієнтований метод вузлових напруг. Вони відрізняються граничною вимірністю схеми заміщення (числом вузлів і віток), врахуванням або неврахуванням активних опорів елементів даної енергосистеми та іншими деталями.

У цьому розділі розглянемо технологію використання програми ТКЗ в практичних інженерних розрахунках. Ця програма призначена для розрахунку параметрів аварійного режиму в складнозамкнутій заступній схемі (комплексній схемі) граничною вимірністю в 100 вузлів і 100 віток. При зміні довжин масивів програма автоматично налаштовується на нову вимірність. У програмі не враховуються активні опори елементів і фази ЕРС різних генераторів. У програму ТКЗ вбудований сервісний блок, який здійснює перевірку коректності початкових даних. Це виявляється вельми

корисною властивістю програми. Програма TKZ призначена для виконання на ПЕОМ під керуванням MS-DOS і WINDOWS.

Найважливішим елементом технології використання будь-яких програм розрахування аварійних режимів є підготовка початкових даних. Для даної програми алгоритм підготовки зовнішньої інформації такий.

1. Синтезувати заступну схему (комплексну схему) відносно точки короткого замикання.

2. Пронумерувати довільно всі вітки схеми, займаючи числа підряд.

3. Пронумерувати довільно всі вузли схеми, займаючи числа підряд.

4. Задати напрями струмів по вітках, і лише напрями струмів в вітках, безпосередньо пов'язаних з точкою короткого замикання, повинні відображати підживлення місця пошкодження.

5. Підрахувати в даній схемі кількість віток (kolwet), кількість вузлів (kolusl) і кількість вузлів, в яких напруга повинна уточнюватися (kolvar).

6. Прийняти базисні потужність і напругу та обчислити відносні базисні опори, ЕРС елементів даної схеми та базисний струм в точках пошкодження.

7. Синтезувати матрицю з'єднань схеми вимірністю (kolwet×3) так, щоб кожен рядок відображав номер вітки, номер вузла початку вітки, номер вузла кінця вітки (вважати, що струми йдуть від початку вітки до її кінця).

8. Синтезувати вектор відносних базисних опорів схеми вимірністю kolwet, що відповідає першому стовпцю матриці з'єднань.

9. Синтезувати вектор номерів вузлів вимірністю kolusl.

10. Синтезувати вектор вузлових напруг вимірністю kolusl, причому у вузлах з ЕРС – їх дійсними значеннями, у вузлах пошкодження – 0, в інших вузлах – довільними значеннями у вигляді початкового наближення.

11. Синтезувати вектор номерів вузлів вимірністю kolvar, в яких вузлові напруги задані початковими наближеннями.

12. Задатися точністю наближення.

На цьому попередня робота з підготовки зовнішньої інформації закінчена. Далі необхідно цю інформацію представити в необхідній формі і зберегти на своїй дискеті з ім'ям TKZ.dat. Послідовність, формати і імена представлення зовнішньої інформації видно з наступного фрагмента програми.

```
dimension mat(100,3),x(100),numusl(100),uusl(100),  
*nuvar(100),tokwet(100),uvar(100),tvar(100)
```

```

read(5,5) kolwet,kolusl,kolvar
read(5,5) ((mat(i,j),j=1,3),i=1,kolwet)
read(5,10) (x(i),i=1,kolwet)
read(5,15) (numusl(i),i=1, kolusl)
read(5,10) (uusl(i),i=1, kolusl)
read(5,15) (nuvar(i),i=1,kolvar)
read(5,20) eps
read(5,20) tbas
5  format (3i10)
10 format (10(f8.3))
15 format (20(i4))
20 format (f8.4)

```

В цьому фрагменті прийняті імена означають наступне:

kolwet – кількість віток заступної схеми (комплексної схеми);

kolusl – кількість вузлів заступної схеми;

kolvar – кількість вузлів, напруги в яких будуть уточнюватись по ітераціях;

mat – матриця з'єднань заступної схеми вимірністю (kolwet*3), кожен рядок якої показує зв'язок чергової вітки з двома вузлами;

x – масив вимірністю kolwet відносних базисних опорів елементів заступної схеми;

numusl – масив вимірністю kolusl номерів вузлів заступної схеми;

uusl – масив вимірністю kolusl напруг (ЕРС) вузлів заступної схеми, відповідний numusl;

nuvar – масив вимірністю kolvar номерів вузлів, напруги в яких будуть уточнюватись по ітераціях;

eps – точність розрахунку, що задається користувачем;

tbas – базисний струм на ступені, де знаходиться задана точка пошкодження, кА.

Звернемося тепер до деякої заступної схеми, рис. 6.2.

На цьому рисунку позначені номери віток і вузлів, напрями струмів по вітках, їх відносний базисний опір і відносні базисні ЕРС активних елементів.

Точка трифазного короткого замикання знаходиться у вузлі 18. Базисний струм того ступеня напруги, на якому знаходиться точка пошкодження, дорівнює 9,2 кА. Все це дає можливість підготувати файл даних.

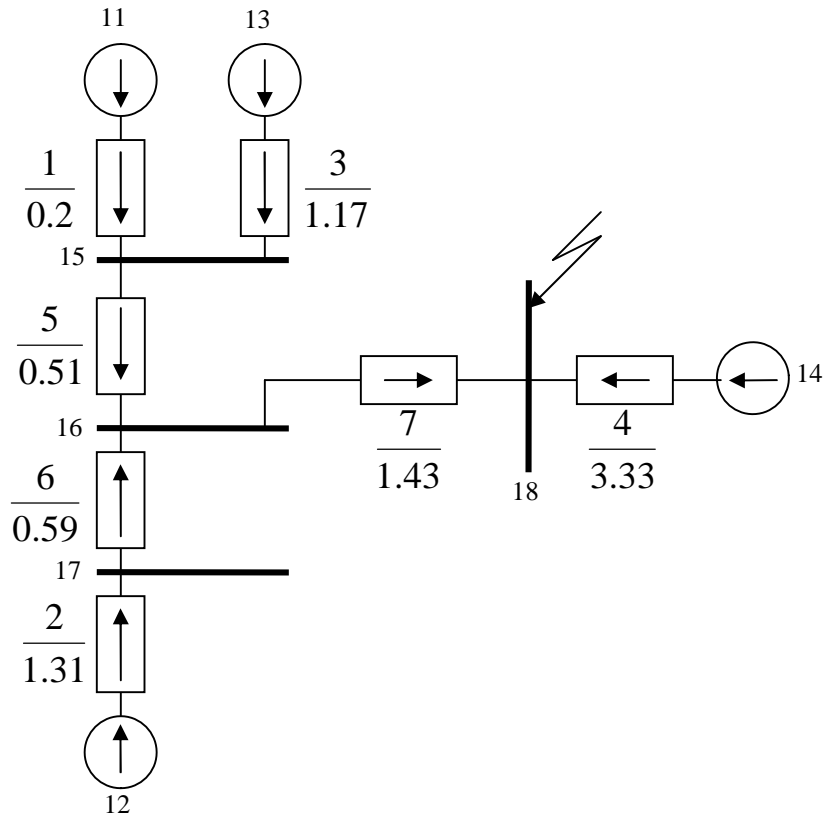


Рисунок 6.2 – Заступна схема для розрахунку струму короткого замикання

Нижче приведено роздрукування цього файлу, синтезованого в строгій відповідності з операторами READ програми TKZ. Читачу рекомендується уважно ознайомитися з ним, щоб збагнути технологічний процес постановки завдання на ЕОМ.

```

7          8          3
1          11         15
2          12         17
3          13         15
4          14         18
5          15         16
6          17         16
7          16         18
0.200     1.310     1.170     3.330     0.510     0.590     1.430
11 12    13 14    15 16    17 18
1.08     0.93     0.8      0.9      0.9      0.8      0.850     0.
15 16    17
0.01
9.2

```

Результати роботи програми за цими даними наведені в наступному лістингу, з якого видно, що програма ТКЗ виводить струми в точці пошкодження, струми по всіх вітках заступної схеми (від’ємні значення свідчать про неправильний вибір напрямів струмів) і напруги в усіх вузлах.

Лістинг розв’язку задачі розрахунку струмів трифазного короткого замикання

Розрахунок аварійного режиму прямої послідовності при короткому замиканні в схемі заміщення.

Розрахункова точка короткого замикання – вузол 18.

Надперехідний струм короткого замикання – 7.30 кА.

Ударний струм короткого замикання – 18.60 кА.

Струми в елементах заступної схеми, приведені до напруги точки пошкодження

номер вітки	вузол початку	вузол кінця	струм k_a
1	11	15	5.205
2	12	17	.867
3	13	15	-1.312
4	14	18	2.486
5	15	16	3.958
6	17	16	.922
7	16	18	4.809

Відносні номінальні напруги у вузлах заступної схеми при короткому замиканні у вузлі 18

номери вузлів	напруга (відсотки)
11	108.0000
12	93.0000
13	80.0000
14	90.0000
15	96.6838
16	74.7452
17	80.6583
18	.0000

З аналізу технології машинного розрахування аварійних режимів виходить, що трудомісткість ручної роботи вельми велика. Природно виникає питання про можливість її автоматизації. Принципово сьогодні на нього слід дати негативну відповідь, бо значна частина роботи носить творчий характер, який не формалізується. Проте деяка технічна частина

підготовчої роботи, наприклад, розрахування відносних базисних опорів і ЕРС цілком піддається автоматизації.

6.4 Сервісна програма SERVIS розрахування параметрів заступної схеми

Програма SERVIS призначена для розрахування відносних базисних опорів і ЕРС заступних схем при базисній потужності 100 МВА.

При довжинах масивів, що оголошені, граничні можливості програми такі:

- число ступенів напруг ≤ 10 ;
- число віток ≤ 150 ;
- число вузлів ≤ 150 .

Програма SERVIS написана на мові fortran-77.

Особливістю програми є те, що в зовнішньому файлі даних концентрується лише мінімальна інформація про заступну схему; решта інформації про технічні характеристики елементів енергосистем задається у формі фактичних параметрів підпрограм. Це значною мірою зменшує ймовірність помилок користувача.

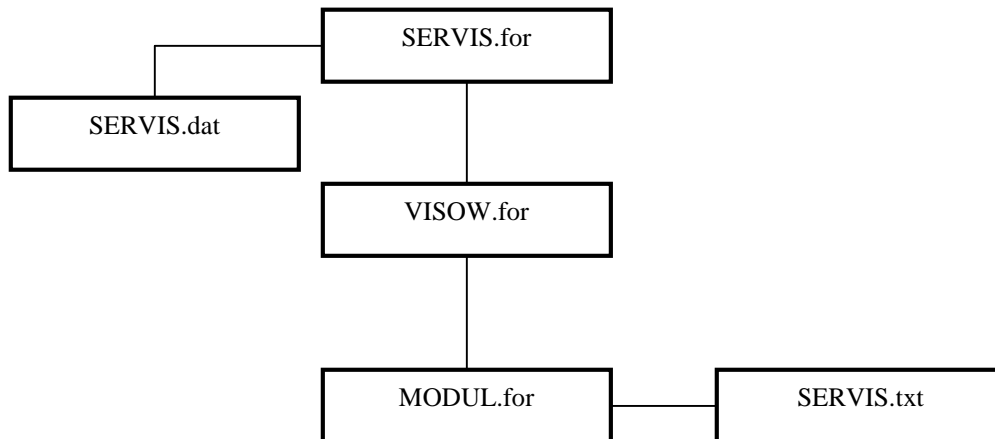
Основним блоком програми є програмний модуль MODUL.for, в якому зібрані 14 підпрограм. Їх значення видно з таблиці, табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Перелік підпрограм, які використовуються в програмному модулі MODUL.for

Ім'я підпрограми	Розрахування відносних базисних параметрів елементів енергосистем
GNR	Синхронні генератор, компенсатор, двигун
TR2	Двообмотковий трансформатор
TR3	Триобмотковий (авто) трансформатор
LIN1	Одноколова лінія
LIN2	Двоколова лінія
РЕАКТ1	Реактор (одиначний)
РЕАКТ2	Здвоєний реактор
AD	Асинхронний двигун
ON	Узагальнене навантаження
SYST1	Система, яка задана потужностями короткого замикання, МВА
SYST2	Система, яка задана струмами короткого замикання, кА
SYST3	Система, яка задана опорами, Ом
PRINT1	Виведення у файл вихідної інформації
PRINT2	Виведення результатів розрахунку у файл SERVIS.txt

В головному модулі `SERVIS.for` здійснюється введення інформації з зовнішнього файлу даних `SERVIS.dat` і звернення до єдиної підпрограми `WISOW.for`, яка готується самим користувачем, і в якій здійснюється виклик потрібних йому підпрограм з приведеної вище таблиці.

Отже, відбувається така взаємодія файлів:



Користувач самостійно готує зовнішній файл даних `SERVIS.dat` і підпрограму `WISOW.for`.

Файл даних `SERVIS.dat` містить зовнішню інформацію, склад і форма представлення якої, видно з наступного фрагмента головного модуля.

```

      read(5,5)kolst,kolwet,kolusl
5     format (3i10)
      read(5,10)(numusl(i),i=1,kolusl)
10    format (10i4)
      read(5,15)(ubas(i),i=1,kolst)
15    format (10f8.3)
  
```

В цих операторах:

`kolst` – кількість ступенів напруги в вихідній схемі;

`kolwet` – кількість віток заступної схеми;

`kolusl` – кількість вузлів заступної схеми;

`numusl` – одновимірний масив вимірністю `kolusl` номерів вузлів заступної схеми;

`ubas` – одновимірний масив розмірністю `kolst` базисних напруг (кВ) всіх ступенів напруги.

Нижче для ілюстрації приводиться зовнішній файл даних деякого тестового завдання.

```

8      115      28
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
  
```

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38		
220.000	10.520	110.000	18.180	35.000	38.500	120.989	11.000		

Ці дані користувач одержує зі схеми енергосистеми, що досліджується, і синтезованої ним самою заступною схемою (комплексною схемою). Необхідно знати, що на заступній схемі всі вітки і вузли повинні бути пронумеровані, причому вітки – починаючи з одиниці, а вузли – з будь-якого числа. Надалі номери повинні даватися підряд. Файл SERVIS.dat створюється в будь-якому редакторі і записується на свою дискету.

Підпрограма WISOW.for складається, в основному, з операторів call, які викликають потрібні підпрограми. Синтаксис цього оператора такий:

call ім'я підпрограми (параметр, параметр, ... , параметр).

Відповідно до правил мови fortran, на початку підпрограми містяться ключове слово subroutine, ім'я з формальними параметрами або без них, далі йде оголошення, далі – виконувані оператори, а в кінці – оператори return і end.

Підпрограма WISOW.for для деякого тестового завдання виглядає так:

```

DIMENSION
MAT(150,3),X(150),NUMUSL(150),UUSL(150),NUVAR(150),
*TOKWET(150),UVAR(150),TVAR(150),UBAS(10),TBAS(10)
COMMONMAT,X,NUMUSL,UUSL,NUVAR,TOKWET,UVAR,TVAR,
UBAS,TBAS,SBAS,
*KOLST,KOLWET,KOLUSL
call print1
call gnr(11,2,1,41,150.,10.5,0.89,0.26,0.39)
call gnr(12,2,2,42,150.,10.5,0.89,0.26,0.39)
call gnr(21,4,13,43,150.,18.18,0.89,0.195,0.232)
call gnr(22,4,14,44,150.,18.18,0.89,0.195,0.232)
call
tr3(1,7,5,18,45,46,22,47,48,21,49,50,100.,100,100,100,230.,
*121.,38.5,11.,18.,31.)
call tr3(1,8,6,26,51,52,28,53,54,30,55,56,60.,100,100,100,220.,
*38.5,11.,12.3,5.7,18.1)
call tr3(1,8,6,27,57,58,29,59,60,31,61,62,60.,100,100,100,220.,
*38.5,11.,12.3,5.7,18.1)
call tr3(1,3,5,8,63,64,113,114,115,24,67,68,247.5,100,100,100,
*242.,121.,38.5,10.5,28.,32.)
call
tr3(1,7,5,17,69,70,19,76,77,20,82,83,100.,100,100,100,230.,

```

```

*121.,38.5,11.,18.,31.)
  call ad(26,6,32,84,12.,38.5,0.89,9.,8.,0.8)
  call lin1(1,5,85,73,0.4,90.,3.0)
  call lin1(1,7,86,75,0.4,96.,3.0)
  call lin1(1,6,88,74,0.4,155.,3.0)
  call lin1(1,15,93,81,0.4,56.,3.5)
  call lin1(1,16,94,90,0.4,128.,3.5)
  call lin1(5,25,96,99,0.4,3.5,4.0)
  call tr2(2,3,97,71,100.,11.,12.)
  call tr2(2,4,98,72,100.,11.,12.)
  call tr2(4,11,100,79,400.,20.,10.5)
  call tr2(4,12,101,80,400.,20.,10.5)
  call reakt1(2,33,102,95,10.,10.,14.)
  call syst1(32,7,115.,23,24,25,1000.,100.)
  call syst2(33,7,115.,103,104,105,4.77,0.477)
  call syst3(34,7,115.,106,107,108,0.1,0.4,2.8)
  call reakt2(2,34,35,36,37,38,39,10.,10.,28.,0.6)
  call lin2(5,109,110,111,0.4,3.5,4.)
  call on(36,6,32,112,50.,35.,0.18,0.35)
  call on(20,3,10,113,731.7,115.,0.11,0.35)
  call print2
  return
  end

```

Отже, індивідуалізації підлягає лише набір операторів call.

Ключовим моментом технології освоєння програми SERVIS є вивчення формальних параметрів підпрограм, що викликаються, з метою безпомилкового заміщення їх фактичними параметрами, узгодженими з формальними за їх числом, типом і порядком проходження. Такі вимоги мови fortran і, якщо необхідно, читач повинен відновити цю інформацію з книжок.

Формальні параметри видно з першого рядка кожної підпрограми. Наприклад, для підпрограми GNR перший рядок такий:

```

SUBROUTINE
GNR(NUSLE,NUMST,NUMW1,NUMW2,PNOM,UNOM,COSF,
XONPR,*XONOB)

```

Видно, що тут 9 формальних параметрів, причому чотири перших параметри є цілими, а інші дійсними типами даних. Далі слід зрозуміти зміст формальних параметрів. Де:

NUSLE – порядковий номер вузла з ЕРС генератора;

NUMST – номер ступеня напруги, на якому знаходиться генератор;

NUMW1 – номер вітки генератора в заступній підсхемі прямої послідовності;

NUMW2 – номер вітки генератора в заступній підсхемі зворотної послідовності (за відсутності – 0);

PNOM – номінальна потужність генератора, МВт;

UNOM – номінальна напруга генератора, кВ;

COSF – номінальний коефіцієнт потужності генератора;

XONPR – відносний номінальний опір генератора для режиму прямої послідовності;

XONOBRR – відносний номінальний опір генератора для режиму зворотної послідовності.

З'ясувавши зміст формальних параметрів, слід знайти їх значення із заступної схеми і заданих технічних параметрів генератора та сформулювати оператори звернення CALL.

Аналогічним чином вивчаються всі підпрограми. На цьому етапі освоєння програмного продукту корисно знову звернутися до розгляду підпрограми WISOW.for, приведеної вище.

Підготувавши свою підпрограму WISOW.for, необхідно протранслювати її і одержати об'єктний модуль WISOW.obj. Об'єктні коди інших підпрограмних модулів – servis.obj та modul.obj вже підготовлені і читач може їх мати на своїй дискеті.

Всі об'єктні модулі – SERVIS.obj, WISOW.obj і MODUL.obj, які знаходяться на Вашій дискеті, необхідно обробити спільно редактором зв'язків і одержати програму SERVIS.exe, що виконується. Для цього, знаходячись в середовищі фортрану-77, потрібно ввести наступний командний рядок:

```
LINK a:servis+wisow+modul,servis,nul,,;
```

Результатом правильної роботи редактора зв'язків буде створений модуль SERVIS.exe, що виконується. Його можна направляти на виконання, якщо на цей час на Вашій дискеті вже знаходиться файл даних SERVIS.dat.

Результатом роботи програми SERVIS є масиви відносних базисних ЕРС активних елементів заступної схеми (комплексної схеми) і відносних базисних опорів всіх віток даної схеми. Вони вводяться у файл SERVIS.txt. Надалі користувач може їх використовувати для синтезу файлу даних основної програми ТКЗ.

6.5 Характеристика програми СТКЗ розрахування струмів короткого замикання

В деяких випадках нехтування активними опорами елементів енергосистеми і відмінністю фаз ЕРС живильних генераторів виявляється недопустимим. В таких випадках може бути використана програма СТКЗ,

що розвиває, розглянуту раніше, програму ТКZ на комплексний тип даних. Тому імена змінних тут мають той самий енергетичний зміст.

Послідовність і формати подання зовнішньої інформації для роботи програми СТКZ видно з наступного фрагмента:

```

dimension mat(100,3),numusl(100),eusl(100),
*nuvar(100),twet(100)
complex x(100), uusl(100),tokwet(100),uvar(100),
*tvar(100),tok,uqypq,ypq,deltok,up,ctokkz
read(5,5) kolwet,kolusl,kolvar
read(5,5) ((mat(i,j),j=1,3),i=1,kolwet)
read(5,10) (x(i),i=1,kolwet)
read(5,15) (numusl(i),i=1, kolusl)
read(5,10) (uusl(i),i=1, kolusl)
read(5,15) (nuvar(i),i=1,kolvar)
read(5,20) eps
read(5,20) tbas
5  format (3i10)
10 format (4(2f8.3))
15 format (20(i4))
20 format (f8.4)

```

Ілюстрацію роботи програми СТКZ зробимо на прикладі розділу 6.2. Топологію заступної схеми можна подивитися на рис. 6.2, а параметри заступної схеми – в роздруківці файлу даних, що приводиться нижче.

7	8	3						
1	11	15						
2	12	17						
3	13	15						
4	14	18						
5	15	16						
6	17	16						
7	16	18						
0.060	0.200	0.400	1.310	0.300	1.170	1.000	3.330	
0.020	0.510	0.030	0.590	0.300	1.430			
11	12	13	14	15	16	17	18	
1.08	0.000	0.930	0.000	0.8	0.0	0.9	0.	
0.9	0.000	0.8	0.0	0.850	0.	0.	0.	
15	16	17						
0.01								
9.2								

Результати розрахунку видно з наступного лістингу.

Розрахунок аварійного режиму прямої послідовності при короткому замиканні в заступній схемі:

Розрахункова точка короткого замикання – вузол 18.

Надперехідний струм короткого замикання – 7.09 кА.

Ударний струм короткого замикання – 18.09 кА.

Струми в елементах заступної схеми, приведені до напруги точки пошкодження

номер вітки	вузол початку	вузол кінця	комплекс струму, кА	струм к _а
1	11	15	1.009 + j(-4.988) .255 + j(-.797)	5.09
2	12	17	-.390 + j(1.197)	.84
3	13	15	.685 + j(-2.281)	-1.26
4	14	18	.616 + j(-3.859)	2.38
5	15	16	.253 + j(-.856)	3.91
6	17	16	.876 + j(-4.640)	.89
7	16	18		4.72

Відносні номінальні напруги у вузлах заступної схеми при короткому замиканні у вузлі 18

номери вузлів	напруга (відсотки)
11	108.0000
12	93.0000
13	80.0000
14	90.0000
15	96.5048
16	74.9863
17	80.5451
18	.0000

Завдання для самостійної роботи

1. Для схеми, рис 6.2, провести тестове розрахування режиму короткого замикання по першій ітерації за методом вузлових напруг, задавшись першим наближенням значень напруги у вузлах.

2. До прикладу 4 розділу 2 підготувати файл даних для автоматизованого розрахування параметрів заступної схеми аварійного режиму за допомогою програми SERVIS.

За зразком підготувати підпрограму WISOW.for та отримати її об'єктний модуль.

Одержати програму SERVIS.exe, що виконується, направити її на виконання та отримати результати розрахунку параметрів заступної схеми.

7 СУТЬ ПОНЯТТЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ І АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ СТІЙКОСТІ

7.1 Стійкість електричних систем як прояв загального поняття стійкості динамічних систем

Поняття стійкості електричних систем і, пов'язані з ним, уявлення про порушення стійкості, розрахунки стійкості, критерії стійкості відіграють ключову роль в підготовці інженерів, що забезпечують надійність роботи електричних систем і систем електропостачання.

Традиційний виклад поняття стійкості електричних систем як здатності їх зберігати параметри режимів у вузлових точках в нормальних межах при випадкових збуреннях режиму, спирається на практику порушення стійкості енергосистем в США, Німеччини і колишнього СРСР в довоєнний період [9, 10]. Цим справедливо підкреслюється важливість даного явища. Проте такий підхід, коли поняття стійкості в електроенергетиці вводиться поза зв'язком з аналогічними явищами в навколишньому світі, створює у інженерів і студентів помилкову думку про те, що воно властиве виключно електричним системам. У пізніших роботах, наприклад, в [8], вже з'являються погляди на спільність критеріїв стійкості, але не про спільність самих явищ стійкості. Це теж не вирішує задачі цілісного уявленні про явище стійкості динамічних систем в природі і суспільстві.

А тим часом, явище стійкості виявляється в будь-яких динамічних системах:

- механічних (стійкість конструкцій, стійкість суден)
- біологічних (стійкість популяцій одного вигляду)
- економічних (стійкість економіки країни, цін, ринкового попиту)
- соціальних (стійкість особи, громадської думки)
- військово-політичних (стійкість в моделі гонки озброєнь

Річардсона, моделі ракетно-ядерної війни Інтрилигейтора, моделі наслідків ядерної війни Мойсеєвого і т.д. [15 – 18].

У цих і інших динамічних системах *в поняття стійкості вкладається здатність системи повертатися з різних початкових станів до певного рівноважного, стаціонарного стану.*

Вагомим підтвердженням спільності поняття стійкості динамічних систем є математична теорія О. М. Ляпунова про стійкість руху, перші наукові роботи з якої зв'явилися в 1892 році. Відмітимо, що до цього часу електричні системи тільки почали створюватися і проблема стійкості для них навіть не зазначалася.

Як наслідок вчення Ляпунова, з'явилися різні критерії стійкості для оцінки поведінки систем без розв'язування систем диференціальних рівнянь – Рауса, Гурвиця, Михайлова, Найквіста, Попова, Льєнара-

Шипара, Д-розбиття. Разом з ними при дослідженні стійкості електричних систем використовуються і, так звані, практичні критерії стійкості, які є похідними від деяких режимних параметрів по “сумнівних” координатах. Але весь цей інструментарій є, по суті, спрощеним віддзеркаленням теорії стійкості за Ляпуновим, згідно з якою *будь-який розв’язок $\eta(t)$ системи диференціальних рівнянь буде стійким, якщо достатньо близькі до нього в будь-який початковий момент часу рішення $y(t)$ цілком занурюються в скільки завгодно вузьку ε -трубку, побудовану навколо рішення $\eta(t)$* .

Розуміння того, що стійкість електричних систем лише частковий прояв загального поняття стійкості в природі і суспільстві, дозволить інженерам-електрикам правильніше сприймати те, що нас оточує цілісний і неподільний світ.

7.2 Короткий екскурс в розвиток науки про стійкість електричних систем

Перші дослідження у галузі стійкості електричних систем були викликані потребою практики США і відносяться до початку 20-х років минулого сторіччя. Це було пов’язано з освоєнням все більш високих напруг, об’єднанням мереж, передаванням енергії на досить великі відстані, які в сукупності наблизили економічну межу потужності, що передається, до технічно можливої. У США мали місце ряд випадків втрати стійкості, чим і визначилася актуальність проблеми.

При попередньому вивченні стійкості паралельної роботи, головна увага приділялась лініям передач. Проте подальший, детальніший аналіз показав, що таке ж істотне значення (а іноді і більше) мають електричні і механічні властивості генераторів та синхронних компенсаторів, механічні властивості первинних двигунів, характеристики системи збудження, регуляторів напруги, швидкодія релейного захисту, регуляторів первинних двигунів, електричні навантаження і т.д. Через таку кількість впливаючих чинників проблема стійкості електричних систем, при їх розгляді як єдиного цілого всіх їх елементів, яка здавалася спочатку простою, насправді виявилась дуже складною і багатогранною.

Авторами перших досліджень стійкості електричних систем були вчені США: В.Буш, Р.Бутц, Б.Робертсон, Р.Догерті, Е.Кларк, К.Найкл, Р.Рюденберг, Ф.Лонглей, Р.Парк. Останній в 1928 році запропонував відомі диференціальні рівняння синхронної машини.

Дещо пізніше цією проблемою почали займатися в Німеччині і колишньому СРСР. Можна було передбачати, що для нашої країни з величезними відстанями і можливими дальніми передачами, проблема стійкості також буде актуальною. І дійсно, в наших перших системах Мосенерго і Лененерго мали місце ряд випадків порушення стійкості. Так, в системі Мосенерго, за період з 1932 по 1934 р. відбулося 20 випадків

порушення синхронізму. За цей же період в системі Лененерго було 18 аварій, пов'язаних з розладом паралельної роботи.

До цього часу належать дослідження учених нашої країни (Л.І. Сиротинський, В.П. Хащинський, Н.Н. Щедрін, Н.М. Крилов, Н.Н. Боголюбов). Але особливо помітним явищем була монографія С.А. Лебедева і П.С. Жданова “Стійкість паралельної роботи електричних систем”, яка видана в 1934 р. [10], де сконцентрований світовий досвід аналізу перехідних режимів систем. В 1935 р. Горєв О.О. створив свої рівняння, аналогічні рівнянням Р.Парка, і вивів критерії стійкості орієнтуючись на метод малих коливань подібно до відомої роботи О.М. Ляпунова, який розглянув в 1892 р. загальну задачу про стійкість руху. Надалі інтенсивні роботи вели П.С. Жданов, І.М. Маркович, І.С. Брук, С.А. Совалов. Останні, разом з Марковичем, запропонували практичний критерій перевірки стійкості $\frac{d\Delta Q}{dU}$ і дали вичерпне пояснення ряду інших практичних критеріїв ($\frac{dP}{d\delta}$, $\frac{dE}{dU}$, і т. д.). В цей час була виявлена природа лавини напруги (П.С. Жданов, К.А. Смирнов) і стійкості навантаження (П.С. Жданов, Д.І. Азарьєв). До 1940 р. почали виявляти увагу до можливостей АРЗ (І.А. Сиримятников) і швидкого його впровадження в систему як засобу поліпшення стійкості. Доведена можливість режиму штучної стійкості, обумовленої дією регулятора (С.А. Лебедев). Цікаво, що аналогічні за спрямованістю роботи за кордоном (В. Фрей, К. Лаванши, Ч. Конкордія, Г. Крон) з'явилися значно пізніше.

Подальшим розвитком цих робіт було створення компаундування генераторів (Л.В. Цукерник) і системи “сильного” збудження, що включає додаткове регулювання за першою і другою похідними режимних параметрів (Г.Д. Герценберг, М.М. Ботвінник, В.А. Веніков, М.В. Меєров, А.І. Глебов), які відносяться до 1950-55 років. Випробування сильного регулювання на Волжській ГЕС, що реагує на відхилення напруги і на першу та другу похідні струму, показали, що застосування таких регуляторів різко підвищує статичну стійкість генераторів відправного кінця передачі, і дозволяє його визначати виходячи з постійності напруги на шинах вищої напруги відправного кінця. Застосування сильного регулювання поставило ряд серйозних питань, в т.ч. питання саморозгойдування через неправильну побудову регуляторів і поведінку системи у межі стійкості. Вирішення цих питань розглянуто в роботах І.В. Літкенс, Г.В. Міхневича, О.В. Щербачова, М.Л. Ливинштейна та ін. учених.

Спеціально аналізувалася стійкість систем з дальніми електропередачами (О.О. Горєв, П.С. Жданов, А.А. Вулф, Р.Рюдєнберг, І.Кимбарк, Е.Кларк), а пізніше колективом СибНДІЕ під керівництвом професора В.К. Щербакова. Останнім часом аналізуються, так звані,

особливі режими, що виявляються у вигляді самозбудження, саморозгойдування, асинхронного ходу синхронних машин і ресинхронізації (П.С. Жданов, І.А. Сиромятников, Л.Д. Маміконянц, М.Н. Щедрін, Д.А. Городський, Н.Д. Анісімова, А.І. Долгинов, А.А. Хачатуров та ін.).

Досить важливим є підкреслити наступне. Розвиток теорії і практики поліпшення стійкості в системах колишнього СРСР і за кордоном був значною мірою відмінним. У наших системах поліпшення стійкості і якості перехідних процесів досягалося не тільки підвищенням напруги електропередач і змінами параметрів елементів систем, але і режимними заходами, до яких відносяться автоматичне розвантаження електричних систем, синхронне і несинхронне АПВ, АРЗ і його форсування, застосування асинхронного ходу, забезпечення умов результуючої стійкості, ділення систем на несинхронні працюючі частини і т.д. В закордонних системах (США та ін.) більша увага приділялася посиленню зв'язків, резервуванню і проведенню інших капіталомістких заходів при меншій, ніж у нас, увазі до режимних заходів. Недостатнє їх застосування стало однією з важливих причин виникнення в системах США ряду важких аварій, зокрема в Нью-Йоркській системі 9 листопада 1965 року.

7.3 Терміни і визначення, які відносяться до розрахування режимів електричних систем

В галузі термінології науки про перехідні процеси до теперішнього часу склався стан, при якому майже відсутні різночитання, принаймні в частині ключових понять і визначень. У цьому розділі в дуже короткій формі наведемо деякі з них.

Електрична система – це умовно виділена частина енергетичної системи, в якій генерується, перетворюється, транспортується і споживається електрична енергія. Найважливішим поняттям для неї є режим.

Режимом електричної системи називається її стан в будь-який момент часу або на деякому інтервалі часу, який визначається множиною різних процесів і залежить від схеми з'єднань елементів системи. Кількісно режим характеризується параметрами режиму.

Параметри режиму – це значення потужностей, напруг, струмів, частоти, кутів зсуву векторів ЕРС, напруг, струмів і інших фізичних змінних, що характеризують процес генерації, перетворення, передачі і споживання електричної енергії. Параметри режиму зв'язані між собою через параметри системи.

Параметри електричної системи – це значення повних, активних і реактивних опорів елементів, їх провідностей, власних і взаємних опорів, коефіцієнтів трансформації та ін., які визначаються фізичними

властивостями елементів, схемою їх з'єднань і рядом допущень розрахункового характеру.

Більшість дослідників розрізняють два види режимів – сталі і перехідні. Деякі дослідники додатково виділяють, так звані, особливі режими.

Сталий режим характеризується дуже повільними і нерегулярними змінами параметрів режиму, настільки малими, що їх можна практично вважати незмінними.

Перехідний режим системи характеризується швидкою зміною в часі його параметрів, викликаних будь-якими причинами, які називають збурюючими діями. Останні створюють збурення режимів.

Розрізняють наступні види режимів з погляду величини параметрів:

- *нормальні сталі, при яких величини параметрів режиму близькі до значень, які необхідні для роботи споживачів;*

- *нормальні перехідні, які виникають при звичайних для експлуатації змінах схеми системи: ці режими характеризуються відносно швидкими і різкими змінами параметрів режиму для окремих віток системи, параметри вузлових точок системи при цьому мало змінюються;*

- *аварійні перехідні режими, при яких внаслідок аварійних змін в схемі системи величини всіх параметрів режиму, в тому числі і параметрів режиму вузлових точок, різко відхиляються від встановлених значень;*

- *післяаварійні сталі режими, які наступають після аварійного вимкнення одного або ряду елементів. Параметри режиму вузлових точок при цьому можуть бути близькими до параметрів нормального режиму і тоді результат аварії вважається благополучним. Якщо ж параметри режиму вузлів різко розходяться з параметрами нормального режиму – результат аварії кваліфікується як неблагополучний.*

Отже, режим системи відомий, якщо відомі всі параметри режиму для окремих вузлових точок і віток системи.

Режими електричних систем – нормальні і перехідні – повинні відповідати певним вимогам. Для нормальних режимів вони такі:

- *якість електроенергії у її приймачів;*
- *надійність електропостачання споживачів;*
- *економічність.*

Для перехідних режимів вимоги стисло можна сформулювати так:

- *здійсненність бажаного режиму після закінчення перехідного процесу;*

- *стійкість нового сталого режиму;*
- *задовільна якість перехідного процесу;*
- *економічність заходів, спрямованих на потрібний перебіг перехідного процесу.*

Тепер зупинимося на термінах і визначеннях, що безпосередньо відносяться до стійкості електричних систем. Розрізняють статичну, динамічну і результуючу стійкість.

Статична стійкість (стійкість в “малому”) – це здатність електричної системи повертатися до сталого стану після малих його збурень. Останні можуть виявлятися у формі відхилень кутів, напруг і т.д. від їх значень, які відповідають положенню рівноваги.

Порушення статичної стійкості може виявлятися в цілому для електричної системи або для її частини (електропередачі, вузла навантаження і т. д.) і приймати різні форми. У зв'язку з цим, розрізняють *аперіодичне порушення (“текучість”, “сповзання”)*, при якому відхилення режимних параметрів змінюються монотонно; *коливальне порушення (саморозгойдування)*, для якого характерні періодичні зміни режимних параметрів.

Специфічними випадками порушення статичної стійкості, які одержали особливі найменування, є:

- *“лавина напруги”* – аперіодичне порушення стійкості, що полягає в лавиноподібному зниженні напруги в електричній системі в цілому або окремих її частинах (вузлах навантаження) внаслідок порушення балансу реактивної потужності;

- *“лавина частоти”* – аперіодичне порушення стійкості, що полягає в лавиноподібному зниженні частоти в електричній системі або в її частинах, що відокремилися, внаслідок порушення балансу активної потужності;

- *самозбудження (синхронне або асинхронне)* – вид електромагнітної нестійкості в електричній системі, яка має значні ємнісні елементи (послідовні і (або) паралельні), що виявляється в аперіодичному або періодичному зростанні напруг і струмів у всій системі або окремих її елементах внаслідок параметричного резонансу в контурах;

- *саморозгойдування* – вид електромеханічної періодичної нестійкості системи при малих навантаженнях і великих активних опорах елементів, коли ротор синхронної машини здійснює самовільні коливання, які закінчуються або випаданням машини з синхронізму, або встановленням будь-якого граничного циклу гойдань, що перешкоджають нормальній роботі електричної системи.

Динамічна стійкість (стійкість в “великому”) – це здатність електричної системи без переходу в асинхронний режим повертатися до сталого режиму після значних його збурень (короткі замикання, вимкнення генераторів, навантаження, робота АПВ і т. д.); післяаварійний сталий режим може бути відмінним від початкового, але повинен бути статично стійким.

Результуюча стійкість – це здатність електричної системи в результаті порушення її статичної або динамічної стійкості

відновлювати синхронну роботу після деякого періоду асинхронного ходу, тобто, здатність до ресинхронізації.

7.4 Шляхи автоматизації розрахування стійкості електричних систем

Разом зі становленням науки про стійкість систем електроенергетики дослідники постійно шукали шляхи автоматизації розрахунків зважаючи на їх складність і трудомісткість.

Прості засоби автоматизації можуть реалізувати лише спрощені розрахунки, наприклад, методом аналогій або оцінки за практичними критеріями стійкості.

За методом аналогій простим перерахуванням параметрів на основі теорії подібності дану задачу зводять до іншої, оцінка стійкості якої вже є.

Практичні критерії для аналізу статичної стійкості за “текучістю” або “сповзанням” параметрів режиму ґрунтуються на рівності нулю вільного члена характеристичного рівняння або за знаком похідних від деяких режимних параметрів (активної або реактивної потужності і ін.) за сумнівними координатами (кута, напруги і т. д.).

Практичні критерії розрахування динамічної і результируючої стійкості ґрунтуються на методі площ, методі аналогії і на оцінці переходу ковзання під час асинхронного ходу через нуль.

Прості методи і прості засоби оцінювання стійкості виправдовуються, якщо вони показують, що стійкість забезпечується з великим запасом. Інакше використовуються більш довершені методи і засоби розрахунку.

Значним кроком у галузі автоматизації розрахунків стійкості було використання статичних моделей (розрахункових столів змінного струму), на яких статична стійкість перевірялася на основі практичних критеріїв, а динамічна – на основі методу послідовних інтервалів. Зрозуміло, що в даний час розрахункові столи – це лише дань і спогади історії.

Подальшим розвитком ідеї автоматизації розрахунків стійкості були аналогові обчислювальні машини (АОМ). Їх здатність розв’язувати системи нелінійних диференціальних рівнянь виявилася досить цінною для аналізу стійкості електричних систем незначної складності і дослідження впливу на стійкість різних засобів автоматики.

Пізніше були спроби використання гібридних обчислювальних машин (ГОМ), що поєднують переваги АОМ і зменшують їх недоліки в спеціальних цифрових обчислювальних блоках.

Значні зміни в розрахунки стійкості електричних систем внесли сучасні ЕОМ, перші застосування яких були здійснені в США на початку шестидесятих років [20]. Вони дали вражаючі, для свого часу, результати

прискорення розрахунку: на ЕОМ IBM-704 для системи з 16 генераторами, 71 системою шин і 89 лініями розрахування стійкості за повними рівняннями Парка-Горєва було виконано за 16 хвилин!

З того і по теперішній час навчальні, проектні, експлуатаційні і дослідницькі розрахунки стійкості виконуються виключно на основі комп'ютерних технологій. Розроблені і удосконалюються безліч програм розрахування стійкості, які відрізняються реалізованими методами, алгоритмами, типами ЕОМ, для яких вони створені, і граничною складністю системи, що розраховується.

Для прикладу розглянемо деякі відомі програми розрахування динамічної стійкості Інституту Електродинаміки (ІЕД) АН України.

1. Програма IV-2 створена спочатку для ЕЦОМ "Урал-2".

Ця програма призначена для аналізу систем, в яких число вузлів $20 \div 60$; з них, що генерують $20 \div 40$. У цій програмі розрахунок виконується за спрощеними рівняннями Парка-Горєва (так званим, рівнянням Лебедева-Жданова) з врахуванням АРЗ. Розрахування за цими рівняннями ведеться на основі методів послідовних інтервалів. Потужність турбін приймається постійною. Можуть бути враховані АРЗ нормальної або сильної дії, а також динамічні характеристики навантаження і різні пристрої протиаварійної автоматики.

Разом з цією програмою використовуються дві – програма розрахування сталого режиму (який передуює аварійному) I-6a і програма розрахування аварійних шунтів несиметричних коротких замикань III-1.

2. Програма IV-3 (використовується разом з I-6a і III-1) для уточненого розрахування електромеханічного перехідного процесу в складних системах.

Параметри схеми: число вузлів $35 \div 50$ з них, що генерують $10 \div 15$.

Програма дає можливість розрахувати уточнений перехідний процес тривалістю декілька секунд. Разом з рівняннями Лебедева-Жданова можуть використовуватися також рівняння Парка-Горєва, які інтегруються методом Рунге-Кутта. Враховується магнітне насичення, АРЗ, АРШ турбін, динамічні характеристики навантаження і протиаварійна автоматика.

3. Програма УДАР-2, призначена для розрахування дуже складної системи з великим числом вузлів.

Загальний підхід при розрахунках на ЕОМ статичної стійкості полягає в тому, що зробивши розрахування нормального струморозподілу, користуються надалі програмами розрахунку динамічної стійкості, за якими виконується розрахування перехідного процесу після невеликого збурення. Вважається за доцільне давати невелике імпульсне збільшення моменту турбіни, при якому кут збільшується не більше, ніж на 5° .

Генератор, на якому задається імпульс, вибирають так, щоб викликати коливання кута саме в тих лініях, стійкість яких викликає сумніви.

Якщо в результаті прикладання імпульсу система після декількох коливань повертається до попереднього стану, то це означає, що даний режим статично стійкий.

Серед вітчизняних програм розрахунку статичної стійкості, відзначимо програми ІЕД АН України.

Програма XII-1у дає можливість розрахувати серію режимів, параметрів режимів, що відрізняються зміною, в будь-яких вузлах системи. Передбачені:

- зміна генерації в заданих вузлах з індивідуальним кроком зміни потужностей кожного генератора;
- зміна навантаження у вузлах з пропорційним віднесенням цього навантаження між заданими вузлами;
- пропорційна зміна рівня напруг в контрольних вузлах.

Ця програма виконується з програмою І-ба розрахування нормального режиму (НР).

Як було відмічено, методичні питання завдання розрахунку НР досліджувалися і розроблялися, в основному, на першому етапі впровадження в умовах обмежених можливостей обчислювальної техніки за пам'яттю ЕОМ і їх швидкодією. Тому при розробці програм головна увага приділялася подоланню цих труднощів. В той же час ряд особливостей математичних моделей задачі розрахування НР залишаються дослідженими не достатньо і по них не сформовані рекомендації для типового застосування. Головні з них такі:

- проблема призначення і вибору балансуєчого вузла, вплив на розрахунок визначення базисного вузла;
- вибір необхідної точності розрахунку НР;
- однозначність, можливість застосування показників збіжності для граничних режимів (типові рекомендації);
- вплив дії регулювальних пристроїв електростанцій на результати розрахунків поточкорозподілу і меж потужності та визначення необхідності уточнення існуючих моделей генераторних вузлів;
- оцінка ступеня впливу врахування в розрахунках статичних характеристик навантаження (СХН) і необхідної точності їх подання;
- необхідність формалізації і розробки функціональних моделей проведення розрахунків НР та обробки їх результатів, що імітують роботу технолога і ін.

В кінці цього розділу приведемо таблицю, в якій наведено деякий перелік програм розрахування стійкості, що використовуються в даний час диспетчерськими підрозділами енергосистем.

Таблиця 7.1 – Інформація про програми розрахування стійкості, що використовуються диспетчерськими службами

Ім'я програми	Організація-розробник	Система, програми	Обсяг схеми
RASTR	«УПІ-енерго»	DOS, Си	1000 вузлів 2000 віток
Б-6	НТЦ «ГООЦ Енергетики»	DOS, Си	1000 вузлів 2000 віток
КУРС	ІДУ ЄЕС РФ	DOS, Фортран	2000 вузлів 3500 віток
MUSTANG	ДЦ «Балтії»	DOS, Си	2000 вузлів 3500 віток
ПВК СДО-6	ІСЕМ СО РАН	DOS, Фортран	600 вузлів 1000 віток

Детальний і критичний опис цих програм приводиться в [21].

Завдання для самостійної роботи

1. В чому полягає сутність явища стійкості системи та як воно проявляється в електроенергетичній системі?

Наведіть власний приклад явища стійкості для будь-якої динамічної системи. Які збурення (за фізичною природою) можуть призвести до втрати стійкості цієї системи?

2. Статична, динамічна та результуюча стійкості. Які спільні риси є в цих явищах та які відмінності?

3. Комп'ютерні програми розрахування стійкості електричних режимів, невирішені труднощі та можливості програм.

8 ПРОСТІ РОЗРАХУНКИ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ

8.1 Розрахунки, що базуються на використанні практичних критеріїв

Як наголошувалося раніше, порушення статичної стійкості нерідко має аперіодичний характер, для якого властивий самовільний неконтрольований відхід параметрів режиму від сталих значень. Перевірку цього факту можна проводити за практичними критеріями.

Практичні критерії дозволяють судити про стійкість системи тільки за відсутності можливості саморозгойдування, тоді, як інші способи розрахунку дають можливість встановити і коливальну нестійкість.

В процесі роботи в електричній системі відбуваються певні зміни режиму. Можливо, що при цьому режим наблизатиметься до граничного за статичною стійкістю. Такий стан називається погіршенням або обважненням режиму. Тому повинен бути забезпечений запас статичної стійкості.

Запас статичної стійкості є кількісною мірою обважнення режиму, що перевіряється, до порушення його статичної стійкості. Величина запасу статичної стійкості може контролюватися величинами кутів зсуву роторів генераторів або, що те ж саме, активних потужностей, які передаються, а також напругами у вузлах системи. Запас стійкості за напругою

$$K_{зU} = \frac{U_n - U_{кр}}{U_n} \cdot 100 \%,$$

в нормальному режимі повинен бути не менше 10 %.

Критична напруга $U_{кр}$, що входить до виразу коефіцієнта запасу, це напруга, при якій відбувається порушення статичної стійкості у формі текучості або сповзання параметрів режиму чи перекидання навантаження.

Запас стійкості за активною потужністю

$$K_{зP} = \frac{P_{кр} - P}{P} \cdot 100 \%,$$

в нормальному режимі повинен бути не менше 20 %, а в короткочасному післяаварійному режимі – не менше 8 %.

Гранична потужність, що передається, $P_{кр}$, яка входить до виразу коефіцієнта запасу, є потужність, при якій відбувається порушення статичної стійкості. Вона повинна визначатися з врахуванням дії автоматичних пристроїв.

Практичні критерії є нерівностями вигляду $\frac{dA}{dB} \geq C$, в лівій частині яких знаходяться похідні від деяких режимних параметрів A по “сумнівних” координатах B . Граничні співвідношення (на межі стійкості)

набувають вигляду рівностей, де $C \in (0; \pm \infty)$. Практичні критерії мають взаємозв'язок із умовами статичної стійкості і за відсутності саморозгойдування в системі відповідають позитивності знака вільного члена характеристичного рівняння.

КРИТЕРІЙ $\frac{dP}{d\delta} > 0$ (граничне співвідношення $\frac{dP}{d\delta} = 0$) застосовується

для перевірки стійкості станції, яка працює через електропередачу на шини незмінної напруги, або для випадку роботи двох станцій сумірної потужності, розділених електропередачею, на загальне навантаження. У цьому критерії:

P – гальмівна електромагнітна потужність станції;

δ – кут зсуву ротора станції стосовно вектора незмінної напруги (у другому випадку - взаємний кут між роторами двох станцій).

Фізично похідна характеризує реакцію генератора на збільшення кута δ . При позитивному її знаку випадковому зростанню кута відповідає збільшення активної потужності генератора, яке має гальмівну дію, і повертає кут δ до початкового значення. А це і забезпечує стійкість режиму.

ПРИКЛАД 8.1 У системі “станція – система $U = \text{const}$ ” (рис. 8.1) визначити запас статичної стійкості, виходячи з постійності синхронної ЕРС генератора.

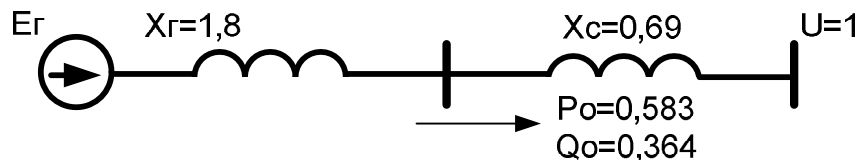


Рисунок 8.1 – Схема найпростішої електропередачі

ЗВЕДЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

$$E_{\Gamma} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 x_{\Sigma}}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_{\Sigma}}{U} \right)^2}, \quad (8.1)$$

де E_{Γ} – ЕРС передавальної станції;

U – напруга приймального кінця;

P_0, Q_0 – активна і реактивна потужності, що передаються;

x_{Σ} – результуючий опір;

$$P = \frac{E_{\Gamma} U}{x_{\Sigma}} \sin \delta, \quad (8.2)$$

$$P_m = \frac{E_r U}{x_\Sigma}, \quad (8.3)$$

де P_m – амплітуда кутової характеристики;

$$K_{3p} = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100, \%$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Результуючий опір:

$$x_\Sigma = x_r + x_c = 1,8 + 0,69 = 2,49.$$

Синхронна ЕРС передавальної станції:

$$E_r = \sqrt{\left(U + \frac{Q_0 x_\Sigma}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x_\Sigma}{U}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,364 \cdot 2,49}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,583 \cdot 2,49}{1}\right)^2} = 2,4.$$

Амплітуда потужності:

$$P_m = \frac{E_r U}{x_\Sigma} = \frac{2,4 \cdot 1}{2,49} = 0,963.$$

Коефіцієнт запасу:

$$K_{3p} = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100 = \frac{0,963 - 0,583}{0,583} \cdot 100 = 65,2 \%$$

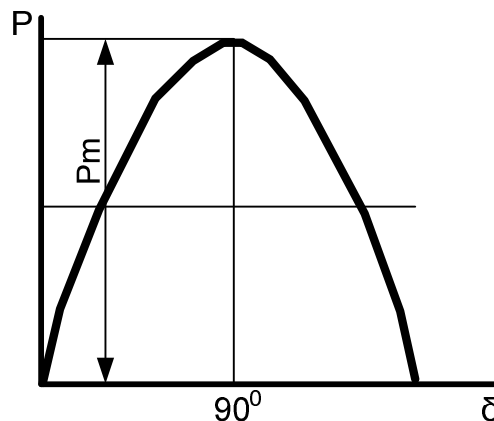


Рисунок 8.2 – Графічна інтерпретація розв'язку прикладу 8.1

ПРИКЛАД 8.2. В системі “дві станції – навантаження” (рис. 8.3) визначити запас статичної стійкості, виходячи з постійності перехідних ЕРС генераторних станцій і постійності опору навантаження.

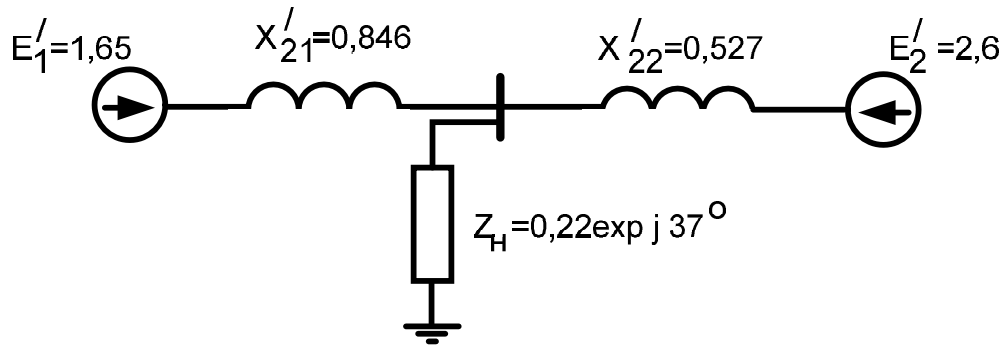


Рисунок 8.3 – Схема системи “дві станції – навантаження”

ЗВЕДЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

$$Z_H = \frac{U^2}{S_H} (\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (8.4)$$

де S_H – повна потужність навантаження;

φ – кут зсуву фаз навантаження.

$$P_1 = E_1 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}), \quad (8.5)$$

де y_{11} , y_{12} – відповідно, власна і взаємна провідності;

α_{11} , α_{12} – додаткові до 90° кути власних і взаємних опорів;

$$P_m = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 y_{12}. \quad (8.6)$$

РОЗВ’ЯЗУВАННЯ

Власні опір і провідність:

$$Z_{11} = jx'_{21} + \frac{jx'_{21}z_H}{jx'_{22} + z_H} = j0,846 + \frac{j0,527 \cdot 0,22 \exp j37^\circ}{j0,527 + 0,22 \exp j37^\circ} = 0,98 \exp j84^\circ;$$

$$y_{11} = 1,02; \alpha_{11} = 6^\circ.$$

Взаємні опір і провідність:

$$Z_{12} = jx'_{21} + jx'_{22} + \frac{jx'_{21}jx'_{22}}{z_H} = 0,846 + 0,527 - \frac{0,846 \cdot 0,527}{0,22 \exp j37^\circ} = 3,05 \exp j122^\circ;$$

$$y_{12} = 0,328; \alpha_{12} = -32^\circ.$$

Амплітуда потужності:

$$P_m = (E_1')^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_1' E_2' y_{12} = 1,65^2 \cdot 1,02 \sin 6^\circ + 1,65 \cdot 2,6 \cdot 0,328 = 1,708.$$

Коефіцієнт запасу:

$$K_{зр} = \frac{P_m - P_1}{P_1} \cdot 100 = \frac{1,708 - 1,000}{1,000} = 70,8 \%$$

КРИТЕРІЙ $\frac{d\Delta Q}{dU} < 0$ (граничне співвідношення $\frac{d\Delta Q}{dU} = 0$)

застосовується для перевірки стійкості в концентрованих електричних системах, які не мають дальніх електропередач і де “сумнівною” координатою при порушенні стійкості є напруга.

Фізично цей критерій характеризує реакцію системи на зниження напруги в заданій вузловій точці. Величина ΔQ є різницею між реактивною потужністю, яка генерується Q_g , і яка споживається навантаженням Q_n :

$$\Delta Q = Q_g - Q_n.$$

Похідна $\frac{d\Delta Q}{dU}$ при від’ємному її знаку дає величину додаткового реактивного навантаження в даній точці системи, яке викликає зниження напруги в ній на одиницю. Зрозуміло, що чим більша абсолютна величина $\frac{d\Delta Q}{dU}$, тим стійкіша напруга в даному вузлі. При зменшенні абсолютної величини $\frac{d\Delta Q}{dU}$ потрібні все менші і менші додаткові навантаження для пониження напруги у вузловій точці на одиницю і, нарешті, при наближенні величини $\frac{d\Delta Q}{dU}$ до нуля можливе неконтрольоване сповзання напруги.

Отже, в цьому критерії прикладання малого додаткового реактивного навантаження в заданому вузлі розглядається як мале збурення, а пониження напруги – як його наслідок.

При практичному використанні цього критерію знак похідної $\frac{d\Delta Q}{dU}$ повинен перевірятися, починаючи з наперед відомого стійкого режиму. За результатами поступового його обважнення будується крива надмірної потужності ΔQ в широкому діапазоні напруг і потім виділяється критична напруга.

ПРИКЛАД 8.3 У концентрованій системі, рис. 8.4, яка подана своїми еквівалентними параметрами за деяких базисних умов, визначити запас стійкості за напругою, розглядаючи навантаження за його статичними характеристикам.

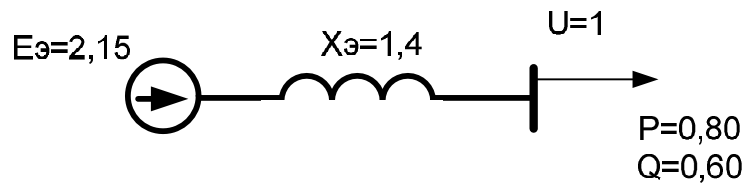


Рисунок 8.4 – Схема електричної системи

ЗВЕДЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

Статичні характеристики комплексного навантаження за напругою, табл. 8.1:

Таблиця 8.1 – Залежності $P^*(U^*)$ та $Q^*(U^*)$ комплексного навантаження

U^*	1,001	0,900	0,800	0,700
P^*	1,000	0,941	0,893	0,855
Q^*	1,000	0,885	0,844	0,880

$$Q_{Г_i} = \sqrt{\left(\frac{E_i U}{x_i}\right)^2 - P_i^2} - \frac{U^2}{x_i}, \quad (8.7)$$

де $Q_{Г_i}$ – реактивна потужність i -го генератора у вузлі навантаження;

E_i – ЕРС i -го генератора;

P_i – активна потужність i -го генератора;

x_i – взаємний опір вітки i -го генератора.

$$Q_{Г_i} = \frac{E_i U}{x_i} \cos \delta_i - \frac{U^2}{x_i}, \quad (8.8)$$

(вирази (8.7) і (8.8) тотожні).

$$\Delta Q = Q_{Г} - Q_{н}, \quad (8.9)$$

де $Q_{н}$ – реактивна потужність вузла навантаження.

$$K_{3U} = \frac{U - U_{кр}}{U} \cdot 100, \%. \quad (8.10)$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Розв'язування зручно виконувати в табличній формі, табл. 8.2.

Таблиця 8.2 – Розрахунок залежності $\Delta Q(U)$

U	1,000	0,900	0,800	0,700
$P_H = PP^*$	0,800	0,752	0,715	0,685
$Q_H = QQ^*$	0,600	0,513	0,507	0,529
$(E_3U/x_3)^2 - P_H^2$	1,718	1,345	0,998	0,686
$(E_3U/x_3)^2$	2,358	1,910	1,509	1,156
$A = \sqrt{\left(\frac{E_3U}{x_3}\right)^2 - P_H^2}$	1,310	1,153	0,999	0,826
$B = U^2/x_3$	0,714	0,579	0,457	0,350
$Q_r = A - B$	0,596	0,574	0,542	0,476
$\Delta Q = Q_r - Q_H$	-0,004	0,061	0,035	-0,053

З графіка $\Delta Q = \Delta Q(U)$, рис. 8.5, видно, що $\frac{d\Delta Q}{dU} = 0$ має місце при $U = U_{кр} = 0,870$.

Запас стійкості

$$K_{3U} = \frac{1,000 - 0,870}{1,000} \cdot 100 = 13 \%$$

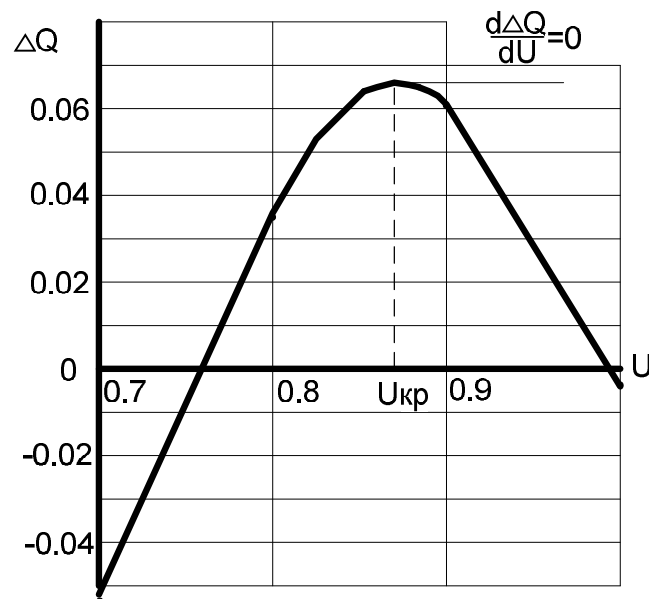


Рисунок 8.5 – Отриманий графік залежності $\Delta Q(U)$

КРИТЕРІЙ $\frac{dE}{dU} > 0$ (граничне співвідношення $\frac{dE}{dU} = 0$) може

застосовуватися для перевірки статичної стійкості режиму в будь-яких випадках, коли “сумнівною” координатою є напруга. Це може бути і в концентрованих системах з потужними вузлами навантаження, і в системах, що живлять через електропередачі навантаження сумірної потужності.

ПРИКЛАД 8.4 Визначити запас стійкості комплексного навантаження, що живиться від системи сумірної потужності (рис. 8.6):

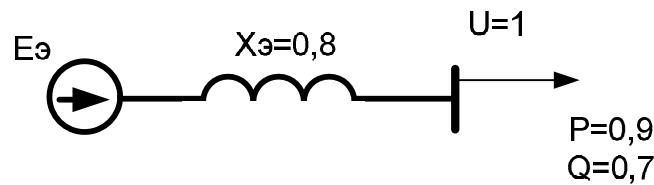


Рисунок 8.6 – Схема системи, яка живить навантаження сумірної потужності

Необхідні параметри режиму і системи приведені у відносних одиницях за певних базисних умов.

ЗВЕДЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ ТА ВІДОМОСТЕЙ

Статичні характеристики навантаження за напругою взяти з [8, 7] або за рис. 4.6 [9].

$$E_{\text{э}} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{\text{н}} X_{\text{э}}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{н}} X_{\text{э}}}{U}\right)^2}, \quad (8.11)$$

де $P_{\text{н}}$, $Q_{\text{н}}$ – відповідно, активна і реактивна потужність навантаження, яка залежить від напруги.

РОЗВ’ЯЗУВАННЯ

Розв’язування виконаємо в табличній формі, табл. 8.3

Таблиця 8.3 – Розрахунок залежності $E_{\text{э}}(U)$

U	1,000	0,900	0,800	0,700
$P_{\text{н}}=PP^*$	0,900	0,848	0,804	0,770
$Q_{\text{н}}=QQ^*$	0,700	0,620	0,591	0,616

Продовження таблиці 8.3

Q_{HX_3}/U	0,560	0,551	0,591	0,704
$U+Q_{HX_3}/U$	1,560	1,451	1,391	1,404
P_{HX_3}/U	0,720	0,755	0,804	0,880
E_3	1,720	1,634	1,610	1,660

Видно, що $\frac{dE_3}{dU}=0$ має місце при $U=U_{кр}=0,8$. Запас стійкості

$$K_{3U} = \frac{U - U_{кр}}{U} \cdot 100 = \frac{1,0 - 0,8}{1,0} \cdot 100 = 20 \% .$$

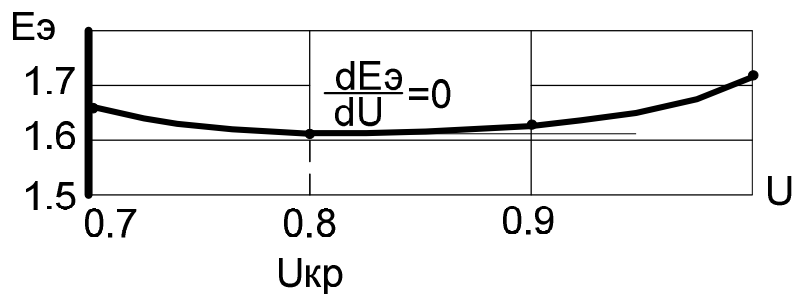


Рисунок 8.7 – Отриманий графік залежності $E_3(U)$

КРИТЕРІЙ $\frac{dQ_3}{dE_3} < 0$ (граничне співвідношення $\frac{dQ_3}{dE_3} = -\infty$) може застосовуватися для перевірки стійкості навантаження, для якого “сумнівною” координатою є напруга. Хоча напруга в явному вигляді не присутня в критерії, зв'язок її з критерієм легко виявляється через баланс реактивної потужності.

ПРИКЛАД 8.5 Для умов прикладу 8.4 визначити критичні значення E_3 і Q_3 , які відповідають порушенню стійкості навантаження.

ЗВЕДЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

$$Q_3 = Q_H + \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U^2} X_3, \quad (8.12)$$

де другий доданок – втрати реактивної потужності в електропередачі.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Розв'язок подамо в табличній формі, табл. 8.4, як розвиток розв'язку задачі 8.4, а відповідну графічну залежність – рис. 8.8.

Таблиця 8.4 – Розрахунок залежності $Q_3(E_3)$

U	1,000	0,900	0,800	0,700
$P_H = PP$	0,900	0,848	0,804	0,770
$Q_H = QQ$	0,700	0,620	0,591	0,616
Q_{HX_3} / U	0,560	0,551	0,591	0,704
$U + Q_{HX_3} / U$	1,560	1,451	1,391	1,404
P_{HX_3} / U	0,720	0,755	0,804	0,880
E_3	1,720	1,634	1,610	1,660
$P_H^2 + Q_H^2$	1,300	1,104	0,997	0,970
$\frac{P_H^2 + Q_H^2}{U^2} x_3$	1,040	1,090	1,250	1,588
$Q_H + \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U^2} x_3$	1,740	1,710	1,841	2,204
Q_3	1,740	1,710	1,841	2,204

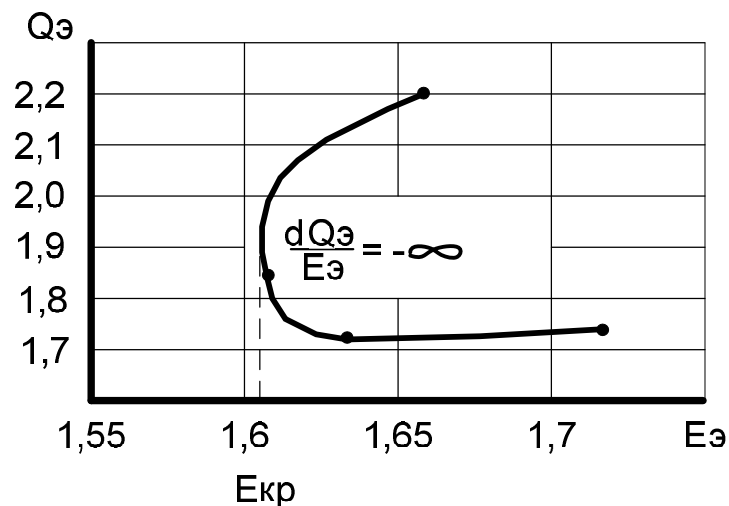


Рисунок 8.8 – Отриманий графік $Q_3(E_3)$

Видно, що критичні параметри, які відповідають $\frac{dQ_3}{dE_3} = -\infty$, такі:

$$E_{кр} = 1,61; \quad Q_{кр} = 1,841.$$

КРИТЕРІЙ $\frac{dP}{dS} > 0$ (граничне співвідношення $\frac{dP}{dS} = 0$) застосовується

для оцінки стійкості асинхронного навантаження, що живиться як від шин нескінченної потужності, так і від вузлової точки мережі з незмінною напругою. Поширюючи останнє твердження на випадок живлення

навантаження від генератора сумірної потужності через електропередачу, можна вважати “незмінною напругою” ЕРС генератора.

Фізично похідна $\frac{dP}{dS}$ характеризує реакцію системи на збільшення ковзання S асинхронного навантаження. При додатному знаку цієї похідної випадковому зростанню ковзання відповідає електромагнітна потужність, яка забирається з мережі, або обертаючий момент, пропорційний цій величині, які зростають швидше, ніж гальмівна потужність (момент) машини-знаряддя. Надлишок потужності при цьому надає прискорення двигуну і тим повертає ковзання до початкового значення. Режим виявляється стійким.

ПРИКЛАД 8.6 Асинхронний двигун з відносними параметрами, показаними на заступній схемі, рис. 8.9, живиться від шин незмінної напруги. Вважаючи $P_0=P_{\text{мех}}=1$, визначити за критерієм $\frac{dP}{dS}=0$ критичні параметри і коефіцієнти запасу стійкості навантаження за потужністю і напругою.

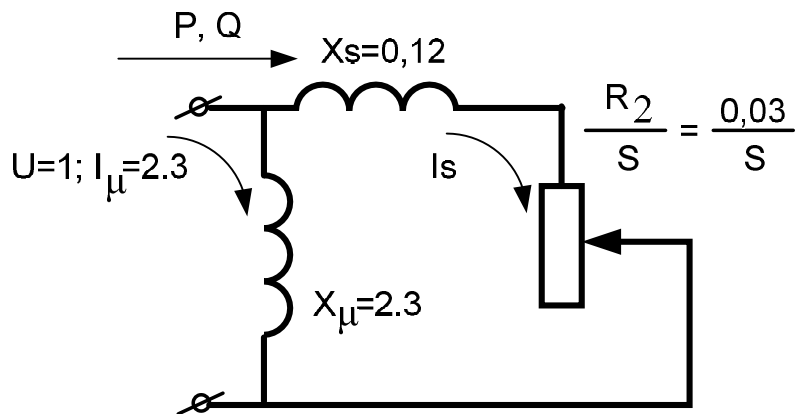


Рисунок 8.9 – Заступна схема асинхронного двигуна

ЗВЕДЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

$$P = \frac{U^2 R_2 S}{R_2^2 + (x_s S)^2}, \quad (8.13)$$

де x_s , R_2 – відповідно, результуючий індуктивний і активний опір заступної схеми асинхронного двигуна.

$$P_m = \frac{U^2}{2x_s}; \quad (8.14)$$

$$U_{кр} = \sqrt{2P_0 x_s}; \quad (8.15)$$

$$S_{кр} = \frac{R_2}{x_s}. \quad (8.16)$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Критерію $\frac{dP}{dS}=0$ відповідають співвідношення (8.14) – (8.16)

$$S_{кр} = \frac{R_2}{x_s} = \frac{0,03}{0,12} = 0,25;$$

$$P_m = \frac{U^2}{2x_s} = \frac{1,0}{2 \cdot 0,12} = 4,16;$$

$$U_{кр} = \sqrt{2P_0 x_s} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0,12} = 0,49;$$

$$K_{зр} = \frac{P_m - P_0}{P_0} = \frac{4,16 - 1,00}{1,00} = 3,16;$$

$$K_{зр} = 316 \%;$$

$$K_{зU} = \frac{U - U_{кр}}{U} \cdot 100 = \frac{1,00 - 0,49}{1,00} \cdot 100 = 51 \%.$$

ПРИКЛАД 8.7 Для умов прикладу 8.6 визначити за співвідношенням $\frac{dQ}{dU} = -\infty$ критичні параметри $U_{кр}$ і $Q_{кр}$, які відповідають порушенню стійкості асинхронного навантаження. Результати порівняти з розв'язком прикладу 8.6.

ЗВЕДЕННЯ НЕОБХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ

$$Q_{\mu} = \frac{U^2}{x_{\mu}}, \quad (8.17)$$

$$Q_{x_s} = I_s^2 x_s, \quad (8.18)$$

де I_s – струм через активний опір заступної схеми асинхронного двигуна.

$$Q = Q_{\mu} + Q_{x_s}; \quad (8.19)$$

$$P = I_s^2 \frac{R_2}{S}; \quad (8.20)$$

$$U = I_s \sqrt{x_s^2 + \left(\frac{R_2}{S}\right)^2}. \quad (8.21)$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Задаючись значеннями ковзання S , за (8.20) знайдемо струм I_s , що відповідає навантаженню, яке дорівнює одиниці. Використовуючи одержаний струм I_s , за (8.21) визначимо напругу U . Потім обчислимо Q_μ , Q_{x_s} та Q за виразами (8.17) – (8.19).

Результати зведемо в таблицю, табл. 8.5 і представимо на рис. 8.10.

Таблиця 8.5 – Результати розрахунку залежності $Q(U)$

S	I_s^2	I_s	U	Q_μ	Q_{x_s}	Q
0,10	3,330	1,820	0,590	0,150	0,400	0,550
0,20	6,700	2,600	0,500	0,109	0,800	0,909
0,25	8,350	2,860	0,490	0,105	1,000	1,105
0,30	10,000	3,160	0,495	0,106	1,200	1,306

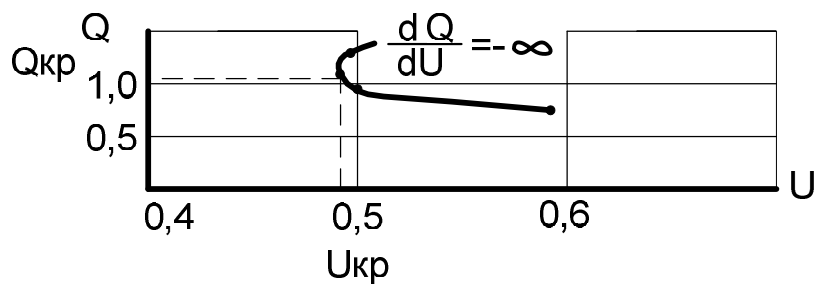


Рисунок 8.10 – Графік залежності $Q(U)$

Видно, що критичні параметри, які відповідають $\frac{dQ}{dU} = -\infty$, такі:

$$U_{кр} = 0,49; \quad Q_{кр} = 1,105.$$

Критична напруга збігається за значенням із розв'язком попередньої задачі.

8.2 Розрахунки, основані на використанні математичних критеріїв

Серед основних розрахункових методів керівними вказівками названі такі, в яких визначення статичної стійкості енергетичних систем базується на застосуванні математичних критеріїв, що витікають з методів малих коливань (відхилень). Йдеться про використання алгебраїчних (Гурвиця, Рауса, Льенара-Шипара) або частотних (Михайлова) критеріїв.

Застосування будь-яких математичних критеріїв пов'язане з аналізом характеристичного рівняння системи, яке повинно бути для даної системи наперед одержано або задано. Канонічна форма характеристичного рівняння має вигляд:

$$D(P) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0. \quad (8.23)$$

Всі алгебраїчні критерії стійкості засновані на закономірностях, що пов'язують від'ємність коренів P_i характеристичного рівняння (ознака стійкості) із значеннями коефіцієнтів a_j цього рівняння і деяких функцій від коефіцієнтів.

8.2.1 Критерій Гурвиця

Критерій Гурвиця встановлює ці співвідношення у вигляді нерівностей, дотримання яких є необхідною і достатньою умовою стійкості системи будь-якого порядку. У свою чергу, згадана система нерівностей виходить з матриці Гурвиця (квадратної n -го порядку), компонентами якої виступають коефіцієнти a_j характеристичного рівняння.

Алгоритм складання матриці Гурвиця

1. По головній діагоналі розташовуються коефіцієнти у порядку їх нумерації, починаючи з a_1 і закінчуючи a_n .

2. У рядках по черзі поміщаються коефіцієнти тільки з непарними або тільки з парними (включаючи нульовий) індексами, причому ліворуч від головної діагоналі – з індексами, що зменшуються, а праворуч – з тими, що збільшуються.

3. Всі коефіцієнти з індексами меншими від нуля і більшими за n , замінюються нулями.

Система за Гурвицем стійка тоді, і тільки тоді, коли разом з додатністю коефіцієнтів a_j характеристичного рівняння всі n діагональні мінори Δ_i також додатні, тобто:

$$\begin{cases} a_j > 0 \mid j=0, 1, 2, \dots, n; \\ \Delta_i > 0 \mid i=1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (8.23)$$

Діагональні мінори (визначники Гурвиця) отримуються відкреслюванням їх зліва і зверху від решти матриці Гурвиця, як це видно з наступної її мнемонічної схеми

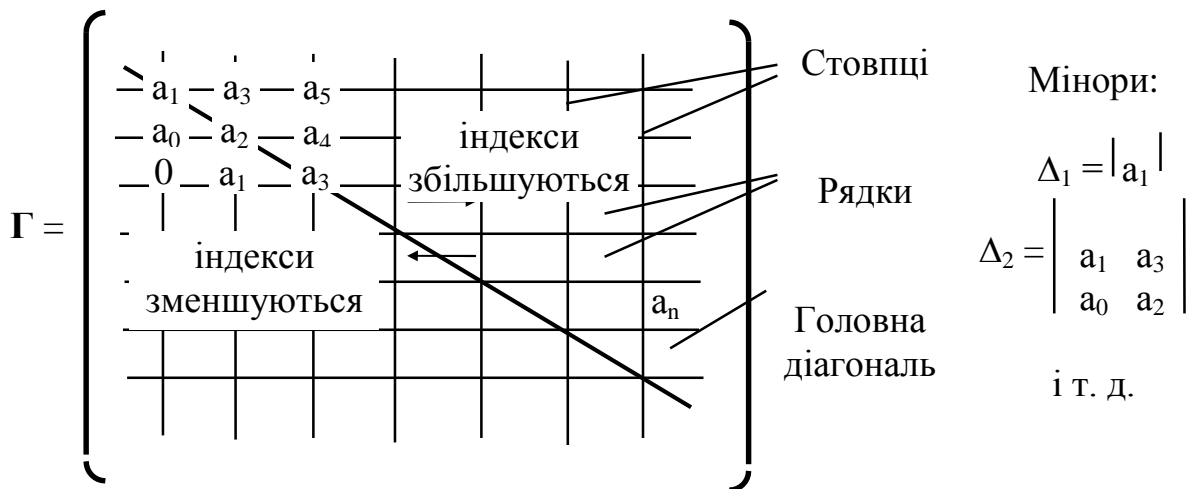


Рисунок 8.11 – Мнемосхема отримання діагональних мінорів

ПРИКЛАД 8.8 Дослідити на стійкість систему, характеристичне рівняння якої має вигляд:

$$p^4 + 7p^3 + 12p^2 + 23p + 10 = 0.$$

РОЗ'ЯЗУВАННЯ

Матриця Гурвиця:

$$\mathbf{G} = \begin{vmatrix} 7 & 23 & 0 & 0 \\ 1 & 12 & 10 & 0 \\ 0 & 7 & 23 & 0 \\ 0 & 1 & 12 & 10 \end{vmatrix}$$

Діагональні мінори:

$$\Delta_1 = 7 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 7 & 23 \\ 1 & 12 \end{vmatrix} = 12 \cdot 7 - 23 \cdot 1 = 61 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 7 & 23 & 0 \\ 1 & 12 & 10 \\ 0 & 7 & 23 \end{vmatrix} = (-1)^5 \cdot 10 \begin{vmatrix} 7 & 23 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} + (-1)^6 \cdot 23 \begin{vmatrix} 7 & 23 \\ 1 & 12 \end{vmatrix} = 913 > 0;$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 7 & 23 & 0 & 0 \\ 1 & 12 & 10 & 0 \\ 0 & 7 & 23 & 0 \\ 0 & 1 & 12 & 10 \end{vmatrix} = (-1)^8 \cdot 10 \begin{vmatrix} 7 & 23 & 0 \\ 1 & 12 & 10 \\ 0 & 7 & 23 \end{vmatrix} = 10 \cdot 913 = 9130 > 0.$$

Оскільки умови (8.23) виконані, досліджувана система статично стійка.

8.2.2 Критерій Льєнара-Шипара

Цей критерій є деякою мірою розвитком критерію Гурвиця. Система стійка за Лєнаром-Шипаром, якщо разом з додатністю коефіцієнтів a_j характеристичного рівняння $(n-1)$ -й і $(n-3)$ -й діагональні мінори матриці Гурвиця додатні, тобто:

$$\begin{cases} a_j > 0 \mid j=0, 1, 2, \dots, n \\ \Delta_{n-1} > 0 \\ \Delta_{n-3} > 0. \end{cases}$$

ПРИКЛАД 8.9 Дослідити на стійкість систему, характеристичне рівняння якої має вигляд:

$$p^5 + p^4 + 7p^3 + 4p^2 + 10p + 3 = 0.$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Матриця Гурвиця:

$$\mathbf{Г} = \begin{vmatrix} 1 & 4 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 7 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 7 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 3 \end{vmatrix}.$$

Діагональні мінори:

$$\Delta_{n-1} = \Delta_4 = \begin{vmatrix} 1 & 4 & 3 & 0 \\ 1 & 7 & 10 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 3 \\ 0 & 1 & 7 & 10 \end{vmatrix} = (-1)^2 \cdot 1 \begin{vmatrix} 7 & 10 & 0 \\ 1 & 4 & 3 \\ 1 & 7 & 10 \end{vmatrix} + (-1)^3 \cdot 1 \begin{vmatrix} 4 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 3 \\ 1 & 7 & 10 \end{vmatrix} = 63 - 55 = 8 > 0;$$

$$\Delta_{n-3} = \Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 4 \\ 1 & 7 \end{vmatrix} = 7 - 4 = 3 > 0.$$

Система стійка.

8.2.3 Критерій Рауса

Критерій Рауса встановлює співвідношення, пов'язані з коефіцієнтами характеристичного рівняння у вигляді нерівностей, які витікають з таблиці Рауса з числом рядків $n+1$.

Алгоритм складання таблиці Рауса

1. В першому рядку розташовуються коефіцієнти характеристичного рівняння з парними індексами, починаючи з нульового.

2. В другому рядку розташовуються коефіцієнти характеристичного рівняння з непарними індексами.

3. Елементи кожного наступного рядка C_{kl} визначаються виразом:

$$C_{kl} = C_{k+1,l-2} - \lambda_{l-2} C_{k+1,l-1}, \quad (8.24)$$

$$\text{де } \lambda_{l-2} = \frac{C_{1,l-2}}{C_{1,l-1}} \quad l \geq 3;$$

k – номер стовпця;

l – номер рядка.

Система за Раусом стійка тоді, і тільки тоді, коли разом з додатністю коефіцієнтів a_j характеристичного рівняння всі елементи першого стовпця таблиці Рауса додатні, тобто:

$$\begin{cases} a_j > 0 & j = 0, 1, 2, \dots, n \\ C_{1l} > 0 & l = 3, 4, \dots, n + 1 \end{cases} \quad (8.25)$$

Число змін знака в першому стовпці таблиці вказує на число коренів характеристичного рівняння, які знаходяться в правій напівплощині і тим самим критерій Рауса дозволяє дослідити характер нестійкості.

ПРИКЛАД 8.10 Для умов прикладу 8.8 перевірити стійкість системи за критерієм Рауса.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Складаємо таблицю Рауса, табл. 8.6, яка для заданого характеристичного рівняння

$$p^4 + 7p^3 + 12p^2 + 23p + 10 = 0$$

матиме п'ять рядків.

Таблиця 8.6 – Таблиця Рауса для умов прикладу 8.10

	$C_{11}=1$	$C_{12}=12$	$C_{31}=10$
	$C_{12}=7$	$C_{22}=23$	$C_{32}=0$
$\lambda_1=0,143$	$C_{13}=61/7$	$C_{23}=10$	$C_{33}=0$
$\lambda_2=0,821$	$C_{14}=913/61$	$C_{24}=0$	$C_{34}=0$
$\lambda_3=0,582$	$C_{15}=10$	$C_{25}=0$	$C_{35}=0$

Співвідношення (8.25) виконані, система стійка.

ПРИКЛАД 8.11 Дослідити на стійкість систему, характеристичне рівняння якої має такий вигляд:

$$p^5 + 9p^4 + 10p^3 + 3p + 10 = 0.$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Таблиця 8.7 – Таблиця Рауса для умов прикладу 8.11

	1	10	3	0
	9	0	10	0
$\lambda_1=1/9$	10	17/9	0	0
$\lambda_2=0,9$	-17/10	10	0	
$\lambda_3=-100/17$	60,5	0		
$\lambda_4=-0,028$	10			

При складанні таблиці Рауса заповнюють не всі елементи рядків, а лише ті, які потрібні для подальших обчислень.

Оскільки в першому стовпці є від'ємний елемент, то умови (8.25) не виконуються, через що система нестійка. Оскільки в першому стовпці виявляються дві зміни знака (з плюса на мінус, а потім з мінуса на плюс), то система містить два прaviх кореня і має місце коливальна нестійкість.

8.2.4 Критерій Михайлова

Цей критерій вирішує питання про знаходження коренів характеристичного рівняння (а значить, і про стійкість) шляхом побудови годографа характеристичного вектора, що іменується також годографом Михайлова.

Алгоритм побудови годографа Михайлова

1. Прийняти в характеристичному векторі $p=j\omega$.

2. Виділити дійсну

$$U(\omega) = a_n - a_{n-2} \omega^2 + a_{n-4} \omega^4 - \dots \quad (8.26)$$

і уявну

$$V(\omega) = a_{n-1} \omega - a_{n-3} \omega^3 + a_{n-5} \omega^5 - \dots \quad (8.27)$$

частини характеристичного вектора.

3. При варіації ω в межах від $0 \leq \omega \leq \infty$ обчислити відповідне значення $U(\omega)$ та $V(\omega)$.

4. На комплексній площині в координатах V, U нанести відповідні кроку 3 точки.

5. З'єднати точки плавною кривою – годографом Михайлова.

Система за Михайловим стійка тоді, і тільки тоді, коли годограф, беручи початок на дійсній осі, проходить таку кількість квадрантів, яка дорівнює ступеню характеристичного рівняння, оточуючи початок координат проти ходу годинникової стрілки.

Інакше, для стійкості за Михайловим необхідно і досить, щоб при варіації ω від 0 до ∞ :

1) характеристичний вектор $D(j\omega)$ зробив поворот на кут $\pi/2$ проти годинникової стрілки;

2) годограф Михайлова не проходив через початок координат.

ПРИКЛАД 8.12 Перевірити на стійкість систему, характеристичне рівняння якої

$$0,12 p^3 + 0,10 p^2 + 1,72 p + 0,50 = 0.$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Прийmemo $p=j\omega$, виділимо

$$U(\omega) = 0,50 - 0,10 \omega^2;$$

$$V(\omega) = 1,72 \omega - 0,12 \omega^3$$

та обчислимо залежності $U(\omega)$ і $V(\omega)$ при зміні аргумента $0 \leq \omega \leq \infty$ в табличному вигляді, табл. 8.8.

Таблиця 8.8 – Розрахунок $U(\omega)$ та $V(\omega)$ для побудови годографа Михайлова

ω	$U(\omega)$	$V(\omega)$
0	0,50	0
2	0,10	2,48
3	- 0,40	1,98
4	- 1,10	- 0,80
∞	$-\infty$	$-\infty$

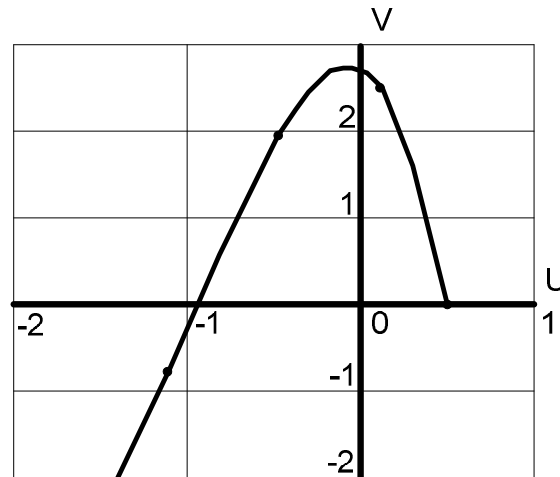


Рисунок 8.12 – Годограф Михайлова, що відповідає результатам розрахунку

З рис 8.12 видно, що годограф Михайлова проходить три квадранти, оточуючи початок координат. Отже, система стійка.

Почергове проходження квадрантів годографом Михайлова дозволяє одержати умову стійкості в іншому формулюванні.

Система за Михайловим стійка тоді, і тільки тоді, коли виконуються такі умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1. V(0) > 0; \\ 2. V'(0) > 0 \text{ де } V'(\omega) = \frac{dV(\omega)}{d\omega}; \\ 3. \left. \begin{array}{l} U(\omega) = 0 \\ V(\omega) = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{дійсні та} \\ \text{переміжні.} \end{array} \end{array} \right. \quad (8.28)$$

Першу умову слід розуміти так, що вираз (8.26) при підстановці $\omega=0$ повинний бути додатнім. Друга умова виходить при підстановці $\omega=0$ у похідну виразу (8.27), яка є уявною частиною характеристичного вектора. Остання умова означає, що корені рівняння $U(\omega)=0$ та $V(\omega)=0$, будучи

розташовані на числовій осі ω , повинні чергуватися один з одним. Інакше кажучи, необхідно, щоб між будь-якими двома коренями одного з цих рівнянь знаходився б корінь іншого рівняння.

ПРИКЛАД 8.13 Для умов прикладу 8.12 перевірити стійкість за критерієм Михайлова в другому формулюванні.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Дійсна і уявна частини характеристичного вектора:

$$U(\omega) = 0,50 - 0,10 \omega^2;$$

$$V(\omega) = 1,72 \omega - 0,12 \omega^3.$$

Видно, що $U(0) = 0,50 > 0$.

Оскільки $V'(\omega) = 1,72 - 3 \cdot 0,12 \omega^2$ та $V'(0) = 1,72 > 0$, то виконується і друга умова.

Визначимо корені рівнянь $U(\omega) = 0$ и $V(\omega) = 0$:

$$U(\omega) = 0,50 - 0,10 \omega^2 = 0; \omega_{1,2} = \pm\sqrt{5} = \pm 2,24;$$

$$V(\omega) = 1,72 \omega - 0,12 \omega^3 = 0; \omega_3 = 0;$$

$$1,72 - 0,12 \omega^2 = 0; \omega_{4,5} = \pm\sqrt{\frac{1,72}{0,12}} = \pm 3,78.$$

Оскільки характеристичне рівняння, що досліджується, третього порядку, то надалі будемо розглядати тільки три невід'ємні корені, тому що згідно з теорією, значення варіюються від 0 до $+\infty$, тобто, знаходяться у невід'ємній зоні. З п'яти одержаних вище коренів, цій умові відповідають:

$$U(\omega)=0 \quad \omega_1=2,24$$

$$V(\omega)=0 \quad \omega_3=0; \omega_4=3,78$$

Ці корені дійсні і переміжні. Останнє можна бачити на такій мнемонічній схемі

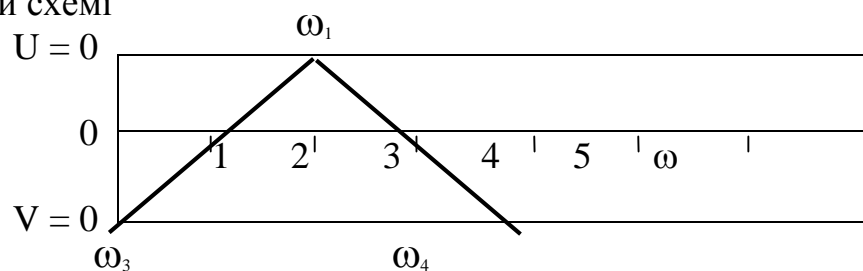


Рисунок 8.13 – Положення коренів рівнянь $U(\omega)$ та $V(\omega)$

8.2.5 D-розбиття простору коефіцієнтів

Цей спосіб застосовується в тих випадках, коли в початковому характеристичному рівнянні системи задані не всі, а лише деякі з

коефіцієнтів, і завдання полягає у визначенні зони значень для інших коефіцієнтів, що забезпечують стійкість системи, або в доведенні відсутності зони стійкості.

Оскільки коефіцієнти характеристичного рівняння містять деякі технічні параметри системи, то D-розбиття можна проводити в площині цих параметрів. Для випадку, коли коефіцієнти характеристичного рівняння залежать від двох параметрів ξ і η , вираз (8.22) набере вигляду:

$$D(p, \xi, \eta) = \xi P(p) + \eta Q(p) + R(p) = 0, \quad (8.29)$$

де ξ, η – дійсні параметри;

$P(p), Q(p), R(p)$ – відомі многочлени з дійсними коефіцієнтами.

Процедура розрахунку зводиться до побудови лінії L-межі та D-розбиття, включаючи іноді в себе особливі прямі, виділення зв'язних зон в площині параметрів, що досліджуються, і перевірки стійкості зони-претендента на стійкість.

Алгоритм D-розбиття в площині двох параметрів

1. В характеристичному рівнянні $D(p, \xi, \eta)$ прийняти $p = j\omega$.
2. Виділити і прирівняти до нуля дійсну і уявну

$$\begin{cases} \operatorname{Re} \dot{D}(\omega, \xi, \eta) = 0 & \text{(а)} \\ \operatorname{Im} \dot{D}(\omega, \xi, \eta) = 0 & \text{(б)} \end{cases} \quad (8.30)$$

частини характеристичного рівняння.

3. З системи рівнянь, яка одержана, визначити параметричні рівняння лінії L

$$\xi(\omega) = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad \text{та} \quad \eta(\omega) = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (8.31)$$

де $\Delta, \Delta_1, \Delta_2$ – відповідно, головний, перший і другий визначники системи, що вирішуються за правилом Крамера.

4. При варіації ω в межах $-\infty \leq \omega \leq 0$ обчислити значення ξ і η .
5. На фазовій площині ξ, η нанести відповідні до кроку 4 точки і, з'єднавши їх, одержати лінію L-межу D-розбиття (якщо $\Delta \equiv 0$, то межею D-розбиття служать тільки особливі прямі).
6. На фазовій площині будуються особливі прямі за умов: якщо для ω_i $\Delta = \Delta_1 = \Delta_2 = 0$, то будують пряму $\operatorname{Re} \dot{D}(\omega_i, \xi, \eta) = 0$; якщо в (8.22) $a_0 = a_0(\xi, \eta)$, то будують пряму $a_0(\xi, \eta) = 0$.

7. Здійснити штрихування лінії L, керуючись тим, що при зростаючих ω лінія L штрихується зліва за ходом, якщо $\Delta > 0$, і справа – в іншому випадку.

8. Здійснити штрихування особливих прямих, керуючись тим, що в місцях перетину при торканні їх з лінією L штрихування повинно бути звернене одне до одного.

9. Виділити зв'язні зони, а серед них – зону-претендент на стійкість (як зону з найбільшим числом лівих коренів), керуючись такими міркуваннями:

а) при переході з однієї зони в іншу через лінію L в бік штрихування нова зона набуває два лівих і втрачає два правих кореня;

б) при переході з однієї зони в іншу через особливу пряму в бік штрихування, нова зона отримує один лівий і втрачає один правий корінь.

10. В середині зони-претендента на стійкість взяти довільну точку з координатами ξ_0, η_0 і підставити в початкове характеристичне рівняння (8.29).

11. Дослідити на стійкість за будь-яким математичним критерієм одержане характеристичне рівняння з коефіцієнтами в явній формі.

12. Якщо розв'язок дає стійкість, то зона-претендент дійсно містить точки стійкого стану, інакше зони стійкості немає взагалі.

ПРИКЛАД 8.14 Виділенням D-зон знайти зону стійкості системи

$$D(p, \xi, \eta) = p^3 + \xi p^2 + \eta p + 6 = 0$$

або показати, що такої зони немає взагалі.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Приймемо $p = j\omega$ та представимо характеристичне рівняння у вигляді

$$D(\omega, \xi, \eta) = -j\omega^3 - \xi \omega^2 + j\eta\omega + 6 = 0.$$

Виділимо

$$\operatorname{Re} \dot{D}(\omega, \xi, \eta) = -\xi \omega^2 + 6 = 0;$$

$$\operatorname{Im} \dot{D}(\omega, \xi, \eta) = -\omega^3 + \eta \omega = 0.$$

Аналізуємо систему

$$\begin{cases} \xi \omega^2 + 0\eta = 6 \\ 0\xi + \eta = \omega^2; \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \omega^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \omega^2; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 6 & 0 \\ \omega^2 & 1 \end{vmatrix} = 6 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} \omega^2 & 6 \\ 0 & \omega^2 \end{vmatrix} = \omega^4;$$

$$\xi = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{6}{\omega^2}; \quad \eta = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\omega^4}{\omega^2} = \omega^2.$$

Обчислимо значення ξ і η при $-\infty \leq \omega \leq 0$.

ω	$-\infty$	-3	-2	-1	0
ξ	0	$2/3$	$3/2$	6	∞
η	∞	9	4	1	0

Оскільки немає ω_i , для яких би $\Delta = \Delta_1 = \Delta_2 = 0$ і a_0 не залежало від ξ та η , то особливих прямих немає.

Побудуємо лінію L-межу D-розбиття, рис. 8.14.

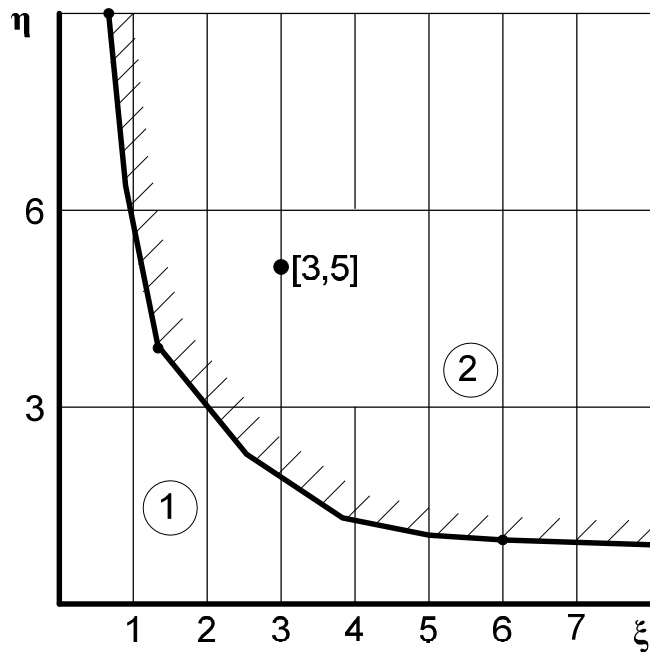


Рисунок 8.14 – Лінія L-межі D-розбиття, що отримана за результатами розрахунку

Можна виділити зони 1 і 2. Хай 1 буде зоною $D_1(K, 3 - K)$, тоді 2 буде зоною $D_2(K + 2, 1 - K)$. Зона D_2 , що містить більше число лівих коренів, є претендентом на стійкість. Для точки $[3; 5]$, яка належить цій зоні, початкове характеристичне рівняння таке:

$$D(p) = p^3 + 3p^2 + 5p + 6 = 0.$$

Для нього

$$\Gamma = \begin{vmatrix} 3 & 6 & 0 \\ 1 & 5 & 0 \\ 0 & 3 & 6 \end{vmatrix}.$$

Оскільки

$$\Delta_1 = 3 > 0; \Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 6 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 9 > 0;$$

$$\Delta_3 = 6 \cdot \Delta_2 = 6 \cdot 9 = 54 > 0,$$

зона стійкості існує і вона є $D_2(3, 0)$.

ПРИКЛАД 8.15 Виділити D-зони і визначити зону стійкості системи

$$D(p, \xi, \eta) = \xi(p^2 - p) + \eta(p^2 + p - 1) + 1 = 0.$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

КРОК 1 При $p = j\omega$

$$D(p, \xi, \eta) = -j\xi(\omega^3 + \omega) + j\eta\omega - \eta\omega^2 - \eta + 1 = 0.$$

КРОК 2

$$\begin{cases} \operatorname{Re} \dot{D}(\omega, \xi, \eta) = 0\xi - (\omega^2 + 1)\eta = -1; \\ \operatorname{Im} \dot{D}(\omega, \xi, \eta) = -(\omega^3 + \omega)\xi + \omega\eta = 0. \end{cases}$$

КРОК 3

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & -(\omega^2 + 1) \\ -(\omega^3 + \omega) & \omega \end{vmatrix} = -\omega(\omega^2 + 1)^2;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -1 & -(\omega^2 + 1) \\ 0 & \omega \end{vmatrix} = -\omega;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ -(\omega^3 + \omega) & 0 \end{vmatrix} = \omega(\omega^2 + 1);$$

$$\xi = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{1}{(\omega^2 + 1)^2}; \quad \eta = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{1}{(\omega^2 + 1)}.$$

КРОК 4

ω	$-\infty$	-1,00	-0,50	0
ξ	0	0,25	0,64	1,00
η	0	0,50	0,80	1,00

КРОК 5

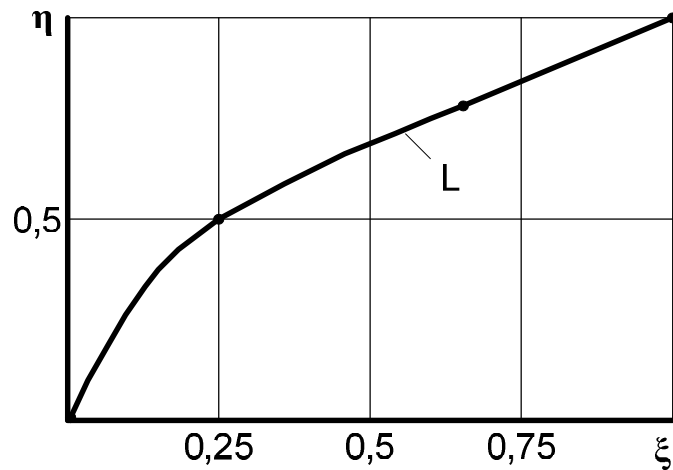


Рисунок 8.15 – Лінія L-межа D-розбиття, що отримана

КРОК 6 Оскільки при $\omega_i = 0$ має місце $\Delta = \Delta_1 = \Delta_2 = 0$, то будемо особливу пряму (рис. 8.16)

$$\operatorname{Re} \dot{D}(\omega_i, \xi, \eta) = -(\omega^2 + 1)\eta = -1;$$

$$-(\omega + 1)\eta = -1;$$

$$\eta = 1.$$

Оскільки $a_0 = \xi$, то будемо особливу пряму $\xi = 0$.

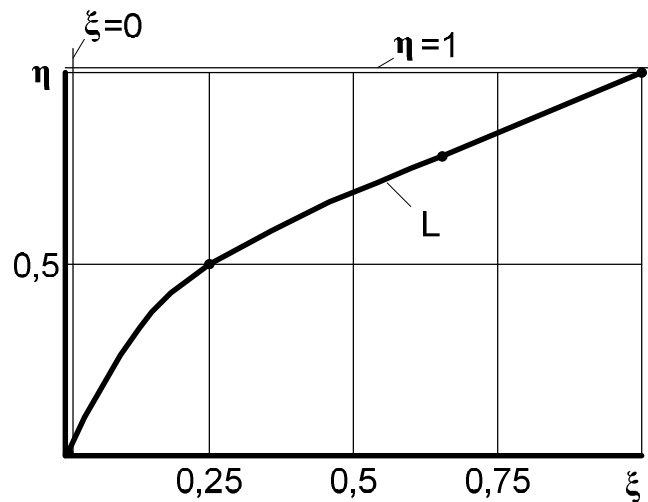


Рисунок 8.16 – Особливі прямі на фазовій площині

КРОК 7

Оскільки $\Delta > 0$ при $-\infty \leq \omega \leq 0$, то штрихуємо зліва по ходу лінії L.

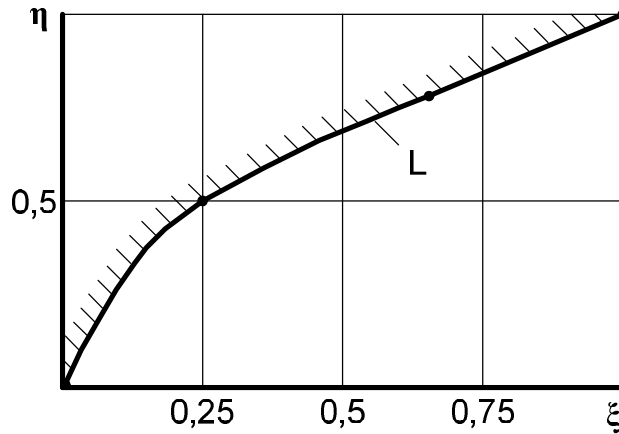


Рисунок 8.17 – Штриховка L-межі на фазовій площині

КРОК 8 Виділимо зони 1, 2, 3, 4, 5 (рис. 8.18) та виконаємо штрихування особливих ліній

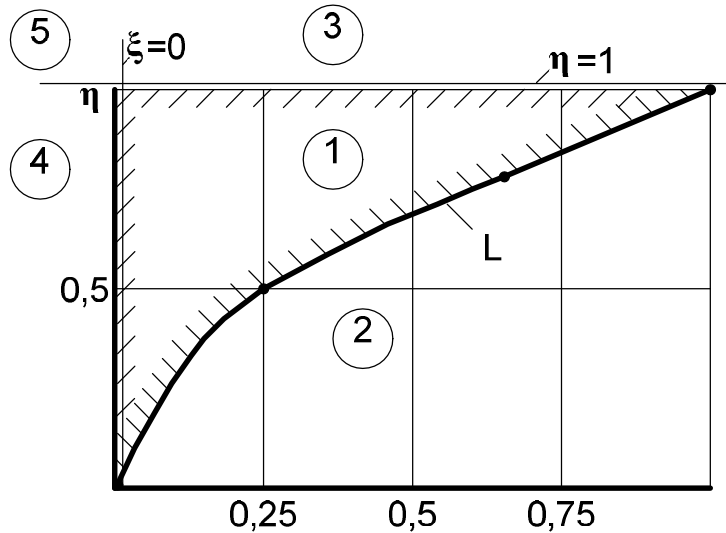


Рисунок 8.18 – Штрихування особливих ліній

КРОК 9 Нехай зона 2 буде $D_2(K, 3 - K)$.

Тоді

$$D_1(K + 2, 1 - K);$$

$$D_3(K + 1, 2 - K);$$

$$D_4(K + 1, 2 - K);$$

$$D_5(K, 3 - K).$$

D_1 – зона-претендент на стійкість, оскільки містить найбільше число лівих коренів.

КРОК 10 Виберемо всередині $D_1(K + 2, 1 - K)$ точку $(0,25; 0,75)$, тоді характеристичне рівняння буде

$$D(p) = p^3 + 3 p^2 + 2 p + 1 = 0.$$

КРОК 11

$$\Gamma = \begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = 3 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 6 - 1 = 5 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{vmatrix} = \Delta_2 = 5 > 0.$$

КРОК 12 Оскільки розв'язок на кроці 11 дає стійкість, то виділені зони насправді такі:

$D_1 = D_1(3,0)$ – зони стійкості;

$D_2(1,2); D_3(2,1); D_4(2,1); D_5(1,2)$.

8.3 Характеристика програми STATIC для перевірки статичної стійкості

Програма STATIC призначена для перевірки статичної стійкості системи, заданої характеристичним рівнянням порядку не більше 10. Аналіз стійкості проводиться на основі матриці Гурвиця. Тому ключовим моментом алгоритму, реалізованому в програмі, є синтез матриці Гурвиця. Надалі стійкість визначається за більш економним з обчислювальної точки бачення критерієм Льенара-Шипара.

Вхідною інформацією для програми STATIC є порядок і коефіцієнти характеристичного многочлена:

```
* PROGRAM STATIC
* АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ
* МАТРИЦЫ ГУРВИЦА
* РАЗМЕРНОСТЬЮ НЕ БОЛЕЕ 10
* ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ
REAL KOEFF
DIMENSION GURV(10,10),KOEFF(11)
READ(5,10) M
10 FORMAT(i5)
I1=M+1
READ(5,15)(KOEFF(I),I=1,I1)
15 FORMAT(8F10.5)
```

В цьому фрагменті програми:

M- порядок матриці Гурвиця;

КОЕФФ – вектор-рядок коефіцієнтів характеристичного рівняння.

Вихідна інформація є синтезованою в підпрограмі MATRIX матрицею Гурвиця, результати обчислень необхідних мінорів в підпрограмі MINOR і висновки відносно стійкості системи.

В основі алгоритму, реалізованого в програмі, лежить наступне твердження.

Нижче приводиться вихідний лістинг програми STATIC з обробки характеристичного рівняння п'ятого порядку:

$$p^5 + p^4 + 7p^3 + 4p^2 + 10p + 3 = 0.$$

Перевірка статичної стійкості системи
без визначення коренів характеристичного
рівняння

Коефіцієнти характеристичного рівняння системи 5-го
порядку:

1.00000 1.00000 7.00000 4.00000 10.00000 3.00000

Матриця Гурвиця, що відповідає вихідним умовам:

1.000	4.000	3.000	.000	.000
1.000	7.000	10.000	.000	.000
.000	1.000	4.000	3.000	.000
.000	1.000	7.000	10.000	.000
.000	.000	1.000	4.000	3.000

Мінори, які контролюються, (n-1) та (n-3) порядків:

D= 8.00;

D= 3.00.

Система статично стійка за критерієм Льенара-Шипара.

8.4 Автоматизація прямого пошуку коренів характеристичних рівнянь

Доцільність пошуку коренів характеристичних рівнянь витікає з того факту, що положення коренів на комплексній площині дає відповідь на питання про статичну стійкість системи, що досліджується. Наявність сучасних обчислювальних можливостей знімає складність пошуку коренів характеристичних рівнянь високого порядку, для яких немає загальних аналітичних розв'язків.

В теоретичному плані приведена теза ґрунтується на наступному. Нехай лінійна система має таку математичну модель:

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \quad (8.32)$$

де A – квадратна матриця n -го порядку.

ТЕОРЕМА 8.1

Система (8.32) з постійною матрицею A стійка тоді, і тільки тоді, коли всі характеристичні числа

$$\lambda_j = \lambda_j(A)$$

матриці A мають недодатні дійсні частини

$$\operatorname{Re} \lambda_j(A) \leq 0 \quad \left| \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8.33)$$

(Якщо $\operatorname{Re} \lambda_j(A) < 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$, то лінійна система стійка асимптотично).

Відмітимо, що характеристичні числа матриці є коренями її характеристичного рівняння

$$\Delta(\lambda) = \det(A - \lambda I) = 0, \quad (8.34)$$

де I – одинична матриця.

Інакше кажучи, характеристичне рівняння виходить як результат розкриття головного визначника матриці A і прирівнювання його до нуля. Це може бути рівняння високого порядку, корені якого на підставі приведеної теореми і дадуть аргументи до висновку про стійкість або нестійкість системи.

Для вирішення характеристичних рівнянь можуть бути використані різні пакети прикладних програм (ППП). Наприклад, в ППП SSP є підпрограма POLRT, що забезпечує розрахунок коренів поліноміальних рівнянь порядку не вище 36 за методом Ньютона-Рафсона.

Звернення до неї і зміст вхідних формальних параметрів наведені нижче:

CALL POLRT (XCOF, COF, M, ROOTR, ROOTI, IER)

де XCOF – вектор, вимірністю $M \times 1$ коефіцієнтів полінома у порядку зростання ступенів;

COF – робочий вектор вимірністю $M \times 1$;

M – порядок полінома;

ROOTR, ROOTI – результуючі вектора вимірністю M, в яких зберігаються, відповідно, дійсні і уявні частини коренів, що визначаються;

IER – код повернення.

Ілюстративна програма головного модуля приведена нижче.

* Расчёт корней полинома на основе пакета SSP
dimension coeff(11),rezn(10),rezi(10),cof(11)
pause 'Установите дискету с файлом данных POLYNOM.dat'

```

open(5,file='a:polynom.dat')
open(6,file='a:polynom.txt',status='new')
write(6,1)
1 format(/20x,30h*****/20x,
*30h Разработчик В.Аввакумов /20x,
*30h*****//)
read(5,10)m,(coeff(i),i=1,m+1)
10 format(i3/10f8.3)
close(5)
call polrt(coeff,cof,m,rezr,rezi,ier)
write(6,15)
15 format(10x,'Файл исходных данных к программе
POLYNOM:')
write(6,20)m,(coeff(i),i=1,m+1)
20 format(10x,i3/10x,6f8.3)
write(6,25)
25 format(10x,'Результаты определения корней полинома:')
write(6,30)(rezr(i),rezi(i),i=1,m)
30 format(20x,('f10.5,')+j('f10.5,'))
write(6,35)ier
35 format(/10x,'ier=',i3)
write(*,50)
50 format(1x,'Выходной листинг смотрите на дискете в файле ',
*'POLYNOM.txt')
close(6)
stop
end

```

Результат роботи цієї програми для характеристичного рівняння, використаного в 8.3, приведений в наступному вихідному листингу.

Пошук коренів характеристичного рівняння для перевірки статичної стійкості

Файл початкових даних до програми POLYNOM:

```

5
3.000 10.000 4.000 7.000 1.000 1.000

```

Результати розрахунку коренів полінома:

```

*****
*   ( -.31867)+j( .00000)   *
*   ( -.25295)+j( -2.14954) *
*   ( -.25295)+j( 2.14954)  *
*   ( -.08772)+j( -1.41490) *

```

* (-.08772)+j(1.41490) *

Аналогічна робота з вирішення поліноміального рівняння нижче подана в формі звіту (REPORT) ППП Т.EUREKA

Eureka: The Solver, Version 1.0
 Sunday March 24, 2000, 11:03 am.
 Name of input file: POLYNOM
 Исполнитель - В.Аввакумов

;Поиск корней характеристического уравнения
 ;для проверки статической устойчивости.
 ;Program POLYNOM
 ;Расчёт корней полинома на основе ППП EUREKA
 ;R(p)=p^5+p^4+7.*p^3+4.*p^2+10.*p+3.
 R(p):=poly(p,1.,1.,7.,4.,10.,3.)

Roots to the polynomial R

#	Real part	Imaginary part
1	-.31867007	.00000000
2	-.087719413	1.4149001
3	-.087719413	-1.4149001
4	-.25294555	2.1495370
5	-.25294555	-2.1495370

Видно, що дослідження стійкості на основі прямого пошуку коренів або з використанням програми STATIS стосовно одного і того ж рівняння, природно, приводять до одного й того ж висновку про стійкість системи.

Завдання для самостійної роботи

1. Дослідити на стійкість систему, рис.8.1, за критерієм $\frac{d\Delta Q}{dU}$. При дослідженні прийняти статичні характеристики вузла навантаження за напругою з таблиці 8.1.

Наведіть свої міркування відносно збігу отриманих результатів з результатами прикладу 8.1.

2. Обґрунтуйте чи будуть відрізнятись результати, отримані для умови прикладу 8.3, при дослідженні запасу стійкості за критерієм $\frac{dE}{dU}$ від результатів, які отримані за критерієм $\frac{d\Delta Q}{dU}$?

3. Як вплинуть на результати, отримані в прикладах 8.6 та 8.7 збільшення потужності P_0 , наприклад, $P_0 = 1,1$?

4. Дослідіть на стійкість систему, характеристичне рівняння якої задано в прикладі 8.8, за критерієм Михайлова у відповідності до двох його формулювань.

Те саме, але за допомогою ППП SSP та ППП EUREKA.

9 ПРОСТІ РОЗРАХУНКИ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ

9.1 Суть проблеми динамічної стійкості

Як наголошувалося раніше, динамічною стійкістю режиму енергетичної системи називається її здатність повертатися після тимчасово прикладеного раптового і різкого збурення до такого сталого режиму, при якому значення параметрів режиму у вузлових точках близькі до нормальних.

Порівнюючи це визначення з визначенням поняття статичної стійкості, можна відмітити, що відмінність полягає, головним чином, у величинах збурень, а, значить, у врахуванні або неврахуванні інерційних параметрів системи. Критерії статичної стійкості показують здатність системи протистояти малим збуренням і визначаються при незмінних параметрах системи. Критерії динамічної стійкості характеризують здатність системи зберігати синхронну роботу і відновлювати режим близький до початкового при короткочасних різких його змінах.

Різкі зміни режиму (великі збурення) можуть бути викликані змінами параметрів системи при нормальних вимкненнях генераторів, кіл ліній електропередач, змінах навантаження, втраті збудження синхронних машин, переході на неповнофазний режим і т. д., але найсильніші збурення пов'язані з короткими замиканнями.

Кінцевим завданням дослідження динамічної стійкості системи є виявлення відносного руху роторів генераторів (в найпростішому випадку одного) і отримання на цій основі висновку про здатність системи зберігати синхронну роботу.

Як правило, такий аналіз спочатку виконується з серйозними спрощеннями. Не враховуються аперіодичні струми статора і відповідні їм періодичні струми в роторі синхронної машини. Генератори заміщаються своїми перехідними параметрами – опорами і ЕРС, причому перехідну ЕРС машини розглядають під час всього перехідного процесу незмінною ($E'_q = \text{const}$). Підставою до цього допущення служить відомий закон електромагнітної інерції, згідно з яким в синхронній машині результуюче потокощеплення, пов'язане з обмоткою збудження, залишається у момент збурення незмінним, а далі поволі змінюється. Наявність регуляторів збудження приводить до стабілізації E'_q ще на більшому інтервалі часу. Це і дає підставу вважати $E'_q = \text{const}$ при спрощеному аналізі динамічної стійкості.

При цих допущеннях стає можливим розглядати при розрахунку динамічної стійкості заступну схему попереднього сталого режиму, в якій взаємні опори між генератором і вузлом незмінної напруги визначатимуться відсутністю або наявністю “аварійного шунта” – опору,

який створює комплексну заступну схему відповідно до правила еквівалентності прямої послідовності.

Неповнофазні режими теж можна розглядати як режими прямої послідовності в схемі, опір в якій збільшений відповідно до правила еквівалентності прямої послідовності для поздовжньої несиметрії.

В збурених режимах електромагнітна гальмівна потужність генераторів зменшується, що знижує і момент гальмування. Проте момент обертання, що створюється первинним двигуном – турбіною, залишається, в перший момент і до вступу в роботу регулятора швидкості, незмінним. Небаланс моментів обумовлює електромеханічний перехідний процес, який характеризується зміною в часі просторової механічної координати ротора - кута δ . Саме за зміною кута і можна судити про динамічну стійкість системи.

9.2 Рівняння руху синхронної машини і різноманітні форми його запису

Рівняння руху синхронного генератора синтезується з того очевидного факту, що надлишок потужності ΔP , який виникає при збуренні,

$$\Delta P = P_T - P \quad (9.1)$$

надає ротору деяке прискорення,

$$\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (9.2)$$

В (9.1) і (9.2):

P_T – механічна потужність первинного двигуна;

P – електрична (внутрішня) потужність генератора;

δ – кут повороту ротора;

t – час.

Величина кутового прискорення, яке виникає в кожен момент часу, прямо пропорційна надлишку потужності і обернено пропорційна постійній механічній інерції генератора T_j :

$$\alpha = \frac{\Delta P}{T_j} \quad (9.3)$$

Якщо підставити в останнє рівняння співвідношення (9.1) і (9.2), то ми маємо:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P. \quad (9.4)$$

Це і є основне рівняння руху синхронного генератора при неврахуванні його асинхронної потужності і малій зміні швидкості $\frac{d\delta}{dt}$, тобто, за таких допущень, при яких рівняння (9.4) цілком задовольняє основні інженерні завдання.

В рівнянні (9.4) вхідні величини мають такі вимірності:

δ – радіани;

t – радіани;

T_j – радіани;

P, P_T – в.о.

Зрозуміло, що ці величини можуть мати інші вимірності. В розрахунках динамічної стійкості найчастіше використовується така форма запису рівняння руху синхронного генератора, коли кут вимірюється в електричних градусах, час і постійна механічної інерції – в секундах, а потужності, як і раніше, у відносних одиницях. Тоді:

$$\frac{T_j}{360 f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P, \quad (9.5)$$

де f_0 – номінальна частота, Гц.

Як наголошувалося вище, кінцевим завданням дослідження поведінки синхронного генератора при сильних збуреннях є знаходження траєкторії $\delta = \delta(t)$, яка може бути одержана як результат інтегрування рівняння руху у формі (9.4) або (9.5). Цю ж задачу – виявлення відносного руху ротора генератора в умовах перехідного процесу можна наближено розв'язати на основі аналізу енергетичних співвідношень. На цьому оснований, так званий, спосіб площ.

9.3 Практичні критерії оцінки динамічної стійкості, основані на методі площ

Ці критерії базуються на декількох важливих поняттях. Першим з них є кутова (динамічна) характеристика потужності, яка при відмічених вище допущеннях має вигляд:

$$P = \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta, \quad (9.6)$$

де U – напруга приймальної системи;

X'_d – результуючий поздовжній взаємний опір між передавальною і приймальною частинами системи.

(При визначенні взаємного опору збуреного режиму, природно, враховується “аварійний шунт”.)

Геометричний вираз (9.6) в координатах P , δ є синусоїдою з амплітудою потужності P_m ,

$$P_m = \frac{E'_q U}{X'_d}. \quad (9.7)$$

Якщо різні сильні збурення по різному змінюють взаємний опір, то вони породжують множину синусоїд з різними амплітудами. Важливо відзначити, що збурені режими матимуть амплітуди менші, ніж початковий нормальний режим.

Оскільки в початковому нормальному режимі потужність первинного двигуна P_T і електромагнітна гальмівна потужність P рівні, то за (9.6) можна знайти кут нормального режиму δ_0 . Геометрично δ_0 відповідає перетину кутової характеристики потужності нормального режиму з прямою $P_T = \text{const}$ на висхідній частині синусоїди, рис 9.1.

Іншими важливими поняттями, на які спираються практичні критерії динамічної стійкості, є площадка прискорення, площадка гальмування і площадка можливого гальмування. Геометрично вони на рис. 9.1, відповідно, визначаються площами криволінійних фігур $abca$, $cd''d's$ та $cd''dd's$.

Відзначимо ще одне важливе поняття – критичний кут $\delta_{кр}$. На рис. 9.1 він відповідає перетину кутової характеристики потужності збуреного режиму з прямою $P_T = \text{const}$ на спадній частині синусоїди.

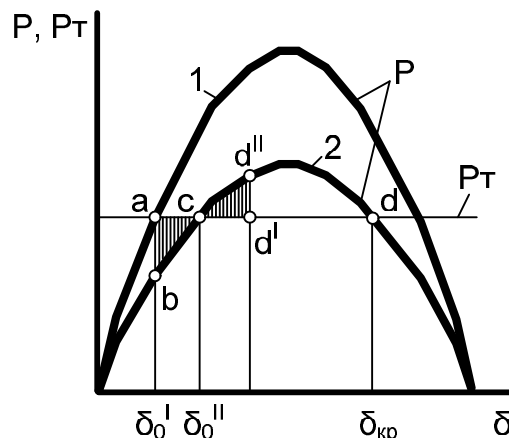


Рисунок 9.1 – Кутові характеристики потужності для нормального (1) та збуреного (2) режимів

Якщо дійсний кут перевищить кут $\delta_{кр}$, то на ротор діятимуть сили прискорення і відбудеться аперіодичне порушення динамічної стійкості.

Упевненість в стійкості буде, очевидно, тоді, коли при коливаннях ротор не досягне критичного положення (точка d), за яким почнеться прогресуюче збільшення кута. Це стається, якщо вся енергія, одержана при прискоренні ротора (площадка $A_{приск.} = abca$), врівноважується

енергією гальмування (площадка $A_{\text{гальм.}} = cd''d'c$) до критичної точки. В цьому випадку площадка можливого гальмування ($A_{\text{можл. гальм.}} = cd''dd'c$) буде більшою від площадки прискорення:

$$\Delta A = A_{\text{можл. гальм.}} - A_{\text{приск.}} \quad (9.8)$$

За знаком ΔA можна судити про стійкість динамічного переходу. Вона ж є кількісною мірою запасу динамічної стійкості:

$$k = \frac{A_{\text{можл. гальм.}}}{A_{\text{приск.}}} = \frac{A_{\text{приск.}} + \Delta A}{A_{\text{приск.}}} = 1 + \frac{\Delta A}{A_{\text{приск.}}} \quad (9.9)$$

Коли: $k > 1$ – перехід стійкий;

$k = 1$ – критичний випадок;

$k < 1$ – перехід нестійкий.

Якщо перехід нестійкий, то для збереження стійкості потрібно повертатися в початковий режим або в інший легший збурений режим. Так виникає завдання визначення граничного кута вимкнення, а для інженерної реалізації – завдання граничного часу вимкнення.

9.4 Ідеї методу послідовних інтервалів для інтегрування рівняння руху синхронної машини

Метод послідовних інтервалів здійснює числове інтегрування рівняння руху синхронного генератора у вигляді $\delta = \delta(t)$ шляхом послідовного розгляду ділянок (інтервалів) перехідного процесу.

Тривалість інтервалів часу Δt вибирається, по можливості, настільки малою, щоб за цей інтервал надлишок потужності, а значить, і прискорення ротора можна було б вважати незмінним. Це ключове положення дає можливість використовувати на інтервалі закономірності рівномірно прискореного руху.

Кожен інтервал, в цьому випадку, може характеризуватися деякими значеннями початкових і кінцевих величин кута, прискорення, надлишкової потужності, швидкості, а також середніми значеннями швидкості і прискорення в межах інтервалу. Очевидно, що при послідовному розгляді інтервалів має місце таке: початкові значення величин, що визначаються, на кожному інтервалі дорівнюють кінцевим їх значенням на попередньому інтервалі.

При ручному рахунку тривалість інтервалу часто приймають таким:

$$\Delta t = 0,05 \text{ с.}$$

При машинному рахунку цю тривалість зменшують, бо має місце зв'язок точності розв'язку з довжиною інтервалу.

При інтегруванні за основу береться рівняння руху у вигляді (9.5), де використовуються такі вимірності:

$$\begin{aligned} t & - \text{с}; \\ T_j & - \text{с}; \\ \delta & - \text{ел. град.}; \\ f & - \text{Гц}. \end{aligned}$$

Тоді прискорення

$$\alpha = \frac{360 f}{T_j} \Delta P \quad (9.10)$$

має вимірність ел. град./с².

Алгоритм розрахунку за методом послідовних інтервалів

1. Визначити потужність, що розвивається генератором на початок *i*-го інтервалу:

$$P_{i-1} = P_m \sin \delta_{i-1}, \quad (9.11)$$

де P_m амплітуда потужності

$$P_m = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}}$$

(іноді вважають для спрощення $E'_q = E'$).

2. Визначити надлишок потужності на початок *i*-го інтервалу:

$$\Delta P_{i-1} = P_T - P_{i-1} \quad (9.12)$$

3. Визначити приріст кута $\Delta\delta$ вибігу ротора за час *i*-го інтервалу:

$$\Delta\delta_i = \Delta\delta_{i-1} + pK \Delta P_{i-1}, \quad (9.13)$$

де $p = \begin{cases} 0.5 \\ 1 \end{cases}$ – для першого інтервалу
– для всіх інших;

$$K = \frac{360 f \Delta t^2}{T_j} \quad \text{– коефіцієнт.}$$

4. Визначити нове значення кута в кінці інтервалу, що досліджується:

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \Delta\delta_i, \quad (9.14)$$

Викладений алгоритм може бути уточнений і розвинений із врахуванням ряду обставин.

1. При стрибкоподібній зміні надлишку потужності всередині інтервалу, він вводиться в (9.13) як напівсума надлишків потужності;

2. При врахуванні реакції статора і АРЗ, потужність за (9.11) визначається із врахуванням зміни в перехідному процесі .

9.5 Характеристика програми DYNAM для перевірки динамічної стійкості

Програма реалізує метод послідовних інтервалів, викладений в попередньому розділі, стосовно простої системи “станція – шини незмінної напруги”.

Програма DYNAM дозволяє за бажанням користувача одержати перехідний процес в одному-двох або декількох циклах гойдань. Склад зовнішньої інформації для роботи програми, послідовність і формати її введення видно з нижченаведеного фрагмента:

```
read(5,1)m,e,d0,k,tv,u,p0
read(5,2)(x(i),i=1,m)
read(5,3)(dt(i),i=1,m)
1 format(i2,4f8.5,2f5.3)
2 format(8f8.4)
3 format(8f7.4)
```

Де:

m – кількість режимів (етапів перехідного процесу), дорівнює числу збурених режимів плюс один;

e – перехідна ЕРС нормального режиму, що передує;

$d0$ – початкове значення кута δ , градуси;

k – константа, що згадана на кроці 3 алгоритму розділу 9.4;

tv – довжина кроку за часом, с.;

u – напруга на шинах приймальної системи, в. о.;

$p0$ – потужність нормального режиму, що передається, в. о.;

$x(i)$ – i -а компонента масиву взаємних опорів, вимірністю m , в. о.;

$dt(i)$ – i -а компонента масиву вимірністю m часу перебування системи в кожному режимі.

Вихідною інформацією програми DYNAM є таблиця з поточним часом і таким набором параметрів, які відповідають йому:

- поточне значення кута, ел. гр.;
- приріст кута, ел. град;
- поточне значення потужності, в. о.;
- приріст потужності, в. о..

Розглянемо роботу програми на такому невеликому прикладі.

ПРИКЛАД 9.1 Нехай задана система, яка зображена на рис. 9.2, і потрібно перевірити її динамічну стійкість при однофазному короткому замиканні на початку одного кола ЛЕП в двох випадках:

- однофазне коротке замикання самоліквідується через 0,1 с;

- однофазне коротке замикання відключається через 0,5 с і система переходить в післяаварійний режим роботи одним колом.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

Комплексна заступна схема аварійного режиму разом зі своїми параметрами представлена на рис. 9.3

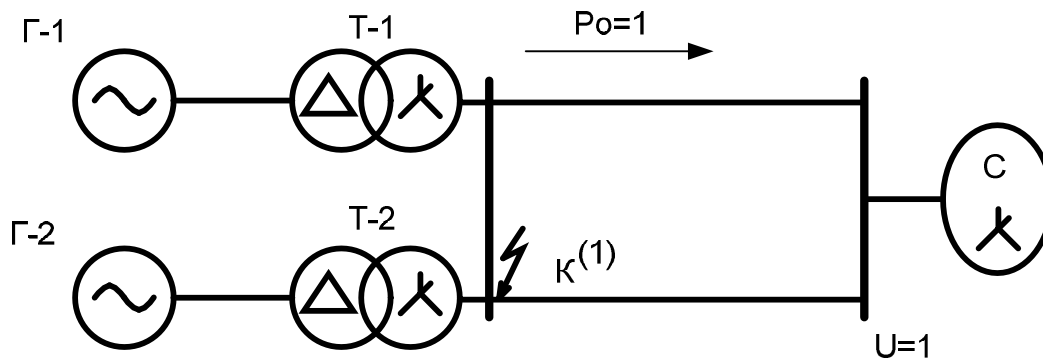


Рисунок 9.2 – Схема енергосистеми, що досліджується

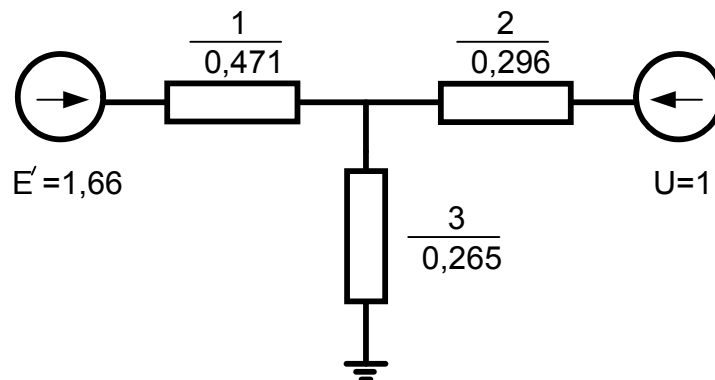


Рисунок 9.3 – Результуюча комплексна заступна схема

З розрахунку попереднього нормального режиму відомо, що $\delta_0=27,5$ ел. град, коефіцієнт $k = 4,787$. З розрахунків також відомі взаємні опори аварійного і післяаварійного (з одним колом) режимів і вони, відповідно, дорівнюють:

$$X_{B3}^{АВАР.} = 0,471 + 0,296 + \frac{0,471 \cdot 0,296}{0,265} = 1,2931;$$

$$X_{B4}^{П.} = 1,064.$$

В табл. 9.1 приведені результати розрахунку першої підзадачі.

Таблиця 9.1 – Дослідження динамічного переходу при однофазному короткому замиканні, що самоусунулося через 0.1 с.

Файл даних для роботи програми DYNAM:

2 1.6600027.50000 4.78700 .050001.0001.000

1.2931 .7670

.1000 1.0000

Амплітуда потужності, що передається, $P_m(1) = 1.28374$

Амплітуда потужності, що передається, $P_m(2) = 2.16428$

Критичний кут – $D_{кр} = 152.50000$

N	Час, сек.	Поточне знач. кута, ел. град	Приріст кута, ел. град	Поточне знач. потужн., в. о.	Приріст потужн., в. о.
0	0.00	27.50000	–	1.00000	–
1	.05	28.47472	.97472	.61205	.40724
2	.10	31.30657	2.83185	.66705	.38795
3	.15	34.76876	3.46219	1.23421	-.12459
4	.20	37.10978	2.34102	1.30580	-.23421
5	.25	37.98691	.87714	1.33207	-.30580
6	.30	37.27442	-.71249	1.31076	-.33207
7	.35	35.07433	-2.20009	1.24368	-.31076
8	.40	31.70777	-3.36657	1.13752	-.24368
9	.45	27.68291	-4.02485	1.00547	-.13752
10	.50	23.63185	-4.05106	.86757	-.00547
11	.55	20.21474	-3.41711	.74784	.13243
12	.60	18.00471	-2.21003	.66897	.25216
13	.65	17.37933	-.62538	.64646	.33103
14	.70	18.44633	1.06701	.68481	.35354
15	.75	21.02214	2.57581	.77639	.31519
16	.80	24.66839	3.64624	.90329	.22361
17	.85	28.77756	4.10917	1.04190	.09671
18	.90	32.68613	3.90857	1.16879	-.04190
19	.95	35.78672	3.10058	1.26560	-.16879
20	1.00	37.61586	1.82914	1.32100	-.26560
21	1.05	37.90839	.29253	1.32973	-.32100
22	1.10	36.62249	-1.28590	1.29108	-.32973
23	1.15	33.94320	-2.67929	1.20847	-.29108

Тут же можна бачити організацію файлу даних.

В табл. 9.2 представлений розв'язок другої підзадачі.

Таблиця 9.2 – Дослідження перехідного процесу при однофазному короткому замиканні, що відключається через 0.5с., з виходом на післяаварійний одноколовий режим роботи

Файл даних для роботи програми DYNAM:

2 1.6600027.50000 4.78700 .050001.0001.000
1.2931 1.0640
.5000 .3000

Амплітуда потужності, що передається, $P_m(1) = 1.28374$

Амплітуда потужності, що передається, $P_m(2) = 1.56015$

Критичний кут – $D_{кр} = 152.50000$

N	Час, сек.	Поточне знач. кута, ел. гр.	Приріст кута, ел. гр.	Поточне знач. потужн., в. о.	Приріст потужн., в. о.
0	0.00	27.50000	–	1.00000	–
1	.05	28.47472	.97472	.61205	.40724
2	.10	31.30657	2.83185	.66705	.38795
3	.15	35.73224	4.42567	.74970	.33295
4	.20	41.35610	5.62386	.84821	.25030
5	.25	47.70657	6.35047	.94959	.15179
6	.30	54.29834	6.59178	1.04248	.05041
7	.35	60.68677	6.38843	1.11936	-.04248
8	.40	66.50381	5.81704	1.17730	-.11936
9	.45	71.47212	4.96832	1.21720	-.17730
10	.50	75.40070	3.92858	1.24229	-.21720
11	.55	77.58927	2.18857	1.52369	-.50978
12	.60	77.27092	-.31835	1.52181	-.52369
13	.65	74.45468	-2.81624	1.50308	-.52181
14	.70	69.23021	-5.22447	1.45876	-.50308
15	.75	61.80965	-7.42056	1.37509	-.45876
16	.80	52.59354	-9.21611	1.23930	-.37509

Обидва розв'язки організовані так, щоб розрахунки проводилися в 1-2 циклах кожен. З сумісного розгляду таблиць видно, що в першому і другому випадках зберігається динамічна стійкість, оскільки в жодному з них максимальний виліт ротора узагальненого генератора не досягає критичного кута. Ця ж теза про збереження стійкості може бути підтверджена тим, що кути, досягнувши найбільшого значення, потім убувають. Це означає, що в наступних циклах гойдань, зважаючи на дію демпфуючих чинників, відбудеться перехід до сталого режиму.

Із сумісного розгляду таблиць також видно, що збурювальний імпульс в другому випадку більший, це і зумовлює більше значення кута, що якісно можна бачити з побудови площадок прискорення.

9.6 Нове розв'язування рівняння руху синхронної машини при сильних збуреннях

В задачах розрахування динамічної стійкості енергосистем синхронні машини, як правило, представляються повними або спрощеними рівняннями Парка-Горєва в диференціальному або операторному вигляді. Ступінь і види спрощення математичного опису залежать від цілей розрахунку, схеми електричної системи і необхідності врахування конструкції генератора, систем АРЗ генераторів та АРШ турбін. Складовою частиною цього математичного опису є рівняння руху ротора.

Якщо знехтувати деталями, то можна зупинитися на такій математичній моделі руху синхронної машини при сильних збуреннях:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P_m \sin \delta, \quad (9.15)$$

де T_J – постійна механічної інерції турбоагрегату, радіани;

δ – кут між віссю q і вектором U , який має проєкції U_d і U_q , радіани;

t – час, радіани;

P_T – потужність турбіни, в. о.;

P_m – амплітуда електромагнітної потужності генератора, відносні одиниці.

Залежність (9.15) відображає той факт, що прискорення ротора синхронної машини прямо пропорційне надлишку моменту і обернено пропорційне до механічної інерції турбогенератора. Різні уточнення, пов'язані з урахуванням АРЗ і АРШ, демпферних обмоток і т. д., знаходять віддзеркалення в компонентах правої частини (9.15), не міняючи принципової суті рівняння руху.

Загальноприйнятим традиційним способом розв'язування рівняння (9.15) є використання, так званого, методу послідовних інтервалів [8]. Створений на початку 30-х років для ручного рахунку, цей метод майже без змін був перенесений на статичні моделі, а пізніше на ЕОМ і реалізований в багаточисленних програмах. Його фундаментальні недоліки полягають в уявленні про незмінність основних параметрів на інтервалі, нестрогому сполученні окремих етапів перехідного процесу, що відрізняються важкістю збурень, і відсутністю контролю точності. Не дивлячись на це, багаточисленними експериментальними дослідженнями підтверджується його збіжність з реальністю.

Разом з тим, доцільно звернути увагу на успіхи чисельних методів інтегрування звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, які базуються на різницевих схемах. Методи Адамса, Рунге-Кутта, Мерсона та ін. дозволяють знаходити “передбачений” і “виправлений” розв'язки, які

відрізняються не більше, ніж на наперед задану величину. Це досягається за рахунок зміни кроку.

Важливим моментом є те, що відмічені вище методи, розповсюджуються і на системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Проте рівняння (9.15) є рівнянням другого порядку і це, можливо, стало причиною того, що до його інтегрування не застосовувались сучасні різницеві методи.

Слід звернути увагу на ключову, для даного питання, теорему існування:

“будь-яке рівняння n-го порядку

$$y^{(n)} = F(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$$

введенням нових змінних

$$y_1 = y', y_2 = y'', \dots, y_{n-1} = y^{(n-1)}$$

може бути зведено до системи n рівнянь

$$\frac{dy}{dx} = y_1, \frac{dy_1}{dx} = y_2, \dots, \frac{dy_{n-1}}{dx} = F(x, y, y_1, \dots, y_{n-1})",$$

з якої виходить сама можливість представлення рівняння руху синхронної машини системою двох звичайних диференціальних рівнянь першого порядку.

Введемо в розгляд такі нові змінні:

$$\delta = y_1; \tag{9.16}$$

$$\delta' = y_2, \tag{9.17}$$

де $\delta' = \frac{d\delta}{dt}$.

Рівняння (9.15) перепишемо так:

$$T_J \delta'' + P_m \sin y_1 - P_T = 0; \tag{9.18}$$

$$\delta'' = \frac{1}{T_J} (P_T - P_m \sin y_1). \tag{9.19}$$

З (9.17) $\delta'' = y_2'$. Прирівняємо праві частини (9.18) і (9.19):

$$y_2' = \frac{1}{T_J} (P_T - P_m \sin y_1). \tag{9.20}$$

З (9.16):

$$\delta' = y_1'. \tag{9.21}$$

Прирівняємо праві частини (9.17) і (9.21):

$$y_1' = y_2. \tag{9.22}$$

Представимо (9.22) і (9.20) як систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, розв'язаних відносно похідних нових змінних:

$$\begin{cases} y_1' = y_2 \\ y_2' = \frac{1}{T_J} (P_T - P_m \sin y_1) \end{cases} \tag{9.23}$$

Для всіх компонент (9.23) єдиним загальним аргументом є час t .

До системи рівнянь (9.23) вже можна застосовувати сучасні різницеві методи чисельного інтегрування і стандартні програми, які реалізують ці методи. Зокрема, при порівняльному тестуванні, разом з програмами методу послідовних інтервалів були використані такі стандартні програми:

- ode23 пакету MATLAB;
- ode45 пакету MATLAB;
- rkgs пакету SSP;
- drkgs пакету SSP;
- sysdif та ін.

Нижче приведені схеми звернення до деяких з них:

```
[t,y]=ode23(f,t0,tfinal,y0,tol,trace);  
[t,y]=ode45(f,t0,tfinal,y0,tol,trace);  
call rkgs(prmt,y,dery,ndim,ihlf,fct,outp,aux);  
call drkgs(prmt,y,dery,ndim,ihlf,fct,outp,aux);
```

де f – рядкова функція від t, y ;

t_0 – початкове значення аргумента;

t_{final} – кінцеве значення аргумента;

y_0 – вектор-стовпець початкових значень функцій;

tol – точність;

$trace$ – код виведення на друк;

$prmt$ – вектор, що містить початкове, кінцеве значення інтервалу, крок незалежної змінної і граничну помилку;

y – вектор початкових значень функцій;

$dery$ – спочатку вектор ваги помилок, а потім – похідних;

$ndim$ – число рівнянь в системі;

$ihlf$ – код повернення;

fct – підпрограма-функція, яка задає праві частини (9.23);

$outp$ – підпрограма виведення;

aux – службова матриця вимірністю $(8 \cdot ndim)$.

В розрахунках перехідних процесів необхідно ретельно підійти до формування початкових умов. В розв'язку (9.15) за методом послідовних інтервалів вони очевидні – початок збурення відноситься до $t = 0$, а значення кута для цього часу визначається за попереднім сталим режимом.

В моделі (9.23) для $t = 0$ слід дати дві початкові умови (за кількістю рівнянь в системі) – для y_1 і y_2 . При введенні цих нових змінних їх зміст у відповідності до (9.16) і (9.17) стає зрозумілим – y_1 відповідає куту, а y_2 – швидкості його зміни. Оскільки в попередньому сталому режимі швидкості зміни кута немає, для $t = 0$, слід прийняти $y_2 = 0$. Значення y_1 , як і раніше, визначається з незбуреного сталого режиму.

Важливою перевагою моделі (9.23) є її легка адаптація до багатоетапних перехідних процесів, кожний з етапів яких може розрізнятися силою збурювальної дії. Якщо в методі послідовних інтервалів використовують напівсуми збурювальних дій на інтервалі, то в розв'язуванні за моделлю (9.23) можна забезпечити строге припасування наступного розв'язку до попереднього. Це досягається зміною початкових умов чергового етапу перехідного процесу, які повинні дорівнювати результатам кінця попереднього етапу. Як наголошувалося вище, в початкові умови входять кут і швидкість його зміни. Зрозуміло, що зв'язок за двома параметрами сприяє підвищенню точності розв'язку.

Проілюструємо викладені міркування на гіпотетичному прикладі дослідження перехідного процесу при пофазному успішному АПВ після однофазного короткого замикання в деякій системі.

Нехай у даному завданні має місце наступна послідовність збурювальних дій з параметрами (потужність у в. о.):

- доаварійний режим – $P = 1$, $P_m = 2.63158$, $\delta = 9.5$ ел. гр.;
- перший етап – $P_m = 1.54110$ $t = 0.00 \dots 0.10$ с.;
- другий етап – $P_m = 2.11268$ $t = 0.10 \dots 0.45$ с.;
- третій етап – $P_m = 2.26891$ $t = 0.45 \dots 0.80$ с.;
- четвертий етап – $P_m = 2.44565$ $t = 0.80 \dots 1.15$ с.;
- п'ятий етап – $P_m = 2.63158$ $t = 1.15 \dots 1.45$ с.

Нижче наводяться деякі результати тестування у цьому завданні моделі (9.15) з використанням методу послідовних інтервалів і моделі (9.23), інтегрування якої здійснювалося з використанням програми RKGS методом Рунге-Кутта-Гіля. Тестові розрахунки проводилися при різних кроках по незалежній змінній часу для перевірки чутливості розв'язків до цього чинника.

Розрахунки за моделлю (9.23) були виконані спочатку із точним припасуванням розв'язків на етапах, а потім без припасування, тобто так, як в методі послідовних інтервалів. Перший з цих розв'язків було названо розв'язком високої точності і прийнято за еталон при всіх порівняннях. Підставою для цього було таке:

- логічна несуперечність моделі (9.23) приведеній вище теоремі існування;
- застосування принципу припасування як найбільш довершеного механізму узгодження етапів динамічних процесів;
- перетворення в тотожність рівнянь (9.23) з точністю до восьмого знака після десятиричної крапки на кожній ітерації.

Для ілюстрації еталонного розв'язування нижче приводяться вихідний лістинг для першого етапу, фрагмент файлу даних для другого етапу, де можна бачити механізм припасування, і графічне представлення, рис. 9.4, всього перехідного процесу.

Вихідний лістинг розв'язку першого етапу перехідного процесу
 Ф а й л д а н и х п р о г р а м и DYNAMSYS
 для першого етапу перехідного процесу ($t = 0 - 0.1$ с)

```

2
.00000 .10000 .01000 .00100
9.50000 .00000
.50000 .50000
  
```

Інтегрування методом Рунге-Кутта-Гіля

АРГУМЕНТ	АРГУМЕНТ	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ	
t, рад.	t, с.	deryvdel	delta, град
.00000	.0000	.00000	9.50000
3.14159	.0100	.00056	9.55082
6.28319	.0200	.00113	9.70311
9.42478	.0300	.00169	9.95632
12.56637	.0400	.00224	10.30952
15.70796	.0500	.00278	10.76144
18.84956	.0600	.00332	11.31047
21.99115	.0700	.00384	11.95461
25.13274	.0800	.00435	12.69156
28.27434	.0900	.00484	13.51867
31.41593	.1000	.00532	14.43300
31.41593	.1000	.00532	14.43300
31.41593	.1000	.00532	14.43300

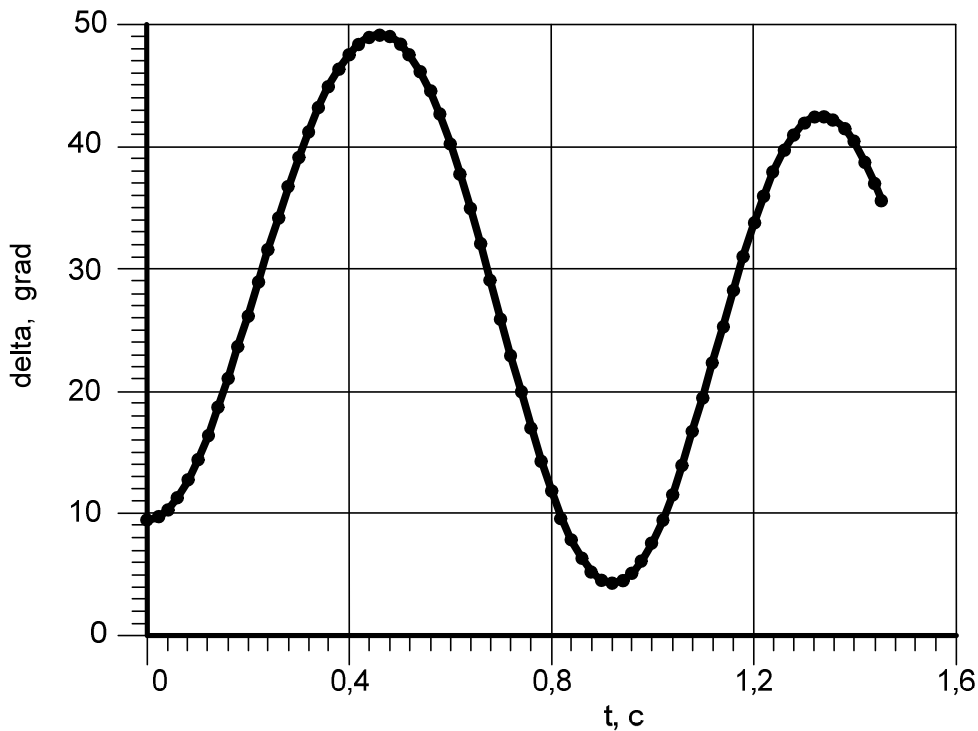


Рисунок 9.4 – Траєкторія динамічного процесу $\delta = \delta(\tau)$

Файл даних програми DYNAMSYS
для другого етапу перехідного процесу ($t = 0.1 - 0.45$ с.)

2
.10000 .45000 .01000 .00100
14.43300 .00532
.50000 .50000

Приступаючи до порівняння розв'язків, звернемося до табл. 9.3, де для характерних моментів часу перехідного процесу приведені розраховані значення кута.

Таблиця 9.3 – Порівняльна оцінка результатів розрахунку п'ятиетапного перехідного процесу при довжині інтервалу (кроку) 0,01 с.

Час t , с.	Розв'язок за моделлю (9.23) при строгому припасовуванні δ , ел. град.	Розв'язок за моделлю (9.23) без процедури припасовування δ , ел. град.	Розв'язок за моделлю (9.15) методом послідовних інтервалів δ , ел. град.
0.00	9.50000	9.50000	9.50000
0.10	14.43300	14.43300	14.43431
0.45	49.27640	49.15898	49.40110
0.80	12.07953	11.88322	11.60871
1.15	26.65006	26.91055	27.12872
1.45	35.95931	35.81848	34.79567

З табл. 9.3 і рис. 9.4 видно, що розв'язок за моделями (9.15) і (9.23) приводять до одного і того ж висновку про стійкість системи при заданих збуреннях, але кількісні оцінки відрізняються, причому розв'язок за методом послідовних інтервалів дає суттєві помилки. Це твердження ще очевидніше в табл. 9.4, де приведені абсолютні значення відхилень від еталонного розв'язку.

Таблиця 9.4 – Порівняльна оцінка відхилень від еталонного розв'язку

Час t , с.	Розв'язок за моделлю (9.23) без процедури припасовування δ , ел. град.	Розв'язок за моделлю (9.15) методом послідовних інтервалів δ , ел. град.
1	2	3
0.00	0.00000	0.00000
0.10	0.00000	0.00131
0.45	0.11742	0.12470

Продовження таблиці 9.4

1	2	3
0.80	0.19631	0.47082
1.15	0.26049	0.47866
1.45	0.14083	1.16364

При такому твердженні природні відмінності у визначенні максимальних і мінімальних кутів в перехідному процесі, що зручно прослідкувати в табл. 9.5.

Таблиця 9.5 – Порівняльна оцінка екстремумів в 1 – 2-х циклах гойдань при довжині інтервалу (кроку) 0,01 с.

Номер циклу гойдань	Розв'язок за моделлю (9.23) при строгому припасовуванні delta, ел. град.		Розв'язок за моделлю (9.23) без процедури припасовування delta, ел. град.		Розв'язок за моделлю (9.15) методом послідовних інтервалів delta, ел. град.	
	max	min	max	min	max	min
1	49.35635	4.30041	49.21620	4.32197	49.44606	4.08860
2	42.55384	–	42.61591	–	42.96432	–

Важливу для практики характеристику – вплив кроку інтегрування (довжини інтервалу) можна побачити в табл. 9.6, де те ж саме тестове завдання розв'язувалося з більшим, ніж раніше, кроком.

Таблиця 9.6 – Порівняльна оцінка впливу довжини інтервалу (кроку) при $t = 0.05$ с. з розв'язком високої точності

Час t , с.	Розв'язок високої точності при кроці 0.01 с delta, ел. град.	Розв'язок за моделлю (9.23) без процедури припасовування delta, ел. град.	Розв'язок за моделлю (9.15) методом послідовних інтервалів delta, ел. град.
0.00	9.50000	9.50000	9.50000
0.10	14.43300	14.43260	14.45628
0.45	49.27640	49.31752	49.57608
0.80	12.07953	11.85294	11.27901
1.15	26.65006	26.82538	27.15299
1.45	35.95931	35.96306	38.18484

Цей чинник ще зручніше розглянути в табл. 9.7, де приведені абсолютні значення відхилень від еталонного розв'язку.

Таблиця 9.8 – Порівняльна оцінка відхилень при $t=0.05$ с. із розв'язком високої точності

Час t , с.	Розв'язок за моделлю (9.23) без процедури припасовування δ , ел. град.	Розв'язок за моделлю (9.15) методом послідовних інтервалів δ , ел. град.
0.00	0.00000	0.00000
0.10	0.00004	0.02328
0.45	0.10120	0.29968
0.80	0.22659	0.80052
1.15	0.17532	0.50293
1.45	0.00375	2.22553

Із сумісного розгляду табл. 9.4 і табл. 9.5 видно, що розв'язок за моделлю (9.23) слабо чутливий до довжини кроку, а розв'язок за методом послідовних інтервалів істотно залежить від величини інтервалу. У першому випадку це, очевидно, пояснюється тим, що зв'язок подальшого кроку з попереднім здійснюється через два параметри – кут і похідну кута, тоді, як в методі послідовних інтервалів, через один параметр – кут.

В зв'язку з викладеним, можна зробити такі висновки.

1. Модель (9.23) адекватно відображає процес руху синхронної машини при сильних збуреннях.
2. Розв'язок за моделлю (9.23), на основі різницевих схем і процедури строгого припасування, є розв'язком високої точності.
3. Розв'язок за моделлю (9.23), на основі різницевих схем без використання процедури припасування, є точнішим, порівняно з розв'язком за методом послідовних інтервалів.
4. Модель (9.23) слабо чутлива до довжини кроку інтегрування.

Завдання для самостійної роботи

1. Які із наведених співвідношень можуть мати місце при суттєвих збуреннях електроенергетичної системи, а які ніколи:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{приск}} &= A_{\text{гальм}}; & A_{\text{приск}} &= A_{\text{можл. гальм}}; \\
 A_{\text{приск}} &> A_{\text{гальм}}; & A_{\text{приск}} &> A_{\text{можл. гальм}}; \\
 A_{\text{приск}} &< A_{\text{гальм}}; & A_{\text{приск}} &< A_{\text{можл. гальм}};
 \end{aligned}$$

2. Чи враховує при розрахунках роботу АРЗ генераторів метод послідовних інтервалів, що розглядався? Якщо ні, то запропонуйте як це зробити.

3. Те саме, демпферних обмоток генераторів.

4. Як впливає збільшення часу вимкнення однофазного короткого замикання в прикладі 9.1 на величину критичного кута і кута максимального вильоту ротора?

10 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ Simulink

10.1 Коротка характеристика системи

Система Simulink, яка є частиною пакету MATLAB, дає можливість, так званого, блокового моделювання систем різного призначення, у тому числі і систем електроенергетики. *Під терміном блокового моделювання умовимося вважати процес синтезу структури досліджуваної системи у вигляді окремих блоків, що математично реалізують відповідні елементи структури.*

Сама математична реалізація прихована від користувача і це можна оцінювати по-різному. З одного боку, користувач може не входити в тонкощі математичного опису елемента структури, повністю довіритися розробникам і це багато хто вважає перевагою системи Simulink. Для інших це може вважатися недоліком, оскільки користувач значною мірою (але не повністю!) позбавлений можливості коректувати математичний опис елемента. Не дивлячись на таку подвійність в оцінці системи Simulink, вона широко використовується дослідниками для вивчення і візуалізації процесів, що відбуваються в системі, та для прийняття рішень з подальшого її вдосконалення за рахунок зміни структури та (або) параметрів.

Оскільки синтезована блокова модель є невидимою для дослідника комбінацією систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь, то для роботи з такою моделлю повинні бути “під рукою” і відповідні блоки та програмні продукти. Зокрема, для енергетичних досліджень в системі Simulink є пакет розширень Power System Blockset, який містить ряд бібліотек. Сам пакет можна виявити в Simulink Library Browser, якщо відкрити директорію SimPowerSystems. Вид її дерева представлений нижче на рис.10.1.

У бібліотеці Connectors зосереджені блоки, що здійснюють з'єднання окремих блоків, такі, наприклад, як шини, заземлення, кутові і Т-подібні зв'язки та ін.

Бібліотека Electrical Sources містить блоки однофазних і трифазних джерел електричної енергії, електричних джерел постійного струму і сигналів.

У досить об'ємній бібліотеці Elements знаходяться найважливіші блоки, з яких формується структура системи електропостачання - трансформатори, лінії, навантаження, вимикачі, короткозамикачі та ін.

В бібліотеці Machines зосереджені блоки синхронних і асинхронних машин, машин постійного струму, регуляторів, стабілізаторів і т.д.

Бібліотека Measurements містить блоки однофазних і трифазних засобів вимірювання струмів, напруг, опорів та ін.

В бібліотеці Power Electronics зосереджені блоки елементів претворювальної техніки - діоди, тиристори, ідеальні ключі і т.д.

Піддиректорія Extra Library включає ряд важливих бібліотек, пов'язаних з дискретною технікою в електроенергетиці, а також силовою і вимірювальною технікою трифазних систем. У цьому сенсі бібліотека Extra Library помітно розширює зміст раніше згаданих бібліотек.

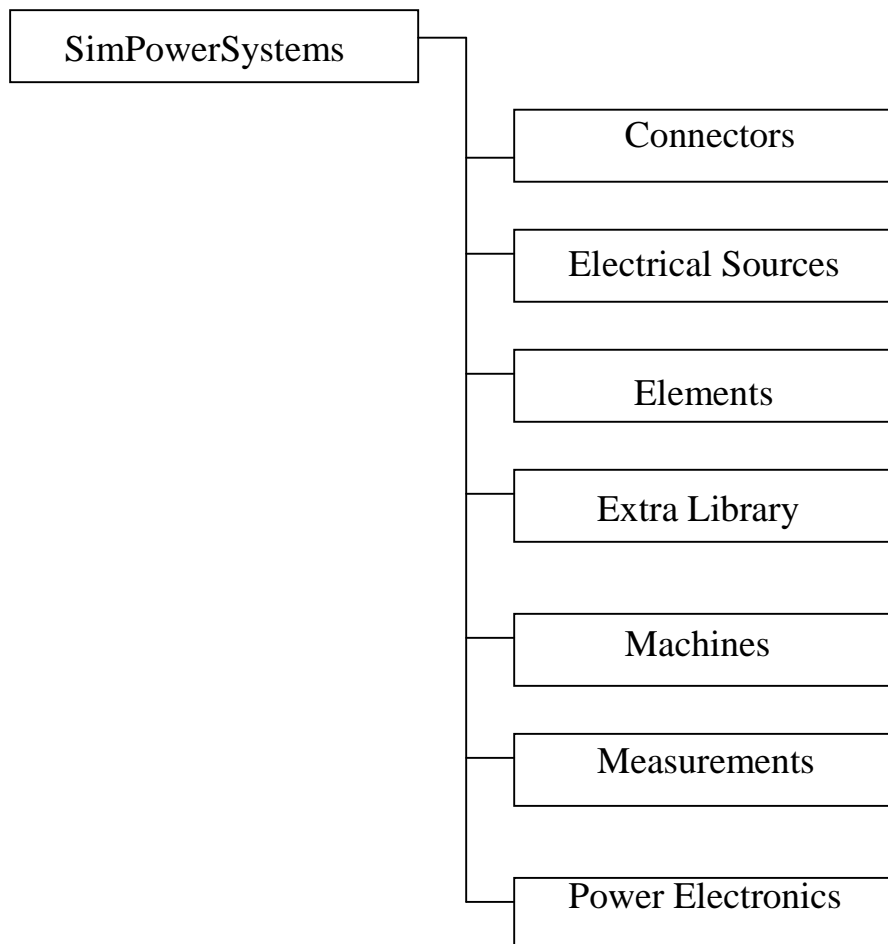


Рисунок 10.1 – Дерево директорій SimPowerSystems

Кожен блок, що знаходиться у відповідній бібліотеці, має мнемоніку, яка легко розпізнається, і це допомагає в пошуку потрібних блоків. Крім того, якщо мишею навести курсор на блок, що цікавить, і активізувати його одним клацанням, то з'являється коротка текстова довідка про нього. Енергетична ерудиція користувача в сукупності з мнемосхемою і довідкою зазвичай дають можливість зрозуміти призначення блока. Подвійне клацання мишею приводить до опису параметрів блока, які надалі доведеться налагоджувати під власні потреби. Все це в більшості випадків дає можливість користувачу з'ясувати яка електрична заступна схема лежить в основі блока і які рівняння (системи рівнянь) представляють математичний опис блока. Наприклад, звернення до блока синхронної

машини створює уявлення, що вона математично описується повними диференціальними рівняннями Парка-Горева в координатах d-q-0 для кіл статора і ротора.

Іноді блоки, яких не вистачає, наприклад, концентратори, підсилювачі сигналів і т.д., можна шукати в інших бібліотеках за межами директорії SimPowerSystems. Але особливої ваги набуває знайомство з системою допомоги, де сконцентровано безліч готових до виконання прикладів. Вивчення їх, запуск на виконання і подальший аналіз результатів дає необхідну інформацію користувачеві. Вийти на ці приклади можна після запуску Simulink шляхом послідовного вибору команд за такою схемою:

Help →
 Simulink Help →
 Demos →
 Simulink →
 SimPowerSystems.

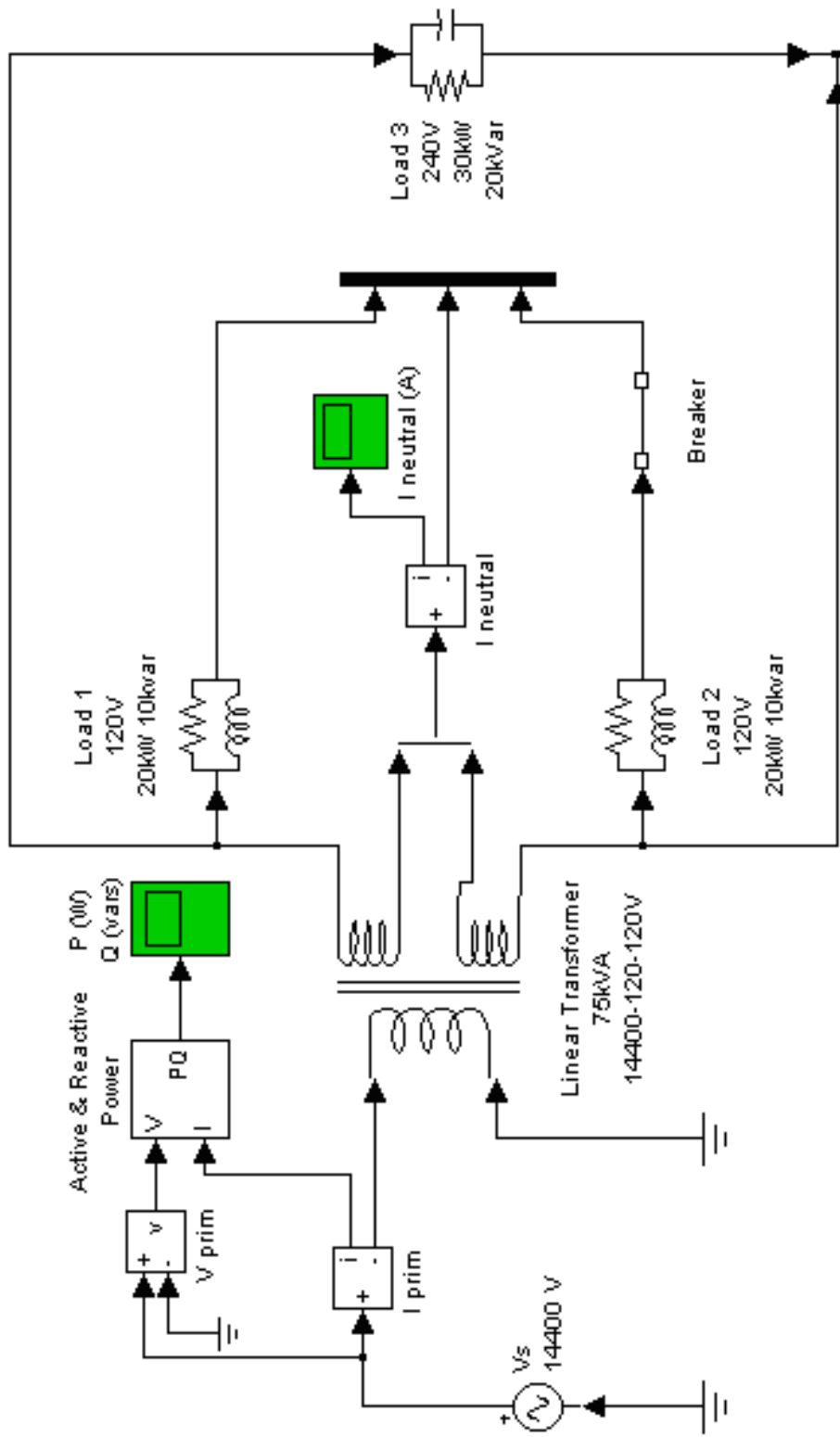
Вибір прикладу виконується клацанням мишею. У вікні, що з'явилося, слід активізувати приклад із назвою Open this model і приступити до вивчення моделі.

Виберемо для перегляду і першого знайомства приклад Linear Transformer. Блокова модель для нього представлена нижче на рис.10.2.

Бачимо, що об'єктом дослідження є режим в системі з однофазним триобмотковим трансформатором (Linear Transformer), що живиться від ідеального джерела синусоїдальної напруги (Vs) і працює на три однофазні навантаження (Load 1, Load 2, Load 3). Дві вторинні обмотки трансформатора мають загальну точку. Для керування другим навантаженням передбачений однофазний вимикач (Breaker). Загальна нейтраль вторинних обмоток трансформатора і вихідні кінці першого та другого навантажень під'єднані до збірних шин. На цьому перше знайомство з силовою частиною системи, яка досліджується, можна вважати таким, що відбулося.

Більш глибоке уявлення можна одержати після ознайомлення з параметрами силових елементів блокової моделі. Для цього послідовно вибираємо силові елементи і подвійним клацанням мишею відкриваємо вікно з параметрами елемента. На рис.10.3 виведено на фоні моделі вікно параметрів джерела живлення (Vs).

Для нього задано амплітудну напругу $14400 \cdot \sqrt{2}$ у Вольтах, фаза напруги 0 електричних градусів, частота 60 Гц і розрахунковий час початку роботи джерела живлення, 0 с. Аналогічно можна ознайомитися з параметрами інших силових елементів.



Powergui
-Continuous

Three-winding distribution transformer

Double click on the More Info button (?) for details



More Info

Рисунок 10.2 – Блокова модель однофазного триобмоткового трансформатора

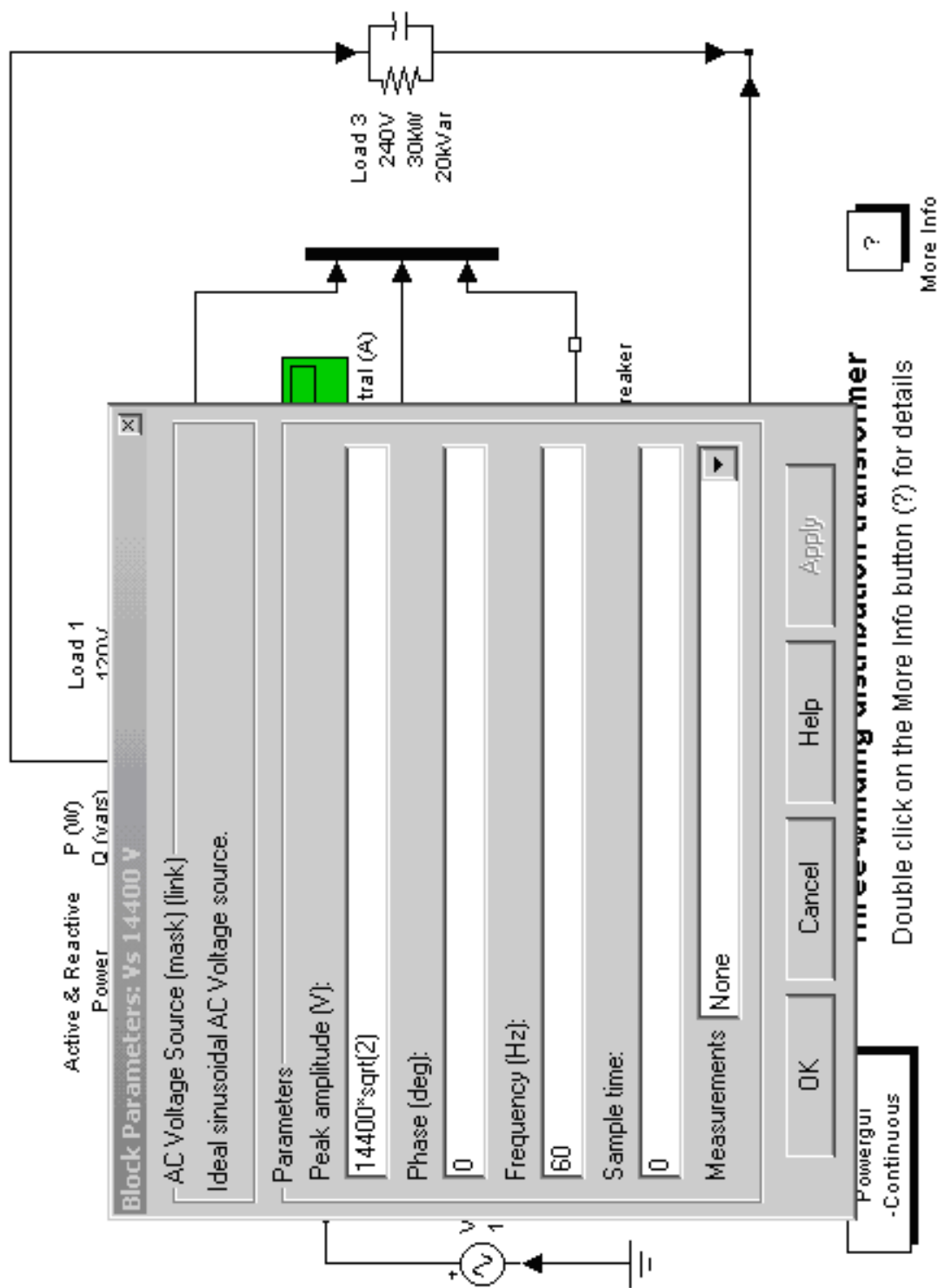


Рисунок 10.3 – Вікно параметрів джерела живлення

Після цього доцільно звернути увагу на засоби вимірювань, які передбачені в моделі. Бачимо, що найповніше вони передбачені для джерела живлення. Контролюються струм (I_{prim}), напруга (V_{prim}), активна і реактивна потужності (Active & Reactive Power), причому активна P (W) і реактивна Q ($vars$) потужності виводяться на віртуальний осцилограф. При заданій структурі системи, що досліджується, ці вимірювальні засоби відображають і параметри режиму первинної сторони силового трансформатора. У колах навантажень не передбачені будь-які засоби вимірювання. Між нейтральною точкою вторинних обмоток і збірними шинами під'єднано блок амперметра ($I_{neutral}$) з виходом на осцилограф ($I_{neutral}$ (A)). Звернемо увагу ще на один блок вимірювань і контролю - Powerqui, який явно не під'єднується до будь-якого кола, але відображає (якщо його активізувати клацанням миші) параметри всіх силових елементів моделі і параметри всіх засобів вимірювання, під'єднаних до моделі.

На цьому закінчимо знайомство з первинною і вторинною комутацією блокової моделі однофазного триобмоткового трансформатора системи електропостачання, що досліджується. Далі слід звернути увагу на програмний продукт, за допомогою якого досліджуватиметься режим в системі, і деякі, наприклад, тимчасові параметри роботи програми. Для цього треба активізувати опцію Simulation меню і вибрати вкладку Simulation parameters.... У висвіченому вікні спочатку обмежимося знайомством тільки з ім'ям програми (ode15s) та двома тимчасовими параметрами (Start time) і (Stop time), що задають час початку і кінця роботи програми. Бачимо, що дослідження режиму відбуватиметься на інтервалі часу 0 ... 0,2 с.

Звичайно, доцільно детальніше познайомитися з програмним продуктом, зокрема дізнатися який метод інтегрування диференціальних рівнянь там використовується, які параметри точності закладені в програмі і т.д. Це можна зробити, якщо в головному вікні MATLAB ввести команду

```
>> help ode15s,
```

але для першого знайомства з моделлю це можна відкласти на пізніше.

Тепер настав час познайомитися з роботою програми, для цього необхідно направити на виконання блокову модель, що вивчається. Це можна зробити шляхом вибору команди Start з опції Simulation лінійки меню або використанням значка ► (Start simulation), розташованого під лінійкою меню.

Через деякий час (після закінчення роботи програми) можна активізувати подвійним клацанням миші блоки осцилографів і побачити перехідні процеси на інтервалі часу, який передбачений при налагодженні програми. При аналізі осцилограм можна виявити, що до моменту увімкнення вимикачем (Breaker) другого навантаження ($t = 0,05$ с) струму в нейтралі немає, бо перше і третє навантаження живиться іншими колами.

Бажано проаналізувати хід перехідного процесу за осцилограмами активної і реактивної потужностей. Тут можна встановити тривалість перехідного режиму при ввімкненні першого і третього навантажень, вихід на сталий режим, а після ввімкнення вимикача другого навантаження - нові параметри перехідного процесу і сталого режиму. Це можна побачити на рис.10.4.

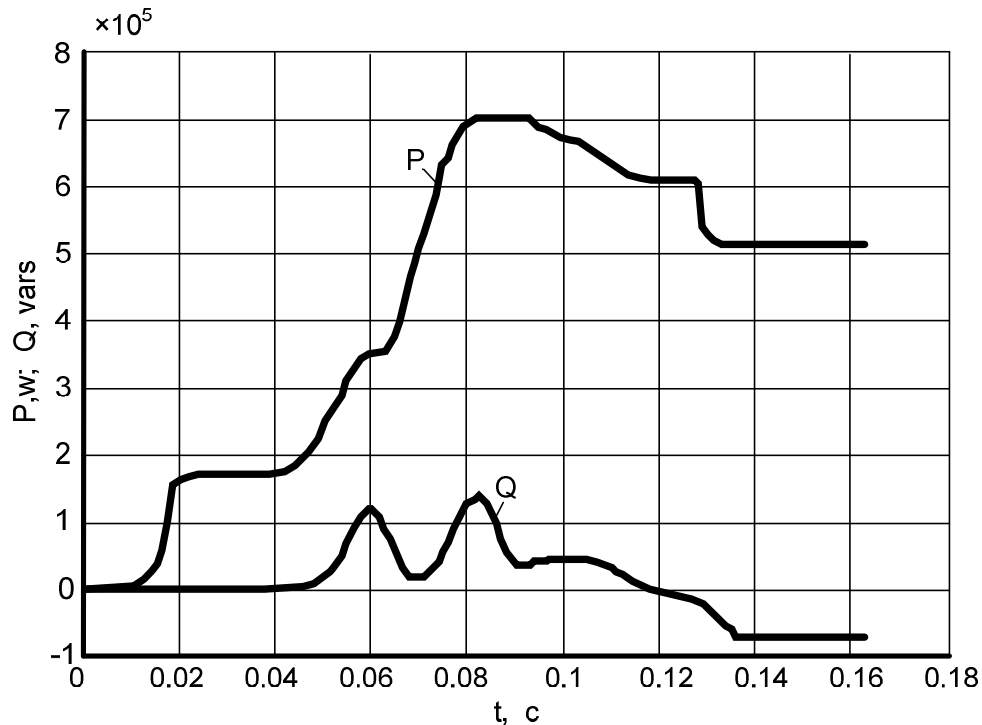


Рисунок 10.4 – Осцилограми ходу перехідного процесу активної і реактивної потужностей

Кількісну інформацію про результати роботи моделі можна отримати з блока вимірювань і контролю Powergui, якщо активізувати його подвійним клацанням миші. Бажано вивчити його висвітлене меню, але спочатку звернемо увагу на опцію Generate report, за допомогою якої можна синтезувати звіт про роботу моделі.

Нижче представлений звіт у такому вигляді, в якому він готується системою Simulink, причому параметри наведені в амплітудному значенні.

SimPowerSystems Report.
generated by powergui.

Model :

C:\MATLAB6p5\toolbox\powersys\powerdemo\psbtransfo.mdl.

[1] Steady-State voltages and currents:

States at 60 Hz :

Il_Load 1 120V 20kW 10kvar	=	115.6 A	-91.60°
Il_Load 2 120V 20kW 10kvar	=	115.6 A	88.40°
Uc_Load 3 240V 30kW 20kVar	=	332.8 V	-1.60°
Il_winding1 Linear Transformer			
75kVA 14400-120-120V=		6.888 A	-2.81°
Il_Lm Linear Transformer			
75kVA 14400-120-120V=		0.1458 A	-91.60°

Measurements at 60 Hz :

V prim	=	2.036e+004 V	0.00°
I neutral	=	0.003991 A	125.43°
I prim	=	6.888 A	-2.81°

Sources at 60 Hz :

Vs 14400 V	=	2.036e+004 V	0.00°
------------	---	--------------	-------

Nonlinear elements at 60 Hz :

U_Breaker	=	0.002584 V	151.84°
I_Breaker	=	258.4 A	151.84°

[2] Initial values of States Variables:

Il_Load 1 120V 20kW 10kvar	=	-115.5 A
Il_Load 2 120V 20kW 10kvar	=	115.5 A
Uc_Load 3 240V 30kW 20kVar	=	-9.269 V
Il_winding1 Linear Transformer		
75kVA 14400-120-120V	=	-0.3375 A
Il_Lm Linear Transformer		
75kVA 14400-120-120V	=	-0.1457 A

Як указувалося раніше, система Simulink, перш за все, пристосована для візуального контролю процесів, що досліджуються, за рахунок використання таких засобів відображення, як віртуальні осцилографи, графічні пристрої та ін. Але в процесі дослідження є бажаним доступ до всієї числової інформації. Частина її, як показано вище, зберігається в блоці вимірювань та контролю Powergui і виводиться в звіт. Разом з цим, на етапі налагодження моделі існує можливість збереження в оперативній пам'яті всієї інформації, яка виводиться на засоби вимірювання, що може

бути корисним для глибшого аналізу, наприклад, перехідних процесів. Для цього можна скористатися наступним принциповим алгоритмом.

Міні-алгоритм збереження і виведення на екран числової інформації

1. Налагодити виведення даних віртуального осцилографа для одночасного збереження інформації в оперативній пам'яті:

а) активізувати подвійним клацанням миші блок осцилографа, що цікавить;

б) вибрати в лінійці меню опцію Parameters;

в) далі вибрати Data history;

г) активізувати (\checkmark) вікно Save data to workspace;

д) надати нове або зберегти ім'я змінної, що пропонується, (SkopeData);

е) вибрати виведення в масив (Array);

ж) підтвердити виконане налагодження (OK).

2. Направити на виконання блокову модель.

3. Вийти в головне вікно MATLAB.

4. В запиті (>>) надати і ввести ім'я змінної оперативної пам'яті.

Виведену числову інформацію надалі можна використовувати за власним бажанням. На цьому вивчення прикладу Linear Transformer можна вважати закінченим. Проте цілком природно з'являється бажання змінити структуру або параметри моделі для глибшого дослідження режиму. І це цілком можливо шляхом створення нової моделі або корекції тієї, що існує для власної мети.

10.2 Синтез базової моделі системи електропостачання

Як і будь-які математичні моделі, блокова модель створюється для вирішення певної множини завдань в електричній системі, що моделюється. Тому спочатку треба визначити перелік завдань, на яких дослідник хотів би сконцентрувати свою увагу і ранжирувати їх, наприклад, за черговістю розгляду. Для того, щоб скористатися блоковим підходом, потрібно мати (одержати) топологію електричної системи і параметри її елементів. Для вибраного переліку завдань доцільно з'ясувати які елементи електричної системи слід включати в модель, а які не включати взагалі або, принаймні, не включати на першому етапі. Таку модель назвемо базовою в тому розумінні, що вона стане основою для розвитку. Бажання одержати відразу якнайповнішу модель, як правило, нерациональне і нерідко обертається невдачею.

Надалі можна керуватися таким принциповим алгоритмом.

Міні-алгоритм синтезу блокової моделі

1. Увійти до MATLAB.

2. Увійти до Simulink (введенням команди Simulink у вікні MATLAB).

3. Відкрити вікно для синтезу моделі (File→New→Model).

4. У вікні браузера Simulink вибрати бібліотеку SimPowerSystems.

5. З висвічених бібліотек знаходити та послідовно вибирати блоки, що цікавлять, і перетягувати їх (утримуючи ліву кнопку миші) у відкрите вікно за п. 3.

6. З'єднати лініями зі стрілками окремі блоки, відображаючи тим самим топологію системи.

7. Вставити, де це необхідно, засоби вимірювання, управління, відображення і т.д., вибираючи їх з різних бібліотек браузера Simulink і сполучаючи з силовою частиною системи.

Метою синтезу моделі, в нашому випадку, будемо вважати аналіз нормальних і аварійних перехідних та сталих режимів в системі електропостачання. Припустимо, що первинна схема системи електропостачання, яка досліджується, може бути відображена блоковою моделлю, рис.10.5. З неї видно, що система отримує живлення від зовнішнього джерела і власної дизельної електростанції з одним синхронним генератором. Навантаженням є крупний асинхронний двигун. Зовнішнє джерело живлення через трансформатор під'єднане до збірних шин, на які працює і дизель-генератор. Від цих же шин живиться асинхронне навантаження.

Кожна з трьох найважливіших підсистем (зовнішнє джерело, автономне джерело і навантаження) під'єднані до збірних шин окремими вимикачами. Ключове призначення в моделі має короткозамикач, під'єднаний безпосередньо до шин. Такою є модель силової частини системи, що досліджується.

Модель разом із засобами вимірювання і контролю представлена на рис.10.6.

Для підсистеми зовнішнього джерела передбачений вимірювальний блок Three-Phase V1 Measurement, який забезпечить виведення на окремі осцилографи лінійні струми і фазні напруги сторони низької напруги трансформатора.

Для підсистеми автономного джерела на багатоканальний осцилограф SM виводяться найважливіші параметри режиму, такі як механічна потужність, струм збудження, напруга, швидкість ротора.

Для асинхронного навантаження передбачено виведення на осцилограф однієї фазної напруги та на спеціальний осцилограф ASM - струму статора і швидкість ротора.

Кількісну інформацію про результати роботи моделі можна отримати з блока вимірювань і контролю Powergui.

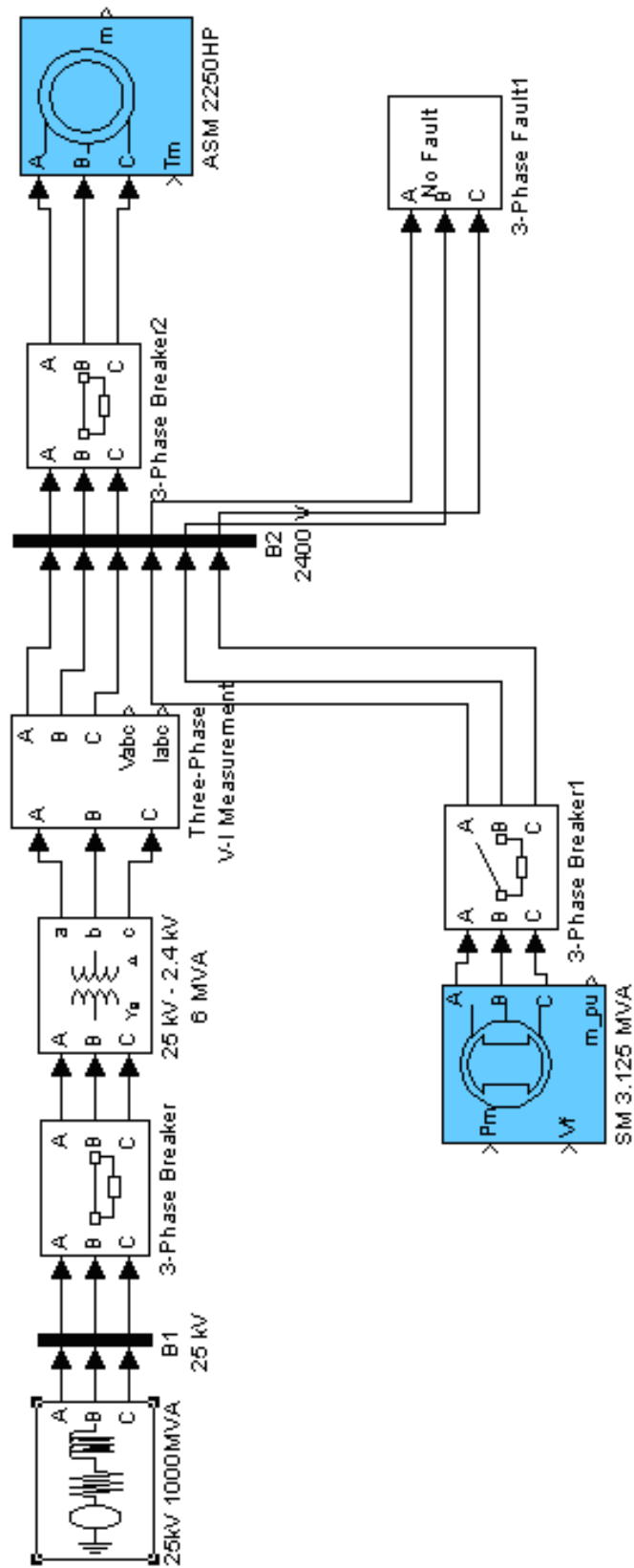


Рисунок 10.5 – Блокова схема системи електропостачання

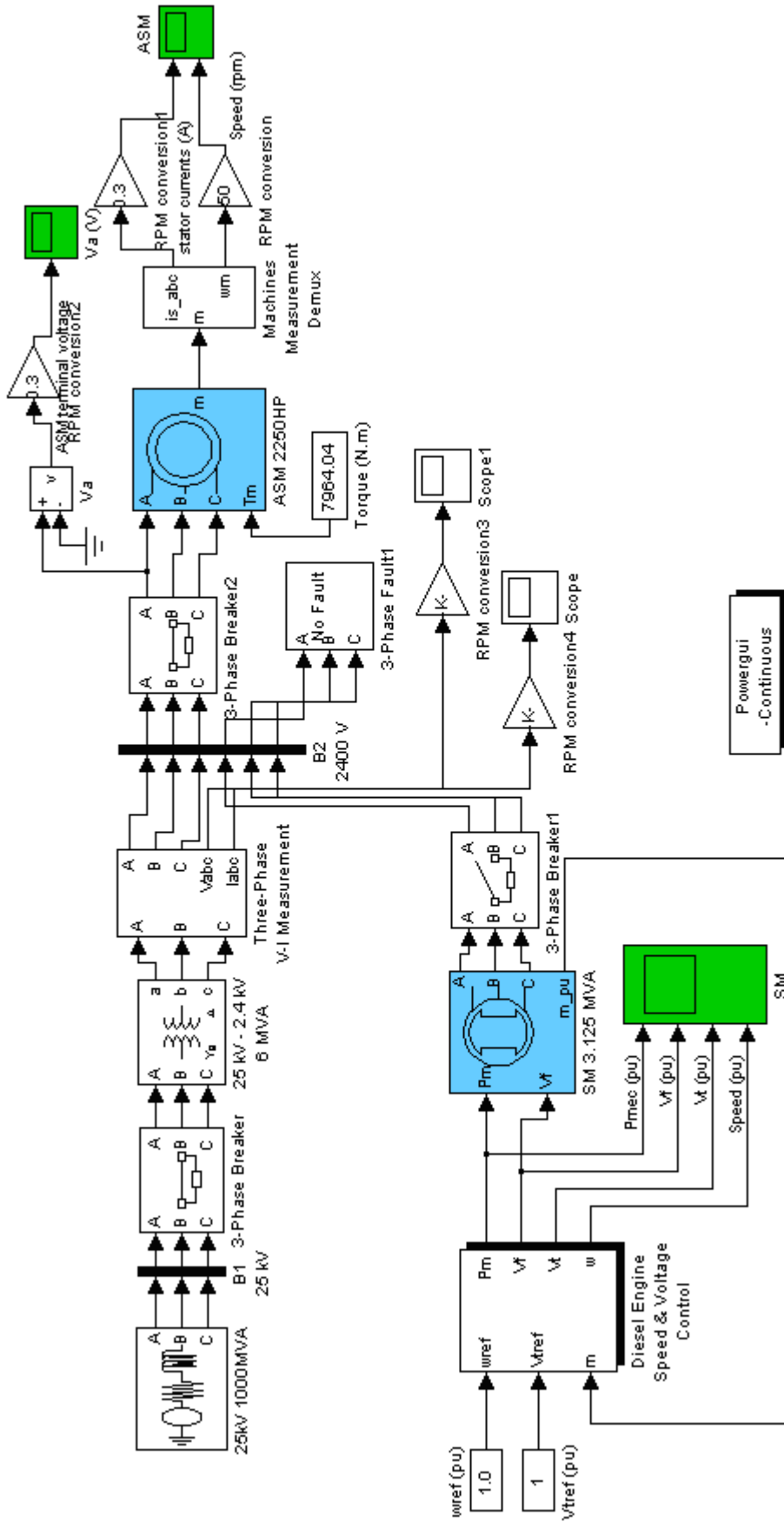


Рисунок 10.6 — Блокова схема системи електропостачання із засобами вимірювання і контролю

Таке комплектування засобів вимірювань достатнє для первинного аналізу режимів в системі електропостачання, але, при необхідності, може бути розширене іншими засобами.

Звернемося тепер до переліку завдань, які можна сформулювати і вирішити за допомогою синтезованої блокової моделі.

Нормальні режими

1. Дослідження режиму при живленні тільки від одного зовнішнього джерела.
2. Аналіз перехідного процесу пуску дизель-генератора з виходом на холостий хід.
3. Дослідження режиму при живленні тільки від одного автономного джерела живлення.
4. Дослідження режиму при сумісному живленні від зовнішнього і автономного джерела.
5. Розподіл навантаження між паралельними джерелами живлення.
6. Аналіз перехідного процесу синхронізації зовнішнього і автономного джерел живлення.
7. Дослідження перехідного процесу пуску асинхронного навантаження при різних способах участі джерел живлення.

Зрозуміло, що цей перелік відображає тільки незначну кількість завдань, які реально виникають при проектуванні або експлуатації системи електропостачання.

Аварійні режими

1. Дослідження режиму при різних коротких замиканнях в системі електропостачання і різних способах роботи джерел живлення.
2. Аналіз впливу асинхронного навантаження на величини струмів короткого замикання в системі електропостачання.
3. Дослідження перехідних режимів при різних способах організації роботи АПВ після коротких замикань.
4. Аналіз стійкості асинхронного навантаження при різних короткочасних збуреннях в системі електропостачання.

Зрозуміло, що цей перелік відображає тільки деякі із питань, що реально виникають при проектуванні або експлуатації системи електропостачання.

При практичному розв'язуванні будь-якої із зазначених задач, потрібно буде провести додаткове налагодження структури моделі і параметрів її окремих блоків. У цій роботі можна керуватися таким принциповим алгоритмом.

Міні-алгоритм налагодження структури і параметрів блокової моделі

1. У відповідності з метою завдання, визначити стан комутаційних апаратів (увімкнено, вимкнено) і тимчасові параметри їх роботи.
 2. Визначити необхідний стан блока, наприклад, короткозамикача, який задає збурення в системі.
 3. Навести мишею курсор на блокову модель, що цікавить.
 4. Подвійним натисканням лівою кнопкою миші викликати вікно Block Parameters і в ньому виконати необхідні зміни.
- Викладені міркування проілюструємо при розв'язуванні деяких задач на синтезованій моделі.

10.3 Технологія дослідження конкретних завдань

Звернемося спочатку до дослідження нормальних режимів і візьмемо для реалізації завдання живлення навантаження від одного зовнішнього джерела. Необхідну схему первинних з'єднань забезпечимо, визначивши таке положення комутаційних апаратів:

- 3-Phase Breaker - увімкнений;
- 3-Phase Breaker1 - вимкнений;
- 3-Phase Breaker2 - увімкнений;
- 3-Phase Fault1 - вимкнений.

Найважливіші параметри вимикачів 3-Phase Breaker і 3-Phase Breaker2 однакові і вони такі:

- всі три фази вмикаються одночасно в момент $t=0$ с;
- всі три фази вимикаються одночасно в момент $t=0,2$ с.

Інші параметри можна переглянути на рис. 10.7, де їх видно на фоні блокової моделі.

Розглядаючи параметри джерела живлення (25 kV 1000 MVA) звернемо увагу на параметр Phase angle of phase A, який задає початковий аргумент напруги фази A. Його значення (в електричних градусах) дорівнює нулю.

У висвіченому вікні Simulation parameters обмежимося знайомством тільки з ім'ям програми (ode15s) та двома тимчасовими параметрами (Start time) і (Stop time), що задають час початку і кінця роботи програми. Бачимо, що дослідження режиму відбуватиметься на інтервалі часу 0 ... 2 с. Після цього запускаємо модель на виконання.

З розгляду осцилограм струмів можна з'ясувати, що перехідний процес в системі закінчується приблизно через 0,75 – 0,8 с.

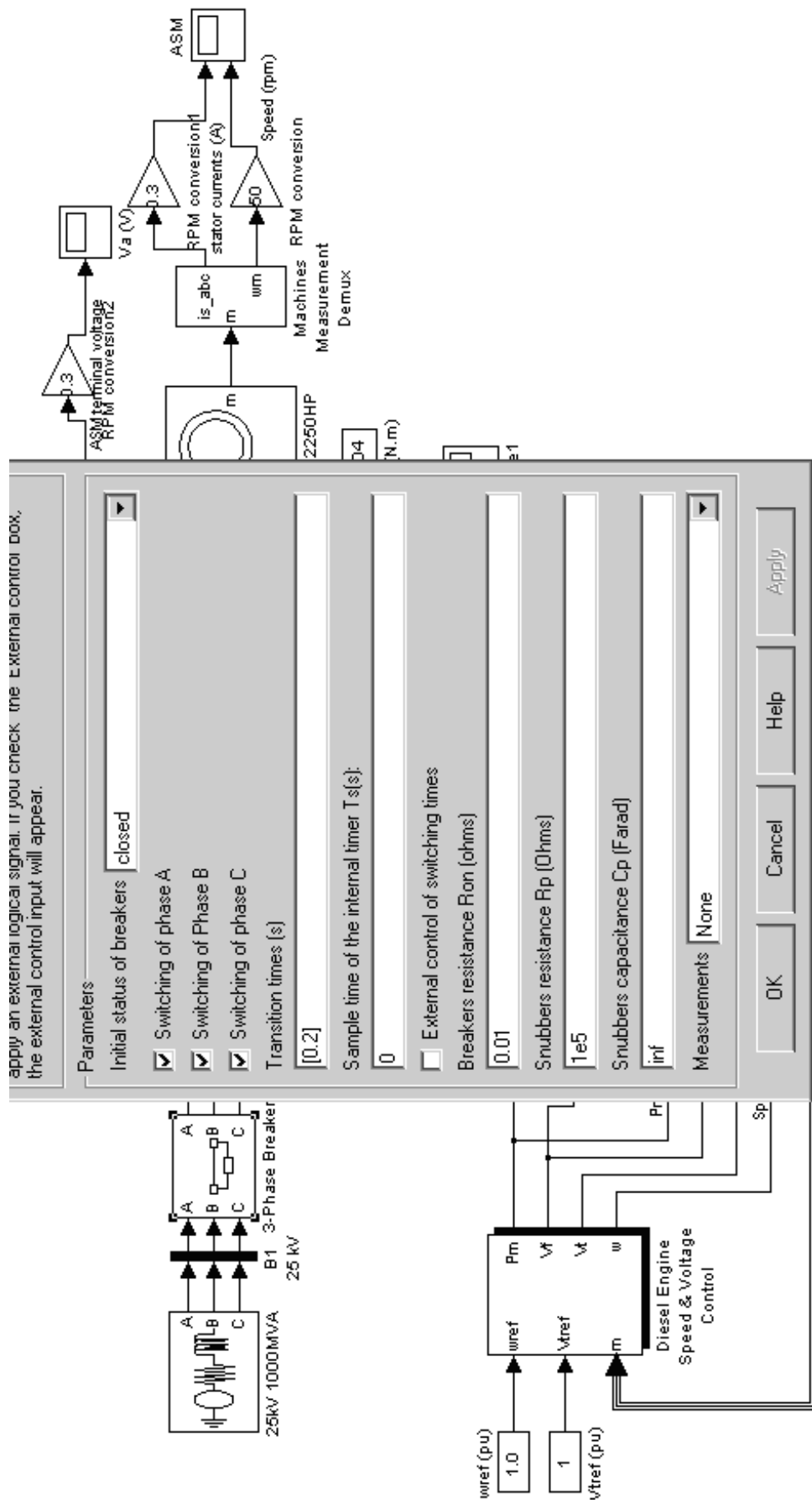


Рисунок 10.7 – Параметри вимикачів 3-Phase Breaker та 3-Phase Breaker2

Звернемося тепер до завдання з дослідження перехідного процесу пуску дизель-генератора. Таке завдання має і самостійне значення, але ще більшою мірою як підготовка до розгляду інших завдань, пов'язаних з можливою паралельною роботою двох джерел живлення. Зрозуміло, що розв'язання поставленої задачі вимагає виділення дизель-генератора із загальної схеми і це можна здійснити передбаченими, при синтезі моделі, комутаційними апаратами.

Отже, необхідні зміни в первинній схемі з'єднання відобразимо станом комутаційних апаратів, а саме:

3-Phase Breaker - вимкнений;

3-Phase Breaker1 - увімкнений;

3-Phase Breaker2 - вимкнений;

3-Phase Fault1 – вимкнений.

При цьому дизель-генератор на холостому ході буде під'єднаний до збірних шин. Параметри вимикача 3-Phase Breaker1 такі:

всі три фази вмикаються одночасно в момент $t=0$ с;

всі три фази вимикаються одночасно у момент $t=0,1$ с.

Бажано перенести вимірювальний блок Three-Phase V1 Measurement безпосередньо до дизель-генератора, рис.10.8.

З багатьох параметрів виберемо осцилограму напруг. Вона представлена на рис.10.9. Виявилось, що прийнята система автоматики дизель-генератора, рис.10.10, забезпечує миттєвий вихід на номінальну напругу. Це, звичайно, нереально, але візьмемо це до уваги. Зазначимо також, що початкова фаза напруги U_a дорівнює $\pi/2$. Цей факт при розгляді інших завдань може виявитися досить важливим.

Бажано оглянути вивід багатоканального осцилографа SM і звернути увагу на параметри механічної потужності, швидкості, напруги збудження та напруги статора генератора.

Звернемося до завдання дослідження перехідного процесу при увімкненні двох джерел живлення - системи $U=\text{const}$ і автономного дизель-генератора на паралельну роботу. Сенс постановки такого завдання полягає у виявленні самої можливості паралельної роботи двох джерел живлення, вивченні та оцінці параметрів режиму, які можуть складатися при цьому.

Відразу вкажемо на обмеженість системи Simulink для дослідження такої операції. Дійсно, у складі її бібліотек відсутній блок, що імітує синхроскоп. Це відразу виключає можливість точної синхронізації.

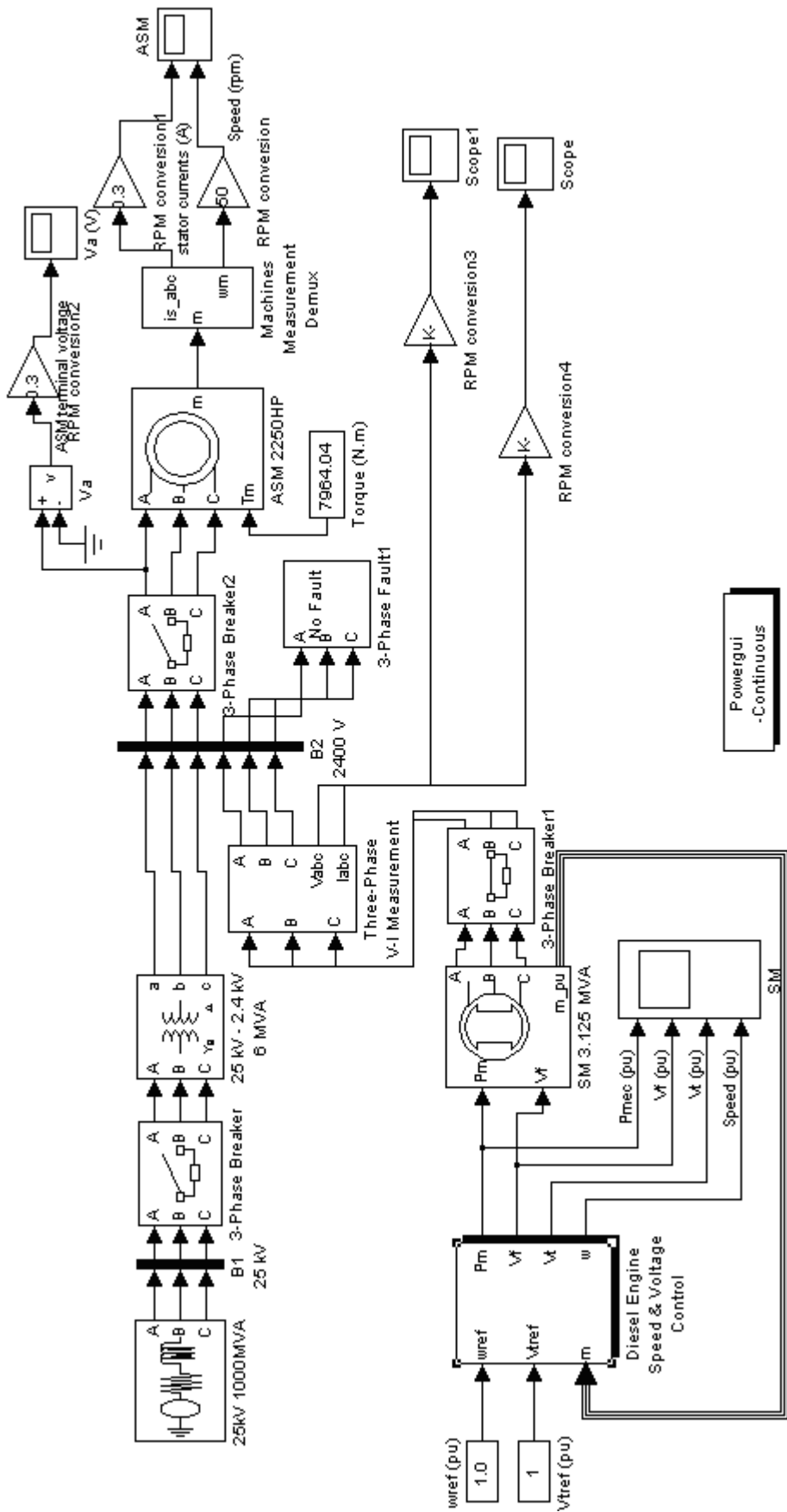


Рисунок 10.8 – Блокова модель для дослідження перехідного процесу пуску дизель-генератора

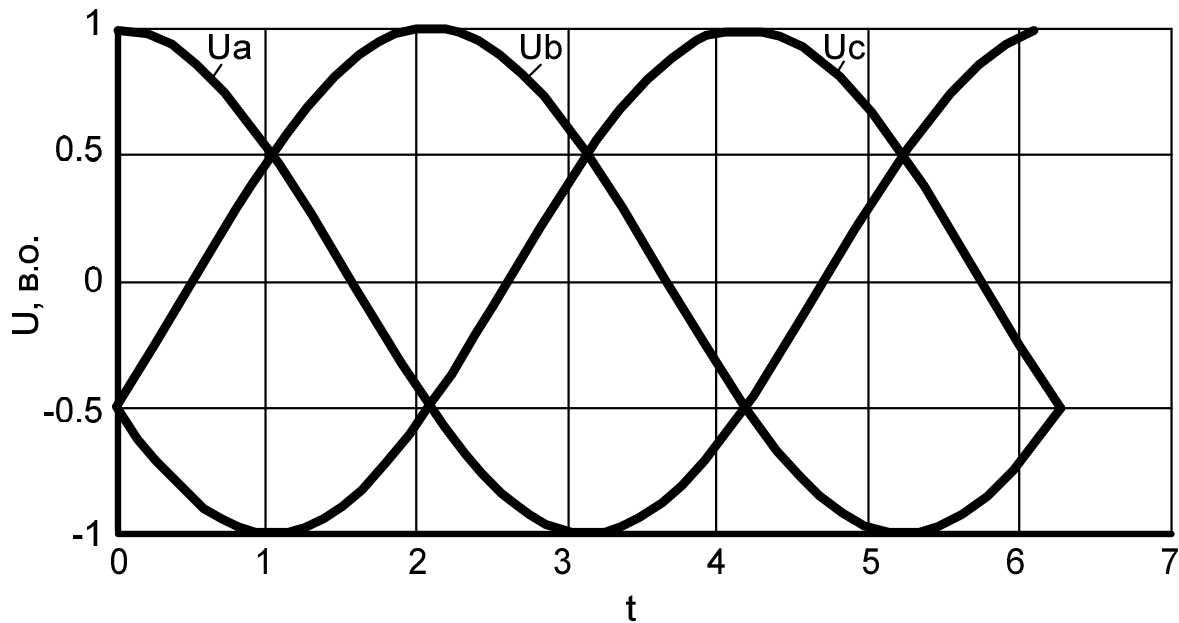


Рисунок 10.9 – Осцилограма напруг дизель-генератора

Відомо, що цей процес вимагає виконання певних умов - рівності частот, однакового порядку проходження фаз, однакової форми кривих ЕРС, рівності діючих значень ЕРС. Крім того, потрібно, щоб в момент синхронізації ЕРС двох джерел були в протифазі. Частина цих умов виконується в блоках, що імітують джерела живлення. Проте деякі важливі умови не можуть бути реалізовані. Вже згадувалася відсутність блока синхронізації. Крім того, в блоках синхронних машин відсутні можливості зміни початкової фази ЕРС і увімкнення або вимкнення кола збудження. Зважаючи на це, класичні прийоми точної синхронізації або самосинхронізації не можуть бути реалізовані в системі Simulink. Але важливість дослідження перехідного процесу при увімкненні двох джерел живлення безперечна, і тому доведеться ретельно продумати план експерименту.

Для проведення дослідження візьмемо модель, рис.10.11. Хоча її зовнішній вигляд практично не змінився, але стан деяких комутаційних апаратів і їх параметри налагодження слід уточнити. Будемо виходити з того, що живильна система увімкнена (3-Phase Breaker - ввімкнений), а автономний дизель-генератор під'єднуватиметься на паралельну роботу. Для цього приймемо, що його вимикач 3-Phase Breaker1 спочатку вимкнений. Зрозуміло, асинхронне навантаження повинне бути від'єднане для того, щоб процес синхронізації не був ускладнений впливом навантаження. За аналогічними міркуваннями, короткозамикач 3-Phase Fault1 також повинен бути вимкненим.

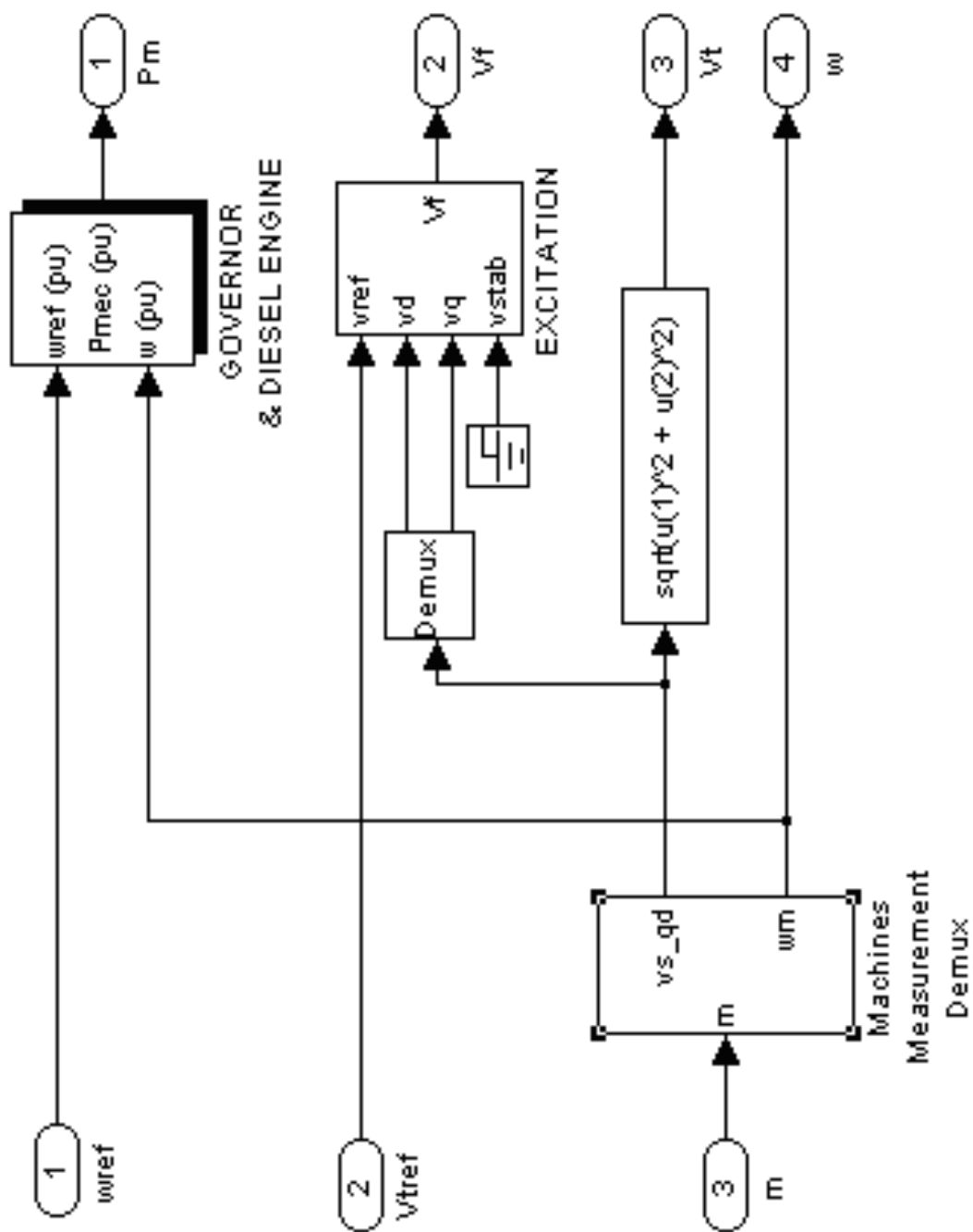


Рисунок 10.10 – Системи автоматики, що прийняті для дизель-генератора

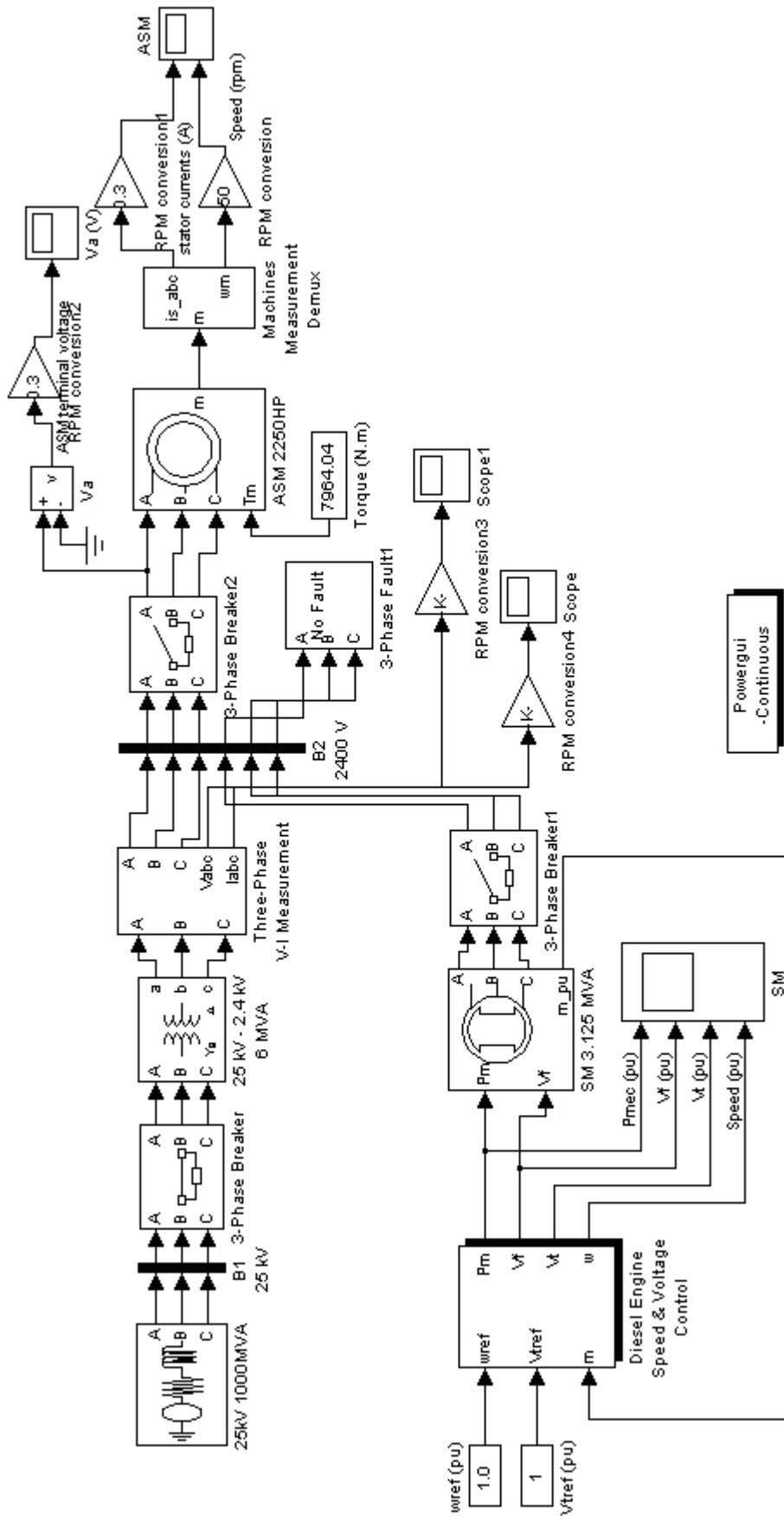


Рисунок 10.1.1 – Блокова модель дослідження паралельної роботи двох джерел

Взявши до уваги результати аналізу вже розглянутих завдань, проведемо дослідження перехідного процесу синхронізації на інтервалі часу $0 \dots 0,1$ с. Для цього внесемо зміни в параметри Start time і Stop time програми ode15s, які задають час початку і кінця роботи програми. Прийmemo:

Start time=0 с;
Stop time=0,1 с.

У відповідності з цим, прийmemo, що вимикач 3-Phase Breaker змінить своє положення також через 0,1 с.

Принциповим є налагодження вимикача 3-Phase Breaker1. Нагадаємо, що він спочатку знаходиться у вимкненому стані. Для вирішення питання про час його увімкнення, звернемо увагу на рис.10.9, з якого видно, що початкова фаза напруги U_a дорівнює $\pi/2$. Розглядаючи параметри джерела живлення (25 kV 1000 MVA), звернемо увагу на параметр Phase angle of phase A, який задає початковий аргумент напруги фази A. Його значення дорівнює нулю електричних градусів. Такий стан суперечить зазначеним вище умовам синхронізації. Тому прийmemo, що вимикач 3-Phase Breaker1 вимкатиметься через $1/200$ с., що відповідає чверті періоду. Це забезпечить наближене положення проти фази ЕРС двох джерел живлення у момент ввімкнення. Можна припустити, що це забезпечить кращу реалізацію перехідного процесу. Для яскравішого відображення струмів на осцилографі Scope задамо коефіцієнт посилення на блоці RPM conversion рівний $1/3500$. Він зазвичай уточнюється в попередніх експериментах.

Після запуску моделі на виконання, особливу увагу звернемо на перехідні струми, відображені на віртуальному осцилографі Scope. В першу чергу, нас цікавлять такі параметри перехідного процесу, як час досягнення сталого стану, максимальні значення струмів і швидкість їх зміни в часі. Бажано також оглянути вивод багатоканального осцилографа SM і звернути увагу на параметри механічної потужності, швидкості, напруги збудження і напруги статора генератора.

Перехідний процес синхронізації, природно, повинен був би закінчитися встановленням номінальних параметрів частоти, напруги і нульових значень струмів, оскільки навантаження було вимкнене. Проте це не спостерігається. Причиною цьому є відмічена вище обмеженість системи Simulink для дослідження такої операції. Не дивлячись на це, корисність такого дослідження безперечна. Стає, наприклад, зрозуміло, що безліч завдань, які виникають в системі електропостачання, спочатку слід вирішувати при будь-якому одному джерелі живлення. Паралельна робота двох джерел живлення обумовлює складні перехідні процеси, що може виявитися небажаним.

10.4 Дослідження електромагнітного перехідного процесу при короткому замиканні в системі $U=\text{const}$

Синтезуємо просту за структурою систему, рис.10.12, в якій джерело живлення (25kV 1000 MVA) через трифазну лінію (3-Phase Series RLC Branch) увімкнене на складне трифазне коротке замикання на землю, в системі із заземленою нейтраллю, при якому фаза С замкнута через опір (Series RLC Branch), а дві інші - металеві. Обмежимося візуальним контролем перехідного процесу, що виникає, і для цього підготуємо необхідну віртуальну вимірювальну апаратуру.

Із рис. 10.12 видно, що на виводах джерела живлення контролюються трифазні напруги (Voltage Measurement 1,2,3), сигнали з яких через підсилювачі (дільники) і концентратор (Mux) подані на осцилограф (Scope 1). За допомогою цих кіл буде зручно переконатися в підтримці джерелом живлення постійності напруги в перехідному процесі.

Для контролювання струмів короткого замикання використовуються вимірювальний блок (Three-Phase V1 Measurement), три амперметри (Current Measurement), підсилювачі, концентратор (Mux) і осцилограф (Scope 2). Цією групою приладів контролюються струми короткого замикання у фазних координатах.

Для контролювання цих же аварійних струмів, але в координатах симетричних складових, до вимірювального блока (Three-Phase V1 Measurement) під'єднані блок перетворення (3-Phase Sequence Analyzer), підсилювачі, концентратор (Mux) і осцилограф (Scope). Відмітимо, що з перетворювача (3-Phase Sequence Analyzer) знімаються сигнали про амплітуди і фази струмів короткого замикання, які цікавлять нас. Кількісну інформацію за результатами роботи моделі можна отримати з блока вимірювань і контролю Powerq1.

З рис.10.13, в якому на фоні моделі представлена осцилограма фазних напруг, видно, що, як і передбачалося, в режимі короткого замикання джерело живлення підтримує постійний рівень напруг.

Для прийнятих параметрів елементів первинної схеми весь перехідний процес можна прослідкувати на рис.10.14, де представлені всі осцилограми.

Із сумісного розгляду осцилограм (Scope 2) і (Scope) можна побачити, що перехідний процес практично закінчується через 0.02 с., після чого параметри режиму досягають сталих значень. Видно також, що струм у фазі С істотно відрізняється за величиною від струмів інших фаз (вплив опору Series RLC Branch). Бажано звернути увагу на виникнення відмінності у величинах симетричних складових струмів і їх фаз. З осцилограми видно, що сигнали відображаються у вигляді огинаючих параметрів режиму.

Model TKZ

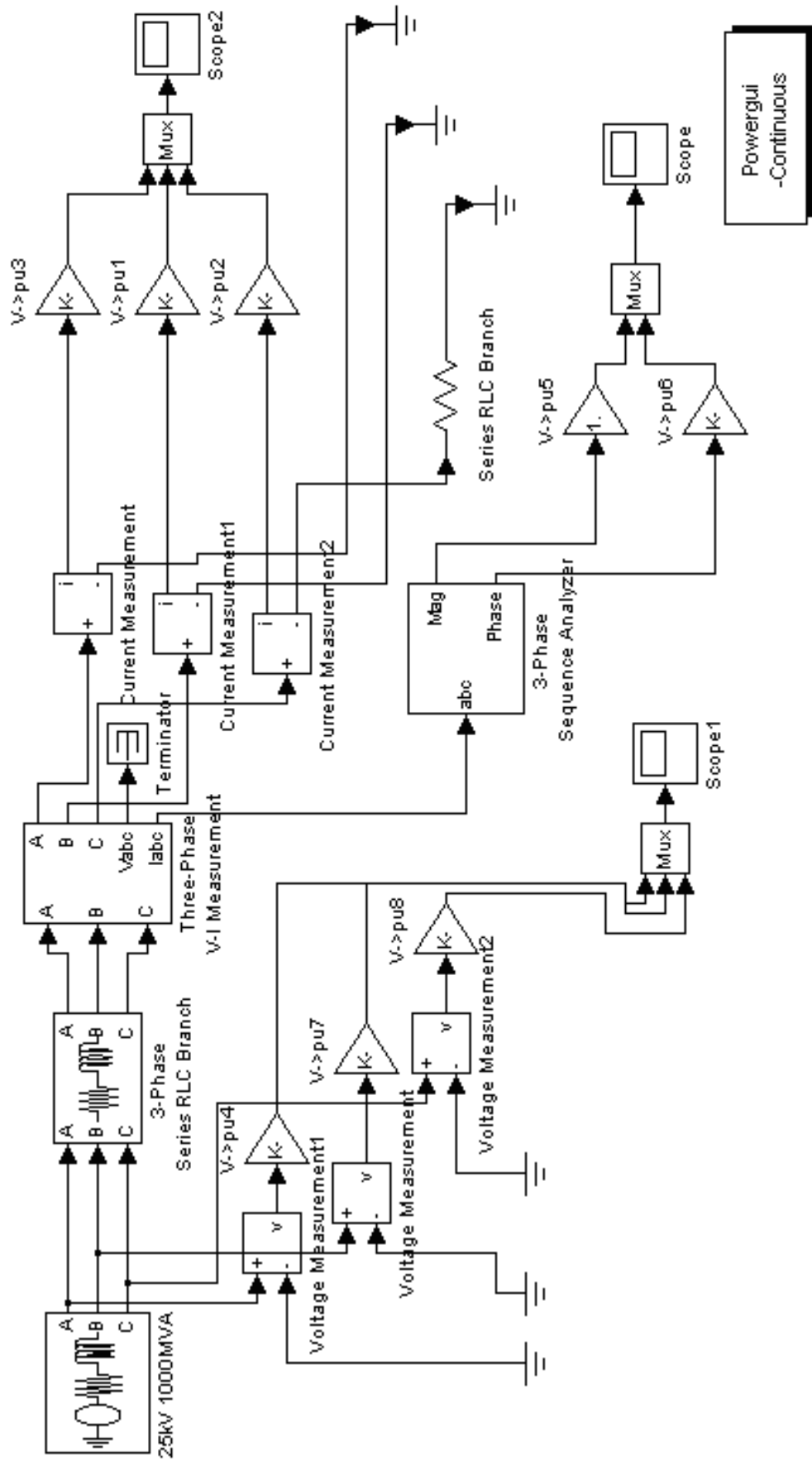


Рисунок 10.12 – Схема первинної і вторинної комутації моделі

Model TKZ

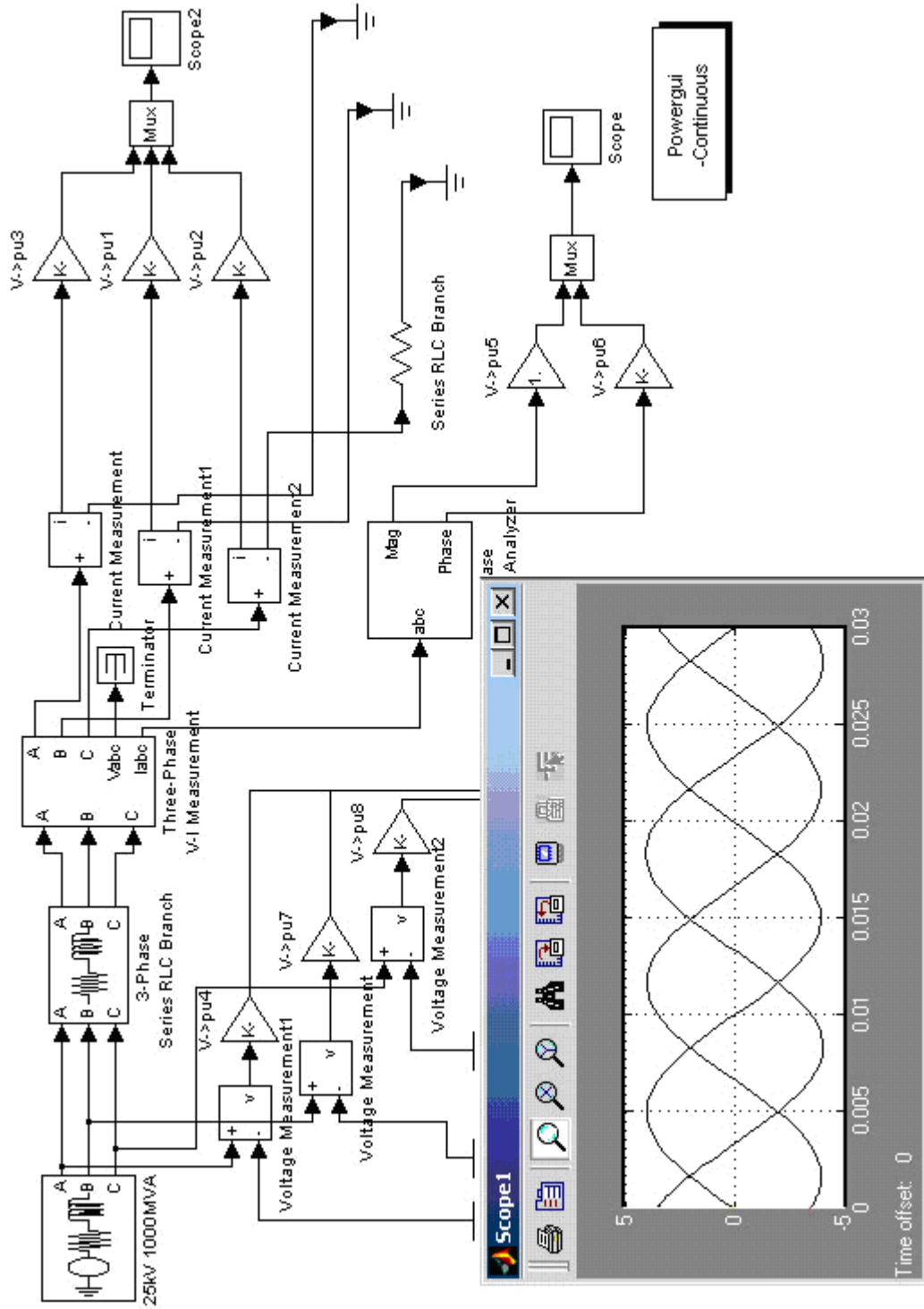


Рисунок 10.13 – Осцилограмма фазних напруг (Score 1)

Model TKZ

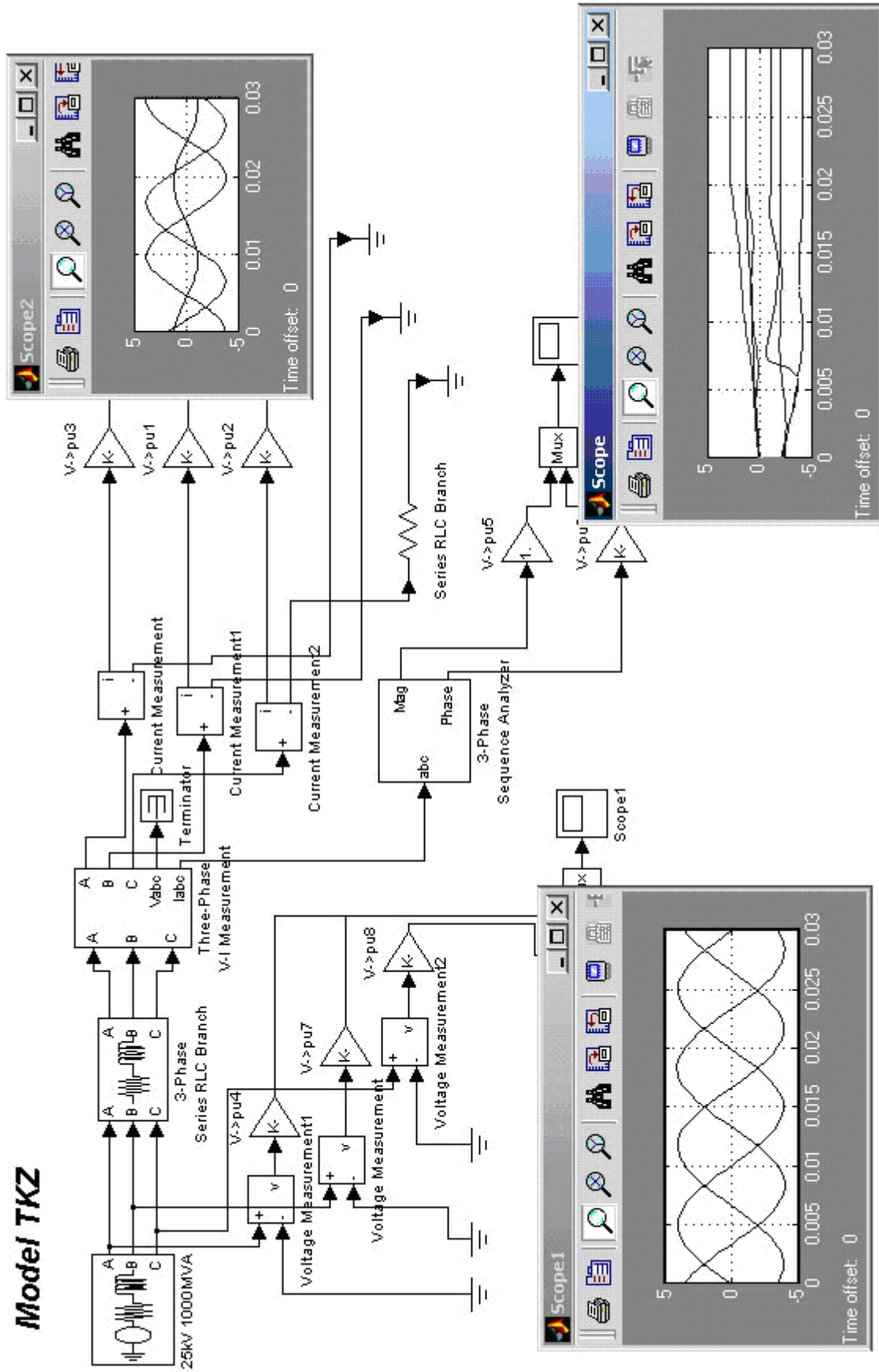


Рисунок 10.14 – Осцилограми параметрів режиму при короткому замиканні

Числова інформація для сталого режиму короткого замикання, як наголошувалося вище, отримується з блока вимірювань і контролю Powerqui.

Нижче на рис 10.15 і 10.16 вона представлена у такому вигляді, в якому вона дається системою Simulink, відповідно, для параметрів в амплітудній формі і у формі діючих величин.

На закінчення цього розділу зазначимо, що тут використовувалась програма (ode- 23) з двома тимчасовими параметрами (Start time=0 с.) і (Stop time=0.03 с.), які задають час початку і кінця роботи.

Завдання для самостійної роботи

1. Для прикладу Linear Transformer:

а) направити на виконання блокову модель з встановленням параметрів, заданих в системі Simulink;

б) активізувати віртуальні осцилографи і уважно переглянути одержані осцилографи;

в) пояснити отримання двох ступенів активної потужності P різних рівнів;

г) пояснити виникнення активно-ємнісного сталого режиму в досліджуваній системі електропостачання;

д) запропонуйте заходи, що забезпечують переведення системи в активно-індуктивний режим з достатньо високим ступенем компенсації.

2. Для дослідження процесу синхронізації двох джерел живлення за моделлю, рис.10.11:

а) направити на виконання блокову модель з встановленням параметрів, відмінних від прийнятих в підручнику;

б) провести порівняльну оцінку перехідного процесу, наприклад, за зміною струмів, з Вашим встановленням параметрів моделі і параметрами, прийнятими в підручнику;

в) направити на виконання блокову модель з іншим параметром Phase angle of phase A, який задає початковий аргумент напруги фази A, для джерела живлення (25 kV 1000 MVA);

г) на основі власних експериментів приведіть свої міркування про доцільність спільної роботи двох джерел живлення на асинхронне навантаження.

3. Для дослідження процесу короткого замикання за моделлю рис.10.11:

а) перевірити її роботу при використанні іншої програми з арсеналу системи Simulink;

б) задати інші види коротких замикань і проаналізувати результати;

в) провести аналіз впливу на тривалість перехідного процесу таких чинників, як параметри лінії (співвідношення R і X), параметри опору заземлення та ін.

```

STATES :
IL_25kV 1000MVA      =      636.7 A      -88.10°
IL_25kV 1000MVA      =      636.7 A      151.90°
IL_25kV 1000MVA      =      192.5 A      102.41°

MEASUREMENTS :
Voltage Measurement      =      2.001e+004 V      -119.92°
Voltage Measurement1     =      2.001e+004 V      0.08°
Voltage Measurement2     =      2.036e+004 V      119.69°
Three-Phase V-I Measurement/Va =      0 V      0.00°
Three-Phase V-I Measurement/Vb =      0 V      0.00°
Three-Phase V-I Measurement/Vc =      1.925e+004 V      102.41°
Current Measurement      =      636.7 A      -88.10°
Current Measurement1     =      636.7 A      151.90°
Current Measurement2     =      192.5 A      102.41°
Three-Phase V-I Measurement/Ia =      636.7 A      -88.10°
Three-Phase V-I Measurement/Ib =      636.7 A      151.90°
Three-Phase V-I Measurement/Ic =      192.5 A      102.41°

SOURCES :
25kV 1000MVA =      2.041e+004 V      0.00°
25kV 1000MVA =      2.041e+004 V     -120.00°
25kV 1000MVA =      2.041e+004 V      120.00°

-- No nonlinear blocks --

```

Units :

Frequency :

Display :
 States
 Measurements
 Sources
 Nonlinear elements

Рисунок 10.15 – Амплітудні параметри режиму при короткому замиканні

```

STATES :
IL_25kV 1000MVA = 450.2 Arms -88.10°
IL_25kV 1000MVA = 450.2 Arms 151.90°
IL_25kV 1000MVA = 136.1 Arms 102.41°

MEASUREMENTS :
Voltage Measurement = 1.415e+004 V rms -119.92°
Voltage Measurement1 = 1.415e+004 V rms 0.08°
Voltage Measurement2 = 1.44e+004 V rms 119.69°
Three-Phase V-I Measurement/Va = 0 V rms 0.00°
Three-Phase V-I Measurement/Vb = 0 V rms 0.00°
Three-Phase V-I Measurement/Vc = 1.361e+004 V rms 102.41°
Current Measurement = 450.2 A rms -88.10°
Current Measurement1 = 450.2 A rms 151.90°
Current Measurement2 = 136.1 A rms 102.41°
Three-Phase V-I Measurement/Ia = 450.2 A rms -88.10°
Three-Phase V-I Measurement/Ib = 450.2 A rms 151.90°
Three-Phase V-I Measurement/Ic = 136.1 A rms 102.41°

SOURCES :
25kV 1000MVA = 1.443e+004 V rms 0.00°
25kV 1000MVA = 1.443e+004 V rms -120.00°
25kV 1000MVA = 1.443e+004 V rms 120.00°

-- No nonlinear blocks --

```

Units : RMS values

Frequency : 50

Display :
 States
 Measurements
 Sources
 Nonlinear elements

Рисунок 10.16 – Діючі значення параметрів режиму при короткому замиканні

Додаток А
Текст програми DIFUR.for

```
*   program DIFUR
*   Интегрирование системы дифференциальных уравнений,
*   разрешенных относительно производных, методом
*   Кутта -Мерсона (на 3 уравнения!)
    dimension y(10),soln(10)
    real instep
    logical start
    start=.true.
    pause 'Установите дискету с файлом данных DIFUR.dat'
    open(5,file='a:difur.dat')
    open(6,file='a:difur.txt',status='new')
    write(6,1)
1   format(/20x,30h***** /20x,
    *30h  Разработчик В.Аввакумов  /20x,
    *30h***** //)
    read(5,5)x,instep,acc,neqs,(y(i),i=1,neqs)
5   format(2f8.3,f8.4,i3/10f8.3)
    close(5)
    write(6,10)
10  format(/1x,'Ф а й л д а н н ы х к п р о г р а м м е
DIFUR' /)
    write(6,5)x,instep,acc,neqs,(y(i),i=1,neqs)
    write(6,15)
15  format(/1x,'Интегрирование методом Кутта-Мерсона' /)
    call kuttam(neqs,x,y,acc,instep,start,soln)
    write(6,16)
16  format(1x,50(1h-))
*   write(6,20)(i,soln(i),i=1,neqs)
* 20  format(/1x,'Результат - y('i2,')='f10.5)
    write(*,25)
25  format(1x, 'Выходной листинг смотрите на дискете в
файле ',
    *'DIFUR.txt')
    close(6)
    stop
    end
*   *****

subroutine dybydx(x,y,dydx,neqs)
dimension y(neqs),dydx(neqs)
```

```

Um=1.
alfa=0.
f=50.
pi=3.14159
omega=2.*pi*f
Rk=0.1
Xk=sqrt(1.-Rk*Rk)
do 10 i=1,neqs
    goto (1,2,3,4),i
1    dydx(i)=Um*omega/Xk*sin(omega*x+alfa)-
y(i)*omega*Rk/Xk
    goto 10
2    dydx(i)=Um*omega/Xk*sin(omega*x+alfa-2.*pi/3.)-
*    y(i)*omega*Rk/Xk
    goto 10
3    dydx(i)=Um*omega/Xk*sin(omega*x+alfa+2.*pi/3.)-
*    y(i)*omega*Rk/Xk
    goto 10
4    dydx(i)=(sin(x*x+sqrt(y(i))))**2
10  continue
return
end
* *****
subroutine kuttam(neqs,x,y,acc,instep,start,soln)
dimension y(neqs),y0(10),y1(10),y2(10),
*dydx0(10),dydx1(10),dydx2(10),soln(neqs)
logical start,double
real instep
if(.not.start) goto 1
do 2 i=1,neqs
2  y0(i)=y(i)
write(6,15)
15 format(1x,50(1h-),/1x,'| А Р Г У М Е Н Т |   З Н А Ч Е Н И Я   ',
*'Ф У Н К Ц И И   |',
*/1x,'|   X   |           Y(X)           |',
*/1x,50(1h-))
* Оператор 20 сделан для ТРЕХ уравнений!
write(6,20)x,(y0(i),i=1,neqs)
20 format(1x,':',f8.5,':',3(2x,f10.5,1x),':')
step=instep
nsreqd=1
start=.false.

```



```

    goto 3
1  step=instep/nsreqd
3  nsdone=0
10 call dybydx(x,y0,dydx0,neqs)
    do 4 i=1,neqs
4  y1(i)=y0(i)+step/3.*dydx0(i)
    call dybydx(x+step/3.,y1,dydx1,neqs)
    do 5 i=1,neqs
5  y1(i)=y0(i)+step/6.*dydx0(i)+step/6.*dydx1(i)
    call dybydx(x+step/3.,y1,dydx1,neqs)
    do 6 i=1,neqs
6  y1(i)=y0(i)+step/8.*dydx0(i)+3.*step/8.*dydx1(i)
    call dybydx(x+step/2.,y1,dydx2,neqs)
    do 7 i=1,neqs
7  y1(i)=y0(i)+step/2.*dydx0(i)-3.*step/2.*dydx1(i)+
    *2.*step*dydx2(i)
    call dybydx(x+step,y1,dydx1,neqs)
    do 8 i=1,neqs
8  y2(i)=y0(i)+step/6.*dydx0(i)+2.*step/3.*dydx2(i)+
    *step/6.*dydx1(i)
    double=.true.
    do 9 i=1,neqs
        error=abs(0.2*(y1(i)-y2(i)))
        if (error.le.acc) goto 11
        step=step/2.
        nsreqd=2*nsreqd
        nsdone=2*nsdone
        goto 10
11  if(error*64..gt.acc) double=.false.
9  continue
    x=x+step
    do 12 i=1,neqs
12  y0(i)=y2(i)
    write(6,20)x,(y0(i),i=1,neqs)
    nsdone=nsdone+1
    if(nsdone.ge.nsreqd) goto 13
    if(.not.(double.and.nsdone.eq.(nsdone/2)*2.and.
    *nsreqd.gt.1)) goto 10
    step=step*2.
    nsdone=nsdone/2
    nsreqd=nsreqd/2
    goto 10

```

```
13 do 14 i=1,neqs
14 soln(i)=y0(i)
   return
end
```

Додаток Б
Лістинг результатів дослідження перехідного процесу
при зовнішньому короткому замиканні

Файл даних до програми DIFUR

.000 .050 .0001 3
.000 .000 .000

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЙ СТРУМІВ ПО ФАЗАХ

t, c	A	B	C
.00000	.00000	.00000	.00000
.00078	.02987	-.22382	.19395
.00156	.11673	-.45850	.34177
.00234	.25393	-.68938	.43545
.00313	.43186	-.90204	.47018
.00391	.63849	-1.08318	.44469
.00469	.86010	-1.22138	.36129
.00547	1.08211	-1.30784	.22573
.00625	1.28995	-1.33683	.04689
.00703	1.46993	-1.30613	-.16380
.00781	1.61005	-1.21706	-.39299
.00859	1.70075	-1.07448	-.62626
.00938	1.73543	-.88647	-.84896
.01016	1.71091	-.66383	-1.04707
.01094	1.62755	-.41945	-1.20809
.01172	1.48929	-.16755	-1.32174
.01250	1.30338	.07721	-1.38059
.01328	1.07994	.30059	-1.38052
.01406	.83138	.48958	-1.32096
.01484	.57164	.63328	-1.20491
.01563	.31533	.72345	-1.03878
.01641	.07691	.75506	-.83197
.01719	-.13024	.72661	-.59637
.01797	-.29456	.64014	-.34557
.01875	-.40708	.50119	-.09412
.01953	-.46187	.31845	.14342
.02031	-.45646	.10319	.35327
.02109	-.39196	-.13136	.52332
.02187	-.27303	-.37081	.64384
.02266	-.10754	-.60051	.70804
.02344	.09386	-.80638	.71251

.02422	.31838	-.97578	.65741
.02500	.55185	-1.09829	.54643
.02578	.77961	-1.16626	.38665
.02656	.98733	-1.17535	.18802
.02734	1.16191	-1.12475	-.03716
.02812	1.29226	-1.01722	-.27503
.02891	1.36994	-.85897	-.51097
.02969	1.38970	-.65921	-.73048
.03047	1.34975	-.42969	-.92006
.03125	1.25193	-.18392	-1.06800
.03203	1.10152	.06360	-1.16512
.03281	.90701	.29826	-1.20526
.03359	.67951	.50621	-1.18571
.03437	.43214	.67521	-1.10734
.03516	.17921	.79534	-.97455
.03594	-.06460	.85959	-.79499
.03672	-.28517	.86433	-.57916
.03750	-.46976	.80946	-.33970
.03828	-.60774	.69846	-.09071
.03906	-.69132	.53816	.15316
.03984	-.71591	.33836	.37754
.04062	-.68047	.11121	.56925
.04141	-.58754	-.12950	.71703
.04219	-.44309	-.36918	.81227
.04297	-.25619	-.59330	.84949
.04375	-.03842	-.78827	.82669
.04453	.19679	-.94223	.74545
.04531	.43497	-1.04583	.61086
.04609	.66148	-1.09268	.43120
.04687	.86241	-1.07985	.21745
.04766	1.02535	-1.00796	-.01739
.04844	1.14022	-.88118	-.25903
.04922	1.19980	-.70698	-.49282
.05000	1.20020	-.49565	-.70454

Додаток В
Лістинг дослідження впливу АРЗ на перехідний процес

Файл даних до програми DIFUR

.00000 .08000 .00010 3
.00000 .00000 .00000

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЙ СТРУМІВ ПО ФАЗАХ

t, c	A	B	C
.00000	.00000	.00000	.00000
.00125	.07550	-.36427	.28876
.00250	.28662	-.73382	.44721
.00375	.59551	-1.05006	.45456
.00500	.94968	-1.26258	.31290
.00625	1.28996	-1.33685	.04689
.00750	1.55947	-1.25947	-.30000
.00875	1.71233	-1.04022	-.67211
.01000	1.72060	-.71054	-1.01005
.01125	1.57851	-.31878	-1.25972
.01250	1.30339	.07721	-1.38059
.01375	.93296	.41886	-1.35182
.01500	.51964	.65580	-1.17544
.01625	.12250	.75355	-.87606
.01750	-.20167	.69875	-.49708
.01875	-.40708	.50120	-.09412
.02000	-.46586	.19239	.27347
.02125	-.36973	-.18898	.55871
.02250	-.12384	-.59570	.71954
.02375	.24466	-.96363	.71897
.02500	.68591	-1.22814	.54224
.02625	1.13296	-1.33457	.20162
.02750	1.51090	-1.24819	-.26270
.02875	1.74819	-.96198	-.78620
.03000	1.78865	-.50075	-1.28789
.03125	1.60618	.06502	-1.67120
.03250	1.22297	.63799	-1.86096
.03375	.69567	1.13026	-1.82593
.03500	.10292	1.46625	-1.56917
.03625	-.46660	1.59421	-1.12760
.03750	-.92770	1.49405	-.56635
.03875	-1.21162	1.18047	.03114

.04000	-1.27653	.70066	.57586
.04125	-1.11764	.14116	.97648
.04250	-.77760	-.39768	1.17528
.04375	-.32515	-.83807	1.16322
.04500	.16109	-1.12423	.96313
.04625	.60518	-1.22846	.62328
.04750	.94472	-1.15254	.20782
.04875	1.13877	-.92460	-.21417
.05000	1.17178	-.59244	-.57934
.05125	1.05094	-.20525	-.84569
.05250	.79624	.18635	-.98259
.05375	.44545	.52378	-.96923
.05500	.05099	.75667	-.80766
.05625	-.32801	.85052	-.52251
.05750	-.63476	.79197	-.15722
.05875	-.82341	.59082	.23259
.06000	-.86608	.27854	.58754
.06125	-.75707	-.09650	.85357
.06250	-.51374	-.47642	.99017
.06375	-.17388	-.80263	.97651
.06500	.21006	-1.02472	.81466
.06625	.57896	-1.10820	.52924
.06750	.87600	-1.03968	.16369
.06875	1.05532	-.82895	-.22636
.07000	1.08901	-.50746	-.58155
.07125	.97138	-.12356	-.84782
.07250	.71976	.26488	-.98464
.07375	.37193	.59927	-.97120
.07500	-.01968	.82924	-.80956
.07625	-.39595	.92029	-.52434
.07750	-.70007	.85904	-.15898
.07875	-.88620	.65530	.23089
.08000	-.92644	.34053	.58591

Додаток Г
Лістинг дослідження перехідного процесу по Парку (park.dgo)

(Uf=1., Tf0=1., Xad=0.9, Xf=1.)

Інтегрування методом Рунге-Кутта

АРГУМЕНТ	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЙ		
t, c	If	Ud	Uq
.00000	.00000	.00000	.00000
.10000	.09516	-.81435	.08565
.20000	.18127	-.73686	.16314
.30000	.25918	-.66674	.23326
.40000	.32968	-.60329	.29671
.50000	.39347	-.54588	.35412
.60000	.45119	-.49393	.40607
.70000	.50341	-.44693	.45307
.80000	.55067	-.40440	.49560
.90000	.59343	-.36591	.53409
1.00000	.63212	-.33109	.56891
1.10000	.66713	-.29958	.60042
1.20000	.69881	-.27108	.62892
1.30000	.72747	-.24528	.65472
1.40000	.75340	-.22194	.67806
1.50000	.77687	-.20082	.69918
1.60000	.79810	-.18171	.71829
1.70000	.81732	-.16442	.73558
1.80000	.83470	-.14877	.75123
1.90000	.85043	-.13461	.76539
2.00000	.86466	-.12180	.77820
2.10000	.87754	-.11021	.78979
2.20000	.88920	-.09972	.80028
2.30000	.89974	-.09023	.80977
2.40000	.90928	-.08165	.81835
2.50000	.91791	-.07388	.82612
2.60000	.92573	-.06685	.83315
2.70000	.93279	-.06049	.83951
2.80000	.93919	-.05473	.84527
2.90000	.94498	-.04952	.85048
3.00000	.95021	-.04481	.85519
3.10000	.95495	-.04054	.85946
3.20000	.95924	-.03669	.86331
3.30000	.96312	-.03319	.86681
3.40000	.96663	-.03004	.86996

3.50000	.96980	-.02718	.87282
3.60000	.97268	-.02459	.87541
3.70000	.97528	-.02225	.87775
3.80000	.97763	-.02013	.87987
3.90000	.97976	-.01822	.88178
4.00000	.98168	-.01648	.88352
4.10000	.98343	-.01492	.88508
4.20000	.98500	-.01350	.88650
4.30000	.98643	-.01221	.88779
4.40000	.98772	-.01105	.88895
4.50000	.98889	-.01000	.89000
4.60000	.98995	-.00905	.89095
4.70000	.99090	-.00819	.89181
4.80000	.99177	-.00741	.89259
4.90000	.99255	-.00670	.89330
5.00000	.99326	-.00606	.89394

Додаток Д
Лістинг результатів дослідження перехідного процесу
в координатах А, В, С

($U_f=1.$, $\gamma_0=0.$, $T_{f0}=1.$, $X_f=1.$, $X_{ad}=0.9$)

Інтегрування методом Рунге-Кутта

АРГУМЕНТ		ЗНАЧЕННЯ			ФУНКЦІЙ	
t, c	If	Ud	Uq	Ua	Ub	Uc
.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
.00100	.00100	-.89910	.00090	-.89910	.44877	.45033
.00200	.00200	-.89820	.00180	-.85369	.18499	.66870
.00300	.00300	-.89730	.00270	-.72435	-.09648	.82082
.00400	.00399	-.89641	.00359	-.52399	-.36788	.89187
.00500	.00499	-.89551	.00449	-.27246	-.60255	.87501
.00600	.00598	-.89462	.00538	.00538	-.77745	.77207
.00700	.00698	-.89372	.00628	.28214	-.87550	.59335
.00800	.00797	-.89283	.00717	.53059	-.88719	.35660
.00900	.00896	-.89194	.00806	.72633	-.81154	.08522
.01000	.00995	-.89104	.00896	.85020	-.65618	-.19401
.01100	.01094	-.89015	.00985	.89015	-.43655	-.45360
.01200	.01193	-.88926	.01074	.84242	-.17439	-.66803
.01300	.01292	-.88838	.01162	.71188	.10442	-.81630
.01400	.01390	-.88749	.01251	.51153	.37240	-.88393
.01500	.01489	-.88660	.01340	.26123	.60321	-.86444
.01600	.01587	-.88571	.01429	-.01428	.77419	-.75991
.01700	.01686	-.88483	.01517	-.28785	.86865	-.58080
.01800	.01784	-.88394	.01606	-.53256	.87742	-.34487
.01900	.01882	-.88306	.01694	-.72437	.79983	-.07546
.02000	.01980	-.88218	.01782	-.84451	.64366	.20084
.02100	.02078	-.88130	.01870	-.88130	.42445	.45684
.02200	.02176	-.88042	.01958	-.83128	.16390	.66738
.02300	.02274	-.87954	.02046	-.69953	-.11229	.81182
.02400	.02371	-.87866	.02134	-.49920	-.37688	.87607
.02500	.02469	-.87778	.02222	-.25012	-.60386	.85398
.02600	.02566	-.87690	.02310	.02309	-.77097	.74787
.02700	.02664	-.87603	.02397	.29350	-.86187	.56836
.02800	.02761	-.87515	.02485	.53450	-.86776	.33326
.02900	.02858	-.87427	.02573	.72242	-.78823	.06581
.03000	.02955	-.87340	.02660	.83887	-.63127	-.20760

Додаток Е
**Лістинг розв'язку при короткому замиканні
на виводах генератора**

Файл даних до програми DIFUR

.000 10.000 .0001 3
.000 .000 1.000

Інтегрування методом Кутта-Мерсона
АРГУМЕНТ ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЙ

t,c	Id	Iq	If
.00000	.00000	.00000	1.00000
.15625	-.03496	.11718	1.02980
.31250	-.11420	.22633	1.09184
.46875	-.21452	.32520	1.16230
.62500	-.32388	.41221	1.22999
.78125	-.43544	.48636	1.28967
.93750	-.54485	.54706	1.33889
1.25000	-.74593	.62764	1.40277
1.56250	-.91110	.65621	1.42150
1.87500	-1.03178	.63916	1.40072
2.18750	-1.10506	.58577	1.34886
2.50000	-1.13269	.50686	1.27571
2.81250	-1.12007	.41362	1.19123
3.12500	-1.07517	.31655	1.10465
3.43750	-1.00740	.22469	1.02381
3.75000	-.92651	.14511	.95473
4.37500	-.76109	.03958	.86563
5.00000	-.63520	.01194	.84586
5.62500	-.57537	.04640	.87986
6.25000	-.57944	.11291	.94034
6.87500	-.62619	.18093	1.00035
7.50000	-.68785	.22898	1.04151
8.12500	-.74073	.24847	1.05699
8.75000	-.77124	.24229	1.05004
9.37500	-.77694	.22037	1.02981
10.00000	-.76383	.19440	1.00669

Додаток Ж
Лістинг розв'язку при вивченні демпферного ефекту
в синхронній машині

(Uf=1., Tf0=1., Xad=0.9 Xf=1., T1d0=1., X1d=1.)

Файл даних до програми DIFUR

.00000 9.00000 .00001 2

.00000 .00000

Інтегрування методом Кутта-Мерсона

АРГУМЕНТ	ЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЙ			
t, c	If	I1d	Ud	Uq
.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
.03516	.15737	-.13904	-.46500	.01650
.07031	.27064	-.23431	-.45648	.03270
.10547	.35284	-.29885	-.44811	.04860
.14063	.41314	-.34180	-.43989	.06421
.17578	.45797	-.36960	-.43183	.07953
.21094	.49188	-.38680	-.42391	.09457
.24609	.51806	-.39658	-.41614	.10934
.28125	.53877	-.40118	-.40851	.12383
.31641	.55557	-.40217	-.40102	.13806
.35156	.56960	-.40067	-.39367	.15203
.38672	.58162	-.39746	-.38645	.16574
.42188	.59220	-.39308	-.37937	.17920
.49219	.61046	-.38225	-.36558	.20539
.56250	.62632	-.37007	-.35230	.23063
.63281	.64074	-.35747	-.33950	.25495
.70313	.65421	-.34490	-.32717	.27838
.77344	.66698	-.33258	-.31528	.30096
.84375	.67918	-.32060	-.30383	.32273
.98438	.70215	-.29780	-.28215	.36391
1.12500	.72341	-.27657	-.26202	.40215
1.26563	.74315	-.25685	-.24333	.43767
1.40625	.76147	-.23853	-.22597	.47065
1.68750	.79429	-.20571	-.19488	.52973
2.25000	.84701	-.15299	-.14494	.62461
2.81250	.88622	-.11380	-.10780	.69518
3.09375	.90187	-.09813	-.09297	.72336

Додаток И
Витяг з ГОСТ 27514-87 «КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ
В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ»

1.1.1. Даний стандарт встановлює загальну методику розрахування струмів короткого замикання, необхідних для вибору і перевірки електроустаткування за умови короткого замикання; для вибору уставок і оцінки можливої дії релейного захисту та автоматики; для визначення впливу струмів нульової послідовності ліній електропередачі на лінії зв'язку; для вибору заземлювальних пристроїв.

1.1.4. Розрахування струмів в довільний момент часу в окремих вітках розрахункової схеми вимагають врахування електромеханічних перехідних процесів і їх слід проводити із застосуванням засобів обчислювальної техніки, використовуючи програми розрахунків динамічної стійкості електроенергетичних систем.

1.1.6. Розрахування періодичної складової струму короткого замикання допускається проводити, не враховуючи активних опорів елементів електроенергетичної системи, зокрема, повітряних і кабельних ліній електропередачі, якщо результуючий еквівалентний активний опір щодо точки короткого замикання не перевищує 30% результуючого еквівалентного індуктивного опору.

1.2. Склад необхідних для розрахування струмів короткого замикання параметрів елементів розрахункової схеми.

1.2.1. Склад параметрів конкретних елементів розрахункової схеми, який в загальному випадку необхідний для розрахування струмів короткого замикання, вказаний нижче.

1.2.1.1. Синхронні машини (генератори, компенсатори, електродвигуни):

- повна номінальна потужність $S_{\text{ном}}$, МВА, або номінальна активна потужність $P_{\text{ном}}$, Мвт, і номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{ном}}$;
- номінальна напруга $U_{\text{ном}}$, кВ;
- надперехідний опір по поздовжній осі x''_{*d} ;
- надперехідний опір по поперечній осі x''_{*q} ;
- перехідний опір по поздовжній осі x'_{*d} ;
- синхронний опір по поздовжній осі x_{*d} ;
- синхронний опір по поперечній осі x_{*q} ;
- опір зворотної послідовності x_{*2} ;
- опір розсіювання обмотки статора $x_{*\sigma}$;
- індуктивний опір обмотки збудження x_{*f} ;
- індуктивний опір поздовжньої демпферної обмотки x_{*1d} ;

- індуктивний опір поперечної демпферної обмотки x_{*lq} ;
- активний опір обмотки збудження (при робочій температурі) R_f , Ом;
- активні опори поздовжньої і поперечної демпферних обмоток (при робочій температурі) R_{ld} та R_{lq} , Ом;
- постійні часу згасання аперіодичної складової струму статора при трифазному і однофазному короткому замиканні на виводах машини $T_a^{(3)}$ та $T_a^{(1)}$, с;
- граничний струм збудження машини I_{fn} , А;
- струм збудження машини при роботі в режимі холостого ходу з номінальною напругою I_{f0} , А;
- коефіцієнт корисної дії (для синхронних електродвигунів) η , %;
- напруга, струм статора і коефіцієнт потужності в момент, що передує короткому замиканню: $U_{|0|}$, $I_{|0|}$ та $\cos\varphi$.

1.2.1.2. Асинхронні електродвигуни:

- номінальна потужність $P_{ном}$, МВт;
- номінальна напруга $U_{ном}$, кВ;
- номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{ном}$;
- кратність пускового струму відносно до номінального струму $K_{п}$;
- кратність максимального моменту відносно до номінального моменту $b_{ном}$;
- опір статора постійному струму (при робочій температурі) R , Ом;
- коефіцієнт корисної дії η , %;
- напруга, струм і коефіцієнт потужності в момент, що передує короткому замиканню.

1.2.1.3. Силкові трансформатори і автотрансформатори:

- номінальна потужність $S_{ном}$, МВА;
- номінальні напруги обмоток, кВ, і фактичні коефіцієнти трансформації;
- напруга короткого замикання між обмотками і її залежність від коефіцієнтів трансформації;
- діапазон регулювання напруги, що визначає напругу короткого замикання в умовах короткого замикання;
- втрати короткого замикання в обмотках, кВт.

1.2.1.4. Струмообмежувальні реактори:

- номінальна напруга $U_{ном}$, кВТ;
- номінальний струм $I_{ном}$, А;
- номінальний індуктивний опір x_p , Ом, або індуктивність L , мГн;
- номінальний коефіцієнт зв'язку $K_{св}$ (тільки для здвоєних реакторів);

- втрати потужності при номінальному струмі ΔP , кВт.
- 1.2.1.5. Повітряні та кабельні лінії електропередачі:
- номінальна напруга $U_{\text{ном}}$, кВ;
 - індуктивний опір прямої послідовності x_1 , Ом/км;
 - індуктивний опір нульової послідовності x_0 , Ом/км;
 - взаємний індуктивний опір нульової послідовності x_{m0} (при наявності декількох повітряних ліній на одній трасі), Ом/км;
 - активні опори прямої та нульової послідовностей R_1 і R_0 , Ом/км;
 - довжина лінії l , км;
 - ємність C , Ф/км.

1.2.1.6. Шунтувальні реактори:

- номінальна напруга $U_{\text{ном}}$, кВ;
- номінальна потужність $S_{\text{ном}}$, кВА.

1.2.2. При розрахуванні струмів короткого замикання всі джерела електроенергії, для яких коротке замикання є віддаленим (див. п. 5.3), і відповідні елементи електричної мережі можуть бути еквівалентовані відносно точки короткого замикання або іншого вибраного вузла мережі одним джерелом незмінної напруги та одним опором (далі таке джерело називається “системою”).

Якщо для конкретного вузла мережі відоме значення струму трифазного короткого замикання від системи $I_k^{(3)}$, кА, або потужності трифазного короткого замикання від системи $S_k^{(3)}$, МВА, то еквівалентний індуктивний опір системи (x_c) в Омах може бути визначений за виразом:

$$x_c = \frac{U_{\text{ср. ном}}}{\sqrt{3}I_k^{(3)}} = \frac{U_{\text{ср. ном}}^2}{S_k^{(3)}}$$

де $U_{\text{ср. ном}}$ – середня номінальна напруга мережі (див. п. 1.3.2), кВ, відповідного ступеня напруги, у вузлі якої відоме значення $I_k^{(3)}$ або $S_k^{(3)}$.

При цьому ЕРС системи слід приймати такою, що дорівнює середній номінальній напрузі мережі відповідного ступеня напруги.

2.2. Синхронні і асинхронні машини в заступну схему повинні вводитись надперехідними опорами і надперехідними ЕРС. Останні слід приймати числово рівними значенням цих ЕРС в момент, що передує короткому замиканню.

8.1. Розрахування струмів несиметричних коротких замикань рекомендується виконувати з використанням методу симетричних складових. При цьому заздалегідь необхідно скласти схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей.

9.1. При розрахуванні струмів короткого замикання слід враховувати впливи кожного комплексного навантаження, якщо струм в місці

короткого замикання від нього складає не менше 5% струму в місці короткого замикання, визначеного без врахування навантаження.

9.5. Максимальну амплітуду струму короткого замикання від конденсаторних батарей поперечної компенсації (I_{\max}) в кілоамперах слід визначати за формулою:

$$I_{\max} = \frac{U_{c|0}}{\sqrt{3} \omega_0 (L_{\kappa} + L_{\text{вш}})},$$

де $U_{c|0}$ – напруга на конденсаторній батареї до короткого замикання, кВ;

L_{κ} і $L_{\text{вш}}$ – індуктивності, відповідно, конденсаторної батареї та кіл між батареєю і точкою короткого замикання, Гн;

ω_0 – кутова частота власних коливань короткозамкнутого контура з конденсаторною батареєю, рад/с.

Додаток К

Витяг з керівних вказівок із визначення стійкості енергосистем

1. Тимчасові керівні вказівки містять загальні положення щодо визначення стійкості при проектуванні і експлуатації енергосистем.

Тимчасові керівні вказівки розповсюджуються на енергосистеми, їх об'єднання і основні елементи енергосистем: електропередачі змінного струму, що з'єднують електростанції з енергосистемами, міжсистемні зв'язки і вузли навантажень.

Тимчасові керівні вказівки встановлюють:

а) початкові умови і загальний підхід до оцінки стійкості і методів її визначення;

б) вимоги, яким повинні відповідати відносно стійкі енергосистеми, їх об'єднання і, зокрема, окремі електропередачі і вузли навантажень.

3. Метою розрахунків є:

а) визначення стійкості режимів, що перевіряються, і запасів стійкості, виявлення характеру перехідних процесів;

б) вибір спеціальних заходів для підвищення стійкості енергосистем, електропередач і вузлів навантаження;

в) розробка нових вимог до основних елементів і електрообладнання енергосистем, релейного захисту і пристроїв системної автоматики з погляду стійкості енергосистем.

6. Трудомістким розрахункам стійкості повинна передувати наближена її оцінка на основі практичних критеріїв, які визначаються за допомогою наближених методів і дозволяють оцінити стійкість із запасом. Грубими показниками можуть служити кути електропередач в нормальному і післяаварійному режимах, залишкові напруги на шинах електростанцій при коротких замиканнях на лініях, що відходять, і т.п.

Якщо наближена оцінка показує наявність запасу стійкості енергосистеми або її частини, яка значно перевищує потрібний, то немає необхідності виконувати розрахунки стійкості точнішими методами. Проте уточнення розрахунків необхідне, якщо є підстава вважати, що більш точне визначення стійкості дозволить поліпшити техніко-економічні показники об'єкта.

7. Розрахування стійкості, в залежності від їх призначення і достовірності початкових даних, виконуються в різному обсязі та з різним ступенем точності.

8. Розрахунки стійкості повинні виконуватися для таких режимів роботи:

а) режим нормальної роботи енергосистеми при найбільш напружених тривалих умовах роботи енергосистеми; максимальне активне або реактивне навантаження енергосистеми, режими найбільшого навантаження основних електропередач та інших елементів

енергосистеми, що перевіряються; для енергосистем з потужними гідроелектростанціями – режими паводку при мінімальному навантаженні теплових електростанцій; для об'єднань – режими максимальних потоків, обтяжені умови живлення навантажень, що перевіряються, і т. п.;

б) післяаварійний режим – сталий режим, який настає безпосередньо після ліквідації аварії, що супроводжується вимиканням будь-якого елемента енергосистеми, що викликає істотне погіршення умов стійкості (до втручання персоналу). Для цього режиму виконуються тільки розрахунки статичної стійкості;

в) ремонтні режими – режими, що виникають внаслідок виводу в ремонт основних елементів енергосистеми, які істотно впливають на стійкість енергосистеми в цілому, або на стійкість ділянки, що перевіряється;

г) короточасні особливо важкі режими, що відрізняються від звичайних меншою надійністю і тому нормально не вживані.

Примітка. В окремих випадках необхідна перевірка відсутності статичної нестійкості при малих навантаженнях електропередачі (саморозгойдування), а також перевірка відсутності самозбудження при роботі генераторів на ємнісне навантаження.

9. При розрахунках стійкості, як правило, буває доцільно значно спростити схеми енергосистем. Спрощення має на меті скласти таку схему, яка, полегшуючи розрахунки, знижує кількість елементів, що беруть участь, і дає можливість одержати достатньо надійні і практично осяжні результати, не перевищуючи можливостей наявних засобів розрахунку.

19. Основними розрахунковими методами, залежно від призначення розрахунку і обчислювальних засобів, можуть бути такі:

а) визначення статичної стійкості за “сповзанням” з використанням критерію рівності нулю вільного члена характеристичного рівняння або еквівалентних йому практичних критеріїв: рівність нулю похідної активної потужності, яка передається, за кутом, реактивної потужності за напругою і т.п.;

б) визначення статичної стійкості за характером перехідного процесу при малому збудженні системи;

в) визначення статичної стійкості розрахунком критеріїв, заснованих на застосуванні методу малих коливань системи (розрахунку вільного члена і передостаннього визначника Гурвиця для аналізу коренів характеристичного рівняння, перевірка за критерієм Михайлова і т.п.).

21. Енергетична система повинна працювати так, щоб деякі зміни режиму не приводили до порушень стійкості.

Запас стійкості оцінюється співвідношенням показників режиму, що перевіряється, (початкового) і показників, що характеризують режим, граничний за стійкістю.

22. Запас статичної стійкості енергосистеми в цілому в нормальному режимі повинен бути не менше 10 %. Величина запасу визначається для кожної з основних вузлових точок енергосистеми за формулою:

$$K_u = \frac{U_n - U_{кр}}{U_n} 100,$$

U_n – напруга у вузловій точці енергосистеми, яка тривалий час підтримується;

$U_{кр}$ – критична напруга (у цій же точці), при якій порушується статична стійкість енергосистеми.

Запас статичної стійкості енергосистеми в цілому оцінюється за найменшою величиною запасу, яка одержана для основних вузлових точок. У тих випадках, коли найгірша точка відома, розрахунок може бути обмежений визначенням запасу для однієї точки.

У тих випадках, коли сумнівною є тільки стійкість навантаження, слід перевіряти цю стійкість по відношенню до тієї еквівалентної напруги або ЕРС, які в даному випадку можуть розглядатися як незмінні. Запас стійкості, що визначається величиною зниження цієї напруги (або ЕРС), при якій порушується стійкість навантаження, повинен бути не менше 10%.

Особливу увагу треба звернути на перевірку статичної стійкості крупних вузлів асинхронного навантаження у разі більшого коефіцієнта завантаження двигунів і високого ступеня компенсації реактивної потужності за допомогою статичних конденсаторів.

23. Запас статичної стійкості електропередачі, що пов'язує електростанцію з енергосистемою, повинен бути не менше 20 % – в нормальному режимі; 8 % – в короткочасному післяаварійному режимі (до втручання персоналу в регулювання режиму).

Запас стійкості визначається за формулою, %:

$$K_p = \frac{P_{пр} - P}{P} 100,$$

де K_p – запас стійкості;

$P_{пр}$ – гранична потужність, що передається, визначена з умов стійкості режиму з урахуванням дії автоматичних пристроїв;

P – активна потужність, що передається.

24. Статична стійкість в післяаварійних режимах повинна забезпечуватись, як правило, за рахунок заходів, що не вимагають додаткових капітальних витрат: короткочасне підвищення напруги, швидке зниження навантаження електропередачі вимкненням частини генераторів і т.п.

При однофазних коротких замиканнях на двоколових лініях або при випадкових відключеннях одного з паралельних кіл нормативні запаси стійкості повинні забезпечуватись без застосування цих заходів.

25. При експлуатації в тих випадках, коли це необхідно для запобігання обмеження споживачів або втрат гідроресурсів, допускається тривала робота електропередачі в нормальному режимі із запасом статичної стійкості, зменшеним до 5 – 10 % залежно від значимості електропередачі в енергосистемі і наслідків можливого порушення стійкості.

При цьому для електропередач, збереження стійкості яких неістотно для енергосистеми в цілому, може не забезпечуватися статична стійкість в післяаварійному режимі.

26. При розрахуванні міжсистемних зв'язків вказані вимоги повинні бути також дотримані, але коефіцієнти запасу стійкості, в цьому випадку, підраховуються за формулою %:

$$K_p = \frac{P_{пр} - \Delta P - P}{P} 100,$$

де ΔP – враховує збільшення потужності, що передається, за рахунок неперіодичних коливань потужності по міжсистемній електропередачі, викликаних коливаннями навантаження і частоти в енергосистемах.

Значення ΔP приймається на основі досвіду експлуатації для аналогічних випадків. За відсутності достовірних даних про величини нерегулярних коливань потужності по міжсистемних зв'язках, можна приймати ΔP рівним 2 % від сумарної потужності генераторів меншої із з'єднаних енергосистем.

Додаток Л

Питання для самоконтролю при вивченні електромагнітних перехідних процесів при аварійних збуреннях

Попередні теоретичні відомості

1. Мета навчальної дисципліни і її місце в підготовці інженера-електрика.
2. Роль перехідних режимів електричних систем в розвитку електроенергетики.
3. Спрощена картина єдиного перехідного процесу в енергосистемі при збуренні її режиму.
4. Штучне розділення єдиного перехідного процесу на електромагнітну і електромеханічну частини.
5. Причини і наслідки різних ненормальних і аварійних збурень енергосистеми.
6. Необхідність розрахування перехідних режимів для прогнозування їх наслідків.
7. Визначення простої електричної системи.
8. Розв'язування диференціального рівняння перехідного процесу для простої системи.
9. Аналітичний вираз перехідного струму і двох його складових.
10. Осцилограми струмів короткого замикання, виділення складових.
11. Періодична складова струму короткого замикання.
12. Аперіодична складова струму короткого замикання.
13. Залежність максимуму аперіодичного струму від попереднього режиму.
14. Постійна часу та її визначення.
15. Ударний струм короткого замикання.
16. Діюче значення періодичного струму.
17. Надперехідний струм.
18. Сталий струм.
19. Діюче значення аперіодичного струму.
20. Діюче значення повного струму.
21. Умова виникнення найбільшого діючого значення повного струму.
22. Суть і доцільність системи відносних одиниць.
23. Отримання розрахункових виразів відносних опорів елементів енергосистем.

Практичні методи розрахунків при збереженні симетрії системи

1. Характеристика інженерних методів розрахування струмів короткого замикання з погляду обчислювального процесу.
2. Суть методу розрахункових кривих.
3. Алгоритм розрахунку короткого замикання за загальною зміною струму.
4. Алгоритм розрахунку за індивідуальною зміною струмів.
5. Електричне навантаження і його роль в процесі короткого замикання.
6. Природа виникнення недостатності інформації про живильну систему.
7. Форми задання інформації про систему – визначена, частково невизначена і значно невизначена.
8. Методи, що реалізуються в машинних програмах розрахування струмів трифазних коротких замикань.
9. Характеристика програм розрахування струмів трифазних коротких замикань.

Практичні методи розрахунку при порушенні симетрії системи

1. Ідея методу симетричних складових.
2. Матричне представлення методу симетричних складових.
3. Вираження параметрів режиму в координатах симетричних складових.
4. Співвідношення для несиметричного кола.
5. Чи існує фізичний зміст симетричних складових параметрів режиму?
6. Опір елементів енергосистем струмам прямої послідовності.
7. Опір елементів енергосистем струмам зворотної послідовності.
8. Опір елементів енергосистем струмам нульової послідовності.
9. Схема заміщення прямої послідовності при поперечній несиметрії.
10. Схема заміщення зворотної послідовності при поперечній несиметрії.
11. Схема заміщення нульової послідовності при поперечній несиметрії.
12. Формулювання алгоритму складання схеми заміщення нульової послідовності при поперечній несиметрії.
13. Схеми заміщення при поздовжній несиметрії:
 - а) особливості увімкнення джерела напруги в схему;
 - б) особливості циркулювання струму нульової послідовності.

14. Алгоритм складання схеми заміщення нульової послідовності при поздовжній несиметрії.
15. Трансформація струмів на прикладі трансформатора “зірка-трикутник-11”.
16. Трансформація напруги симетричних складових на прикладі того ж трансформатора.
17. Узагальнення одержаних закономірностей для довільного типу трансформатора.
18. Введення понять комплексних коефіцієнтів трансформації прямої і зворотної послідовностей.
19. Що означає розглянути несиметричне пошкодження в системі?
20. Двофазне коротке замикання:
 - а) формування системи 4-х лінійних рівнянь для двофазного замикання;
 - б) матричне узагальнене уявлення;
 - в) доведення того, що матричне рівняння можна розв’язати;
 - г) знаходження вектора змінних в координатах симетричних складових;
 - д) побудова векторних діаграм струмів і напруг.
21. Принципові схеми пошкодження і граничні умови для однофазного замикання:
 - а) формування розрахункової системи рівнянь;
 - б) матрична форма рівнянь;
 - в) доведення того, що матричне рівняння можна розв’язати;
 - г) перехід до фазних координат;
 - д) векторні діаграми струмів і напруг в точці пошкодження.
22. Двофазне коротке замикання на землю:
 - а) розрахункова схема при пошкодженні;
 - б) матричне уявлення;
 - в) визначення вектора параметрів режиму в координатах симетричних складових;
 - г) перехід до фазних координат;
 - д) векторні діаграми струмів і напруг в точці пошкодження.
23. Правило еквівалентності прямої послідовності Н. Щедріна.
24. Додатковий опір для всіх видів несиметричних коротких замикань.
25. Виявлення зв'язку повного струму пошкодження із струмом прямої послідовності.
26. Коефіцієнти зв'язку для різних пошкоджень.
27. Формулювання алгоритмів розрахунку за загальною зміною.
28. Врахування навантаження при несиметричних пошкодженнях.
29. Суть і призначення комплексних заступних схем при поперечній несиметрії.

30. Принципи, що покладені в основу побудови комплексних схем.
31. Можливі шляхи автоматизації розрахування струмів короткого замикання на основі комплексних заступних схем.
32. Алгоритм ітераційного розрахунку, що реалізується на ЕОМ.
33. Характеристика програм, які використовуються в енергосистемах для розрахування струмів короткого замикання.

Теорія перехідних процесів в синхронних машинах на основі рівнянь Парка-Горєва

1. Рівняння балансу ЕРС і падінь напруг в контурах синхронної машини.
2. Поняття про узагальнений вектор трифазної системи.
3. Представлення узагальненого вектора в прямокутній системі координат. Зв'язок з фазними координатами.
4. Вираження фазних величин в координатах ХОУ.
5. Вираження величин, взятих в прямокутній системі, у фазних координатах.
6. Вирази U-D, U-Q, U-0 гіпотетичної двовісної машини.
7. Диференціальна форма рівнянь Парка-Горєва.
8. Операторна форма рівнянь Парка-Горєва.
9. Формулювання алгоритму дослідження перехідних процесів в синхронній машині на основі рівнянь Парка-Горєва.
10. Енергетичний сенс форсування збудження і перехідні режими, пов'язані із форсуванням.
11. Енергетичний сенс гасіння поля і перехідні режими, пов'язані з гасінням поля.
12. Синтез граничних умов для дослідження трифазного замикання.
13. Вектор змінних в координатах d-q-0 і операторних приростах.
14. Формування розрахункової моделі.
15. Знаходження операторних приростів параметрів режиму.
16. Перехід до оригіналів.
17. Облік нульових початкових умов.
18. Перехід до фазних координат.
19. Вплив демпферних обмоток на розвиток перехідних процесів в синхронній машині.
20. Можливості залучення пакетів прикладних програм для аналізу перехідних процесів на основі рівнянь Парка-Горєва.

Проблема координації і оптимізації струмів короткого замикання в системах

1. Енергетична суть проблеми і її причини.

2. Технічні засоби і методи струмообмеження.
3. Шляхи побудови математичної моделі оптимізації струмів короткого замикання в системах.

Додаток М

Питання для самоконтролю при вивченні електромеханічних перехідних процесів

Статична стійкість

1. Фізична суть проблеми статичної стійкості енергосистем.
2. Ідеальна статична межа потужності енергосистеми і її аналіз.
3. Поняття дійсної межі потужності електропередачі.
4. Прямий критерій статичної стійкості простої системи за критерієм Гурвиця.
5. Алгоритм аналізу статичної стійкості системи за критерієм Михайлова.
6. Суть і алгоритм перевірки статичної стійкості енергосистем.
7. Суть вторинних критеріїв статичної стійкості енергосистем.
8. Суть і алгоритм перевірки статичної стійкості енергосистеми за вторинним критерієм $\frac{dE}{dU} = 0$.
9. Суть і алгоритм перевірки статичної стійкості енергосистеми за вторинним критерієм $\frac{dQ}{dU} = 0$.
10. Суть методу малих відхилень для аналізу статичної стійкості простої системи.
11. Заходи щодо підвищення статичної стійкості системи.
12. Суть проблеми статичної стійкості навантаження.
13. Прямий критерій статичної стійкості навантаження $\frac{dP}{dS} = 0$.
14. Вторинний критерій статичної стійкості асинхронного навантаження $\frac{dQ}{dU} = -\infty$.
15. Фізичний зміст процесу “лавини напруги” при втраті стійкості навантаження.
16. Характеристика програмного забезпечення розрахування статичної стійкості.
17. Методика дослідження статичної стійкості простої системи в умовах експерименту.

Динамічна стійкість

1. Фізична суть проблеми динамічної стійкості енергосистем.
2. Кутові характеристики потужності при різних сильних збуреннях режиму.

3. Правило площ при оцінці динамічної стійкості енергосистем.
4. Критичний кут на кутовій характеристиці, його фізичний зміст і математичний опис.
5. Вплив швидкості вимкнення аварійного режиму на збереження стійкості системи.
6. Граничний кут вимкнення, його фізичний зміст і математичний опис.
7. Метод послідовних інтервалів для перевірки динамічного переходу.
8. Обчислювальний алгоритм методу послідовних інтервалів.
9. Особливості аналізу динамічної стійкості системи за наявності АРЗ генераторів.
10. Методика дослідження динамічної стійкості простої системи в умовах експерименту.
11. Характеристика програмного забезпечення розрахування динамічної стійкості.

Результуюча стійкість

1. Суть проблеми результуючої стійкості енергосистеми.
2. Необхідні і достатні умови ресинхронізації генератора після порушення стійкості системи.
3. Методика дослідження результуючої стійкості простої систем в умовах експерименту.

Додаток Н

Завдання і методичні вказівки до лабораторних і практичних занять з теми: «Дослідження перехідного процесу при трифазному короткому замиканні в простій системі»

Простою системою при дослідженні перехідного процесу прийнято вважати систему з одним генератором нескінченної потужності, що працював в передаварійному режимі на активно-індуктивне навантаження через електропередачу з активним і реактивним опором.

Перехідний процес при трифазному короткому замиканні для фаз А, В і С в цьому випадку описується такими диференціальними рівняннями, які є математичною моделлю процесу, що досліджується:

$$\text{tokA} \cdot R_k + \frac{X_k}{\omega} \cdot \frac{d\text{tokA}}{dt} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \text{alfa});$$

$$\text{tokB} \cdot R_k + \frac{X_k}{\omega} \cdot \frac{d\text{tokB}}{dt} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \text{alfa} - 2 \cdot \pi/3.);$$

$$\text{tokC} \cdot R_k + \frac{X_k}{\omega} \cdot \frac{d\text{tokC}}{dt} = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \text{alfa} + 2 \cdot \pi/3.),$$

де tokA , tokB , tokC – перехідні струми, що визначаються;

R_k – результуючий активний опір заступної схеми;

X_k – результуючий реактивний опір заступної схеми;

U_m – амплітуда напруг фаз А, В і С заступної схеми;

ω – кутова частота;

alfa – ”фаза увімкнення” на коротке замикання;

t – час;

$d\text{tokJ}/dt$ – похідна від струму за часом, $J=A, B, C$;

$\pi=3.14159$.

Дане коротке замикання може розвиватися за різних початкових умов щодо струму:

- попередній режим – холостий хід ($t=0$; $\text{tokJ}=0$);
- попередній режим – навантаження ($t=0$; $\text{tokJ} \neq 0$).

У самій заступній схемі можуть бути різні співвідношення між R_k і X_k (відношення $X_k/R_k=\text{Ta}$ визначає постійну часу короткозамкнутого кола).

До моменту $t=0$ (початок короткого замикання) положення U_m може бути різним на комплексній площині: напруга може проходити через

“нуль” (“фаза увімкнення” $\alpha=0$) або “фаза увімкнення” відмінна від “нуля” ($\alpha < 0$).

Все це створює велику множину варіантів умов протікання аварійного режиму і вимагає серйозного аналізу.

В лабораторній роботі студент здійснює перше дослідження перехідного процесу в простій системі, що полягає в розв’язуванні приведеної вище системи диференціальних рівнянь за нульових початкових умов на основі програми DIFUR при таких значеннях змінних:

$U_m=1.$
 $\alpha=0.$
 $f=50.$
 $\omega=2 \cdot \pi \cdot f$
 $R_k=0.2$
 $X_k=1.$

План виконання завдання

1. Ознайомитися з програмою DIFUR в частині побудови файлу даних:

```
program DIFUR
*   Интегрирование системы дифференциальных
уравнений,
*   разрешенных относительно производных, методом
*   Кутты – Мерсона
real instep
read(5,5)x,instep,acc,neqs,(y(i),i=1,neqs)
5 format(3f8.3,i3/10f8.3)
```

Де:

x - початкове значення аргумента;
 $instep$ - крок зміни аргумента;
 acc - необхідна точність;
 $neqs$ - кількість диференціальних рівнянь;
 y - початкові значення функцій.

2. Взяти до уваги, що програма DIFUR призначена для розв’язування системи диференціальних рівнянь, які перевірені відносно похідних, тобто:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y).$$

3. Рекомендується розглянути приведений нижче файл даних для деякого завдання (системи трьох диференціальних рівнянь):

0. 0.05 .001 3

0. 0. 0.

4. Підготувати на бланку програмування ці дані відповідно до відмічених в п. 1 форматів.

5. За допомогою текстового редактора створити файл даних і зберегти його з ім'ям DIFUR. dat на своїй дискеті.

6. Знайти в директорії Вашої групи програму DIFUR. exe, направити її на виконання.

7. Оформити звіт з лабораторної роботи, який включає:

- цілі і технологію виконання лабораторної роботи;
- побудову трьох осцилограм перехідного струму короткого замикання;
- виділення на кожній осцилограмі аперіодичного струму;
- знаходження значення ударного струму і часу його настання;
- визначення з осцилограм постійної часу згасання аперіодичного струму;
- лістинг розв'язку;
- аналіз результатів і висновки.

Додаток П

Завдання та методичні вказівки до лабораторних і практичних занять з теми «Дослідження перехідного процесу у трифазному мостовому перетворювачі»

Зовнішнє (на стороні змінного струму) трифазне коротке замикання шестипульсового мостового некерованого випрямляча для фази А описується таким диференціальним рівнянням, яке, по суті, є математичною моделлю процесу, що досліджується:

$$tok \cdot Rk + \frac{Xk}{\omega} \cdot \frac{dtok}{dt} = Um \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha),$$

де tok – перехідний струм, що досліджується;

Rk – результуючий активний опір заступної схеми;

Xk – результуючий реактивний опір заступної схеми;

Um – амплітуда фазової напруги в заступній схемі;

ω – кутова частота;

α – “фаза увімкнення” на коротке замикання;

t – час;

$dtok/dt$ – похідна від струму за часом.

Дане коротке замикання може розвиватися за різних початкових умов відносно струму, що досліджується:

- попередній режим – холостий хід ($t=0$; $tok=0$);
- попередній режим – навантаження ($t=0$; $tok \neq 0$).

В самій заступній схемі можуть бути різні співвідношення між Rk і Xk (відношення $Xk/Rk=Ta$ визначає постійну часу короткозамкнутого кола).

До моменту $t=0$ (початок короткого замикання) положення Um може бути різним на комплексній площині: напруга може проходити через “нуль” (“фаза увімкнення” $\alpha=0$) або “фаза увімкнення” відмінна від “нуля” ($\alpha \neq 0$).

Все це створює велику кількість варіантів умов протікання аварійного режиму і потребує серйозного аналізу.

В лабораторній роботі студент за завданням викладача досліджує:

- вплив постійної часу заступної схеми на тривалість несталого режиму;
- вплив постійної часу на величину амплітуди перехідного струму;
- вплив “фази увімкнення” α на величину ударного струму;
- вплив попереднього навантаження на величину амплітуди перехідного струму;
- поєднання чинників, що зумовлюють найважчі наслідки аварійного режиму;

- поєднання чинників, що зумовлюють найлегший (за наслідками) аварійний режим;
- вплив частоти живильної напруги на час настання ударного струму.

Ці та інші дослідницькі питання можуть бути з'ясовані в результаті багатократного розв'язування диференціального рівняння при зміні вхідних параметрів і (або) початкових умов.

Загальний алгоритм виконання роботи

1. Розробити (на базі попередніх знань перехідних режимів) план проведення числових експериментів.

2. Ознайомитися з описом підпрограм RK1 або RK2 пакета SSP на основі файлу \SSPLIB\spp_doc.

3. Ознайомитися з побудовою головного модуля, що відображає розв'язування деякого тестового диференціального рівняння на основі підпрограми RK2.

```

с  Эксперимент с программой difur.for
   external f
   dimension vec(11)
   call rk2(f,0.1,0.,0.,1,11,vec)
   write(*,5) (vec(i),i=1,11)
5  format (10x,f10.4)
   stop
   end
   function f(x,y)
   f=sin(x*x+sqrt(y))**2
   return
   end

```

4. Вибрати необхідну підпрограму і підготувати головний модуль для своїх потреб.

5. Приєднати до головного модуля вибрану підпрограму і створити об'єднаний початковий модуль.

6. Підготувати виконувану програму (.exe-файл) і направити її на виконання.

7. Реалізувати пункт 1 даного алгоритму.

8. Оформити звіт з лабораторної роботи, який включає:

- критичний аналіз прийнятої математичної моделі;
- програму числових досліджень для індивідуального завдання;
- текст початкового модуля і лістинг трансляції;
- необхідні лістинги розв'язків.

Додаток С

Завдання і методичні вказівки до лабораторних та практичних занять з теми: “Розрахунок аварійних режимів при коротких замиканнях”

Для заданої енергосистеми виконати розрахунки аварійних режимів (струми в вітках і напруги у вузлах) при коротких замиканнях з використанням програми ТКЗ.

Конфігурацію, склад устаткування і параметри енергосистеми вибрати з книги: Винославский В.Н. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения.: Киев, Вища школа, 1989, с.176 (приклад 7.5, рис. 7-18-А, табл.7.3).

Розрахункові точки і види пошкоджень вибираються за варіантами, табл. С1.

Таблиця С1 – Розрахункові точки і види пошкоджень для виконання лабораторної роботи

Варіант	Характеристика точки пошкодження	Вид к.з.
1	шини 115 кВ підстанції А	К(3), К(1)
2	шини 115 кВ підстанції В	К(3), К(1)
3	шини 115 кВ підстанції З	К(3), К(1)
4	шини 115 кВ підстанції Д	К(3), К(1)
5	шини 115 кВ електростанції Т	К(3), К(1)
6	шини 115 кВ електростанції К	К(3), К(1)
7	шини 10,5 кВ підстанції А	К(3), К(2)
8	шини 10,5 кВ підстанції Д	К(3), К(2)
9	виводи 10,5 кВ генератора G1 станції К	К(3), К(2)
10	виводи 10,5 кВ генератора G2 станції Т	К(3), К(2)
11	перша секція шин 10,5 кВ підстанції В	К(3), К(2)
12	середина ЛЕП, що сполучає А і К	К(3), К(1)

План виконання завдання

1. Вивчити енергетичну суть завдання і метод вузлових напруг, що реалізовується в програмі ТКЗ.

2. Ознайомитися з програмою ТКЗ в частині введення зовнішньої інформації:

```
dimension mat(100,3),x(100),numusl(100),uusl(100),
*nuvar(100),tokwet(100),uvar(100),tvar(100)
common mat,x,numusl,uusl,nuvar,tokwet,uvar,tvar,
*kolwet,kolusl,kolvar,eps,isign,ier
```



```

read kolwet,kolusl,kolvar
read ((mat(i,j),j=1,3),i=1,kolwet)
read (x(i),i=1,kolwet)
read (numusl(i),i=1,kolusl)
read (uusl(i),i=1,kolusl)
read (nuvar(i),i=1,kolvar)
read epps
read tokbas

```

де kolwet – кількість віток заступної схеми (комплексної схеми);

kolusl – кількість вузлів заступної схеми;

kolvar – кількість вузлів, напруги в яких будуть уточнюватись за ітераціями;

mat – матриця з'єднань схеми заміщення вимірністю (kolwet*3), кожен рядок якої показує зв'язок наступної вітки з двома вузлами;

x – масив вимірністю kolwet відносних базисних опорів елементів заступної схеми;

numusl – масив вимірністю kolusl номерів вузлів заступної схеми;

uusl – масив вимірністю kolusl напруг (ЕРС) вузлів заступної схеми, відповідний numusl;

nuvar – масив вимірністю kolvar номерів вузлів, напруги в яких будуть уточнюватись за ітераціями;

epps – точність розрахунку, що задається користувачем;

hatokbas – базисний струм на ступені, де знаходиться задана точка пошкодження, кА.

3. Розробити заступну схему (комплексну схему) без врахування активних опорів і представити її так, щоб кожна вітка графа була приєднана між двома вузлами, а між вузлами інцидентними дузі графа, була б тільки одна вітка, тобто зі схеми вилучаються паралельні вітки.

4. Пронумерувати, починаючи з одиниці, всі вітки заступної схеми, причому, номери займати підряд.

5. Пронумерувати вузли заступної схеми, починаючи з вузлів тих, що містять ЕРС, тобто вузлів, які відносяться до початків віток генераторів, систем, навантажень, займаючи номери підряд.

6. Задати напрями струмів, що передбачаються у вітках, при цьому у вітках, безпосередньо приєднаних до точки пошкодження, струми повинні бути направлені до вузла короткого замикання.

7. Створити таблицю, яка відображає граф заступної схеми. Кожен рядок таблиці повинен містити три числа – номер вітки, номер вузла початку вітки, номер вузла кінця вітки (вважати, що струми йдуть від початку вітки до її кінця).

8. Прийняти базисні умови і розрахувати відносні базисні опори і ЕРС заступної схеми.

9. Розрахувати базисний струм на ступені точки пошкодження.

10. Задати довільно початкове наближення відносних напруг тих вузлів, які не є вузлами з ЕРС або вузлом пошкодження.

11. Прийняти рішення про точність розрахунку (наближення до нуля).

12. Підготувати на бланку програмування файл даних, у відповідності з пунктом 2, при цьому бажано ознайомитися з його побудовою для деякого тестового завдання.

7 8 3

1 11 15 2 12 17 3 13 15 4 14 18 5 15 16 6 17 16 7 16 18

0.2 1.31 1.17 3.33 0.51 0.59 1.43

11 12 13 14 15 16 17 18

1.08 0.93 0.8 0.9 0.9 0.8 0.85 0.

15 16 17

0.001

9.2

13. Підготувати, з використанням будь-якого редактора, і записати у файл результати роботи за пунктом 12.

14. Запустити на виконання програму ТКЗ (врахувати, що в діалозі необхідно вказати програмі шлях до файлу даних за п. 13 і шлях до нового файлу, де будуть збережені результати роботи).

15. Оформити звіт про виконання завдання, який повинен містити текст завдання, підготовчу роботу за пунктами 1, ..., 12, вихідний лістинг і висновки.

Додаток Т

Завдання і методичні вказівки до лабораторних та практичних занять з теми: “Дослідження статичної стійкості режиму в системі електропостачання”

Використовуючи пакет прикладних програм TURBO EUREKA, провести аналіз можливості виникнення самозбудження в простій енергосистемі, тобто, порушення її статичної стійкості.

Система складається з ненасиченої явнополюсної синхронної машини без АРЗ з постійним збудженням і швидкістю обертання. Цей генератор працює на шини незмінної напруги через компенсовану лінію електропередачі із зовнішнім індуктивним, активним і компенсувальним поздовжнім ємнісним опором.

Характеристичне рівняння, що відображає електромагнітний перехідний процес в цій системі, має п'ятий ступінь щодо оператора Р. Коефіцієнти характеристичного рівняння функціонально виражаються через параметри системи. Ці зв'язки можна взяти у викладача або з додатку 3.1 (стор. 156) книги: Методика расчетов устойчивости автоматизированных электрических систем, под. ред. В.А. Веникова М., Высшая школа, 1966.

Параметри синхронного генератора в деякій системі відносних одиниць такі:

поздовжній синхронний опір	1.00;
поперечний синхронний опір	0.79;
поздовжній перехідний опір	0.58;
постійна часу обмотки збудження при розімкненому статорі	1570 рад.

Параметри лінії електропередачі в тій же системі відносних одиниць визначаються за варіантами, табл. Т1.

Таблиця Т1 – Параметри ліній для виконання лабораторної роботи

Опори ліній електропередач	Варіанти								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
індуктивний	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18
активний	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
поздовжньо-ємнісний	0.80	0.90	0.95	0.71	0.62	0.55	0.44	0.55	0.54

План виконання завдання

1. Осмислити енергетичну суть завдання відносно умов самозбудження системи з компенсованою електропередачею.

2. Записати канонічну форму характеристичного рівняння п'ятого ступеня.

3. Обчислити значення коефіцієнтів характеристичного рівняння для свого варіанта.
4. Вивчити можливості з обробки характеристичного многочлена з комплексними змінними (див. файл `polynom.eka`).
5. Представити одержану математичну модель в потрібній, для пакета прикладних програм, формі.
6. Створити у вікні EDIT своє завдання з необхідними коментарями.
7. Спрямувати завдання на виконання і простежити за його проходженням в системі.
8. Переглянути результати і одержати документ у вікні REPORT та записати у файл.
9. Оформити звіт про виконання завдання, який повинен містити:
 - текст завдання;
 - підготовчу роботу за пунктами 1 ... 5;
 - вихідний лістинг;
 - енергетичну інтерпретацію результатів і висновки.

Додаток У

Завдання і методичні вказівки до лабораторних та практичних занять з теми: “Дослідження статичної стійкості режиму в системі електропостачання”

З використанням програми STATIC провести аналіз можливості виникнення самозбудження в простій енергосистемі, тобто, порушення її статичної стійкості, на основі алгебраїчних критеріїв.

Початкову інформацію у вигляді характеристичного многочлена п'ятого порядку студент повинен узяти зі свого звіту, з раніше виконаної лабораторної роботи. При необхідності, звернутися до її методичного опису (додаток Т).

План виконання завдання

1. Осмислити енергетичну суть завдання відносно умов самозбудження системи з компенсованою електропередачею.

2. Записати канонічну форму характеристичного рівняння п'ятого ступеня.

3. Вивчити з використанням літератури алгебраїчні критерії стійкості Гурвиця і Лъєнара-Шипара.

4. Побудувати для свого характеристичного рівняння матрицю Гурвиця.

5. Ознайомитися з програмою STATIC в частині введення початкової інформації:

* `program static`

* Аналіз устойчивости системы на основе матрицы Гурвица

* размерностью не более 10 характеристического уравнения
`real koeff`

`dimension gurv(10,10),koeff(1 1)`

`read(5,10) m`

10 `format(i5)`

`i1=m+1`

`read(5,15)(koeff(i),i=1,i1)`

15 `format(8f10.5)`

В цьому фрагменті програми:

`M` – порядок матриці Гурвиця;

`koeff` – вектор-рядок коефіцієнтів характеристичного рівняння.

6. Підготувати файл даних на основі п. 5 і записати його на свою дискету з ім'ям `static.dat`.

7. Направити на виконання файл static.exe, що знаходиться в директорії Вашої групи, і простежити за проходженням завдання в системі.

8. Переглянути файл результатів static.txt, що знаходиться на Вашій дискеті.

9. Оформити звіт за завданням, який повинен містити:

- текст завдання;
- підготовчу роботу за пунктами 1 ... 6;
- вихідний лістинг;
- порівняльну оцінку результатів, одержаних в двох лабораторних роботах з дослідження стійкості з використанням різного математичного апарата;
- енергетичну інтерпретацію результатів і висновки.

ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М.: Издательство стандартов, 1988, 40 с.
2. ГОСТ Р 50270-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. М.: Госстандарт России, 1993, 60 с.
3. Основные положения и временные руководящие указания по определению устойчивости энергосистем. М.: Энергия, 1964.
4. Методические указания по определению устойчивости энергосистем, ч.1, Союзтехэнерго. М.: 1979, 184 с.
5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970.
6. Ульянов С.А. Короткие замыкания в электрических системах. М.: Госэнергоиздат, 1952.
7. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1970, 472 с.
8. Маркович И.М. Режимы энергетических систем. М.: Энергия, 1969.
9. Лебедев С.А., Жданов П.С. Устойчивость параллельной работы электрических систем. М.: Энергоиздат, 1934, 387 с.
10. Щукин Б.Д., Лыков Ю.Ф. Применение ЭЦВМ для проектирования систем электроснабжения. М.: Энергия, 1973, 120 с.
11. Хрущова Е.В. Применение цифровых вычислительных машин для расчетов токов короткого замыкания. В кн. Вопросы применения вычислительной техники в энергетических системах. Изд-во АН УССР, Киев, 1962, с. 79 – 88.
12. Буслова Н.В., Тугай Ю.И., Самкова В.Е. Расчет токов короткого замыкания в электрических сетях напряжением 6 – 20 кВ на ЕС-ЭВМ. В кн. Электрические сети и системы, вып. 18. Изд. Львовского университета, Львов, 1982, с. 121 – 123.
13. Технорабочий проект АСУ Винницкой энергосистемы. Подсистема оперативно-дисперсного управления. Задача – расчет токов короткого замыкания. Винница, 1984.
14. Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций. М.: Сов. радио, 1977, 302 с.
15. Канторович Л.В., Горстко А.Б. Оптимальные решения в экономике. М.: Наука, 1972, 231 с.
16. Мерди Дж. Модели популяций. В кн.: Математическое моделирование. М.: Мир, 1979, с. 109 – 127.
17. Дубинин Н.П. Генетика и человек. М.: Просвещение, 1978, 144 с.

18. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967, 472 с.

19. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору оборудования. М.: ЭНАС, 2004, 150 с.

20. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г., Несен Л.И., Рибалко А.Я., Прокопенко В.В. Переходные процессы в системах электроснабжения. К.: Выща школа, 1989, 422 с.

21. Перехідні процеси в системах електропостачання. Під ред. Черемісіна М.М. Вид-во Факт, 2005.

22. Терешкевич Л.Б., Демов О.Д., Іванков В.О. Електромагнітні перехідні процеси в системах електроспоживання. Вінниця, ВНТУ, 2007.

Навчальне видання

Володимир Григорович Аввакумов,
Леонід Борисович Терешкевич

**Перехідні процеси в системах електропостачання:
елементи теорії, програми, ілюстрації**

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Терешкевичем Л.Б.

Редактор
Коректор

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7×42¹/₄
Друк різнографічний
Тираж прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ