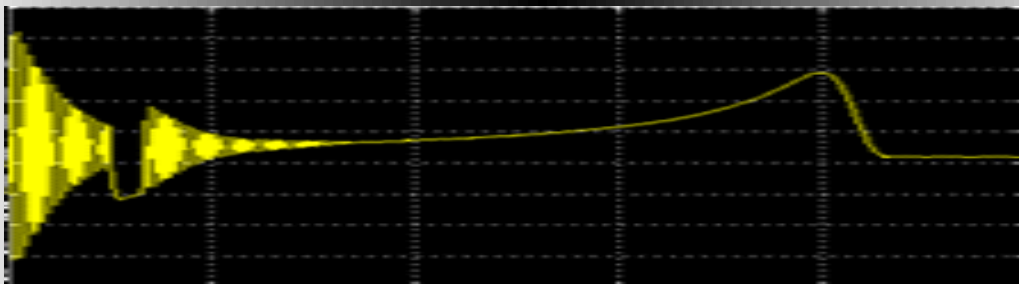


В. Г. АВБАКУМОВ, Л. Б. ТЕРЕШКЕВИЧ, Г. Л. ЛИСЕНКО

# ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Елементи теорії, програми,  
ілюстрації



**Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет**

**В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, Г. Л. Лисенко**

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

**Навчальний посібник**

Вінниця  
ВНТУ  
2015

**УДК 621.311(075)**

**ББК 31.27я73**

**A18**

Автори:

**В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, Г. Л. Лисенко**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Електротехніка та електротехнології». Лист № 1/11-18538 від 25.11.2014 р.

Рецензенти:

**В. Д. Авілов**, доктор технічних наук, професор

**П. Д. Лежнюк**, доктор технічних наук, професор

**О. М. Сінчук**, доктор технічних наук, професор

**Аввакумов, В. Г.**

**A18**    **Перехідні процеси в системах електропостачання. Елементи теорії, програми, ілюстрації : навчальний посібник / В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 245 с.**

**ISBN 978-966-641-645-5**

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.

Посібник призначений для студентів електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів I – IV рівня акредитації.

**УДК 621.311(075)**

**ББК 31.27я73**

**ISBN 978-966-641-645-5**

© В. Аввакумов, Л. Терешкевич, Г. Лисенко 2015

## 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 .....	14
1.4 Об'єктивний характер неповноти інформації при розрахуванні аварійних режимів .....	18
1.5 Формулювання розрахункових умов .....	19
Завдання для самостійної роботи .....	20
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.....	34
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 ....	43
3.3 Трансформація симетричних складових струмів і напруг .....	46
3.4 Суть правила еквівалентності прямої послідовності.....	50
3.5 Комплексні заступні схеми при поперечних пошкодженнях.....	54
Завдання для самостійної роботи .....	57
4 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКІВ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ В СИСТЕМІ З ВЕНТИЛЬНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ.....	58
4.1 Цілі розрахуноків перехідних аварійних режимів в системах з вентильними перетворювачами .....	58
4.2 Математична модель зовнішнього короткого замикання трифазного мостового випрямляча.....	59
4.3 Чисельне дослідження перехідного процесу трифазного мостового випрямляча при зовнішньому короткому замиканні .....	64
4.4 Вплив АРЗ генераторів на розвиток перехідного процесу при зовнішньому короткому замиканні випрямляча .....	69

4.5 Математичне моделювання внутрішнього короткого замикання трифазного мостового перетворювача .....	71
Завдання для самостійної роботи .....	78
<b>5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ РІВНЯНЬ ПАРКА-ГОРЄВА .....</b>	<b>79</b>
5.1 Диференціальна форма рівнянь Парка-Горєва.....	79
5.2 Ілюстрація принципового алгоритму дослідження перехідного процесу на основі рівнянь Парка-Горєва.....	81
5.3 Дослідження перехідного процесу при короткому замиканні синхронного генератора .....	84
5.4 Дослідження впливу демпферних контурів на розвиток перехідних процесів в синхронній машині.....	86
Завдання для самостійної роботи .....	90
<b>6 ХАРАКТЕРИСТИКА МАШИНО-ОРІЄНТОВАНОГО МЕТОДУ ВУЗЛОВИХ НАПРУГ І ПРОГРАМ РОЗРАХУНКУ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ЙОГО ОСНОВІ .....</b>	<b>91</b>
6.1 Вимоги до засобів автоматизації розрахунків аварійних режимів .....	91
6.2 Машино-орієнтований метод вузлових напруг для інженерних розрахунків струмів короткого замикання .....	91
6.3 Технологія використання програми ТКZ для розрахування струмів короткого замикання.....	94
6.4 Сервісна програма SERVIS розрахування параметрів заступної схеми .....	99
6.5 Характеристика програми СТКZ розрахування струмів короткого замикання .....	103
Завдання для самостійної роботи .....	105
<b>7 СУТЬ ПОНЯТТЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ І АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ СТІЙКОСТІ .....</b>	<b>106</b>
7.1 Стійкість електричних систем як прояв загального поняття стійкості динамічних систем.....	106
7.2 Короткий екскурс в розвиток науки про стійкість електричних систем .....	107
7.3 Терміни і означення, що відносяться до розрахунку режимів електричних систем.....	109
7.4 Шляхи автоматизації розрахувань стійкості електричних систем .....	111
Завдання для самостійної роботи .....	115
<b>8 ПРОСТІ РОЗРАХУНКИ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ .....</b>	<b>116</b>
8.1 Розрахунки, що базуються на використанні практичних критеріїв .....	116

8.2 Розрахунки, основані на використанні математичних критеріїв .....	129
8.3 Характеристика програми STATIS для перевірки статичної стійкості.....	143
8.4 Автоматизація прямого пошуку коренів характеристичних Завдання для самостійної роботи .....	148
<b>9 ПРОСТІ РОЗРАХУНКИ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЯ.....</b>	<b>149</b>
9.1 Суть проблеми динамічної стійкості.....	149
9.2 Рівняння руху синхронної машини і різноманітні форми його запису .....	150
9.3 Практичні критерії оцінювання динамічної стійкості, основані на методі площ.....	151
9.4 Ідеї методу послідовних інтервалів для інтегрування рівняння руху синхронної машини.....	153
9.5 Характеристика програми DYNAM для перевірки динамічної стійкості.....	155
9.6 Нове розв'язання рівняння руху синхронної машини при сильних збуреннях.....	159
Завдання для самостійної роботи .....	167
<b>10 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ Simulink .....</b>	<b>168</b>
10.1 Коротка характеристика системи .....	168
10.2 Синтез базової моделі системи електропостачання .....	176
10.3 Технологія дослідження конкретних завдань .....	181
10.4 Дослідження електромагнітного перехідного процесу при короткому замиканні в системі $U = \text{const}$ .....	189
10.5 Вплив виду зовнішнього короткого замикання в системі на процес пуску асинхронного двигуна.....	195
Завдання для самостійної роботи .....	202
Додаток А – Текст програми DIFUR.for .....	204
Додаток Б – Лістинг дослідження перехідного процесу при зовнішньому короткому замиканні .....	207
Додаток В – Лістинг дослідження впливу АРЗ на перехідний процес .....	209
Додаток Г – Лістинг дослідження перехідного процесу за Парком (park1.dgo).....	211
Додаток Д – Лістинг результатів дослідження перехідного процесу в координатах А, В, С .....	213
Додаток Е – Лістинг розв'язку при короткому замиканні на виводах генератора.....	214
Додаток Ж – Лістинг розв'язку при вивченні демпферного ефекту в синхронній машині.....	215

Додаток И – Витяг з ГОСТ 27514-87 «Короткие замыкания в электроустановках».....	216
Додаток К – Витяг з керівних вказівок із визначення стійкості енергосистем.....	220
Додаток Л – Питання для самоконтролю при вивченні електромагнітних перехідних процесів при аварійних збуреннях.....	224
Додаток М – Питання для самоконтролю при вивченні електромеханічних перехідних процесів.....	228
Додаток Н – Завдання і методичні вказівки до виконання лабораторних і практичних занять з теми «Дослідження перехідного процесу при трифазному короткому замиканні в простій системі»....	230
Додаток П – Завдання та методичні вказівки до виконання лабораторних і практичних занять з теми «Дослідження перехідного процесу в трифазному мостовому перетворювачі».....	233
Додаток Р – Завдання і методичні вказівки до виконання лабораторних та практичних занять з теми «Розрахунок аварійних режимів при коротких замиканнях».....	235
Додатки С, Т – Завдання і методичні вказівки до виконання лабораторних та практичних занять з теми «Дослідження статичної стійкості режиму в системі електропостачання».....	239
ЛІТЕРАТУРА.....	243

## 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 заходів 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 пропонується увазі читачів навчальний посібник орієнтовано на широке використання ЕОМ в розрахунках аварійних режимів. Така орієнтація визначила і побудову посібника.

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.

Розділи п'ятий і шостий 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. Перехід від коротких теоретичних уявлень до методів, алгоритмів і програм дозволяє читачу практично і швидко торкнутися проблематики статичної і динамічної стійкості режимів.

Розділ десятий “Дослідження електричних режимів з використанням системи Simulink” присвячений 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 посібнику 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 значень, різко відмінних від їх нормальних величин.

У контексті такого означення 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 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 нейтралями – 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 прилягають до точки короткого замикання, фази струмів різко змінюються.

Збільшення струму внаслідок короткого замикання може призводити до значного підвищення температури струмопровідних частин і подальшо-

го 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 змінюється розподіл потужностей між станціями. Відбувається порушення балансу потужностей. Одні генератори виявляються перевантаженими, інші недовантаженими порівняно 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 двоколової 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;
- оцінення 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 наведемо задачу виявлення вимикачів на всіх підстанціях системи електропостачання, розривна потужність яких стала меншою від очікуваної потужності короткого замикання. Важливість цієї підцілі не потребує 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 потребує 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] 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 вентиляції 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 0,5 с рекомендується враховувати електромеханічні перехідні процеси, тобто зміну величин ЕРС і взаємних кутів між ними.

При розрахуванні стійкості більша частина з наведених 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 розрахуванні 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 зі зведенням параметрів заступних схем до вибраного основного ступеня напруги системи, що досліджується, з врахуванням фактичних коефіцієнтів трансформації трансформаторів і автотрансформаторів;

- система іменованих одиниць зі зведенням параметрів заступних схем до вибраного основного ступеня напруги з врахуванням фактичних коефіцієнтів трансформації трансформаторів і автотрансформаторів;

- система іменованих одиниць зі зведенням 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 такі системи координат:

- фазні (А, В, С);
- симетричні координати, які витікають з методу симетричних складових;
- прямокутна d-q-0 (нерухома);
- обертова 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 трудностю 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, оснований 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), основою якого є розрахункові (фіктивні) ЕРС і опір генератора, що задається спеціальними кривими у функції часу.

6. Метод “потужностей”, основою якого є 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, оснований на використанні статичних або динамічних моделей (столів постійного або змінного струму). При цьому в певному маш-



табі 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 машино-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, оснований 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, Льєнара-Шипара, Михайлова або метод Д-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 за “сумнівними” координатами 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 додатності вільного члена характеристичного рівняння.

4. Метод, оснований 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):

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

$\delta$  – кут передавальної станції;

$\Delta Q$  – приріст реактивної потужності;

$U$  – напруга.

Динамічна стійкість систем пов'язана з сильними збуреннями режиму і потребує 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, оснований 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, оснований на рівняннях Лебедева – Жданова (рівняннях Лонглей). 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 фактично 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 потребує 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 короточасний 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 результатуючої стійкості, говорить про їх складність і необхідність автоматизації розрахунків.

#### **1.4 Об'єктивний характер неповноти інформації при розрахуванні 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 певною мірою 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 визначається 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. За своєю суттю 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 в процесі, 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 прилягає 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, машинозорієнтований метод вузлових напруг і ін.)

4. Врахування або відмова від врахування активних опорів елементів енергосистеми, причому слід надати 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 таким алгоритмом.

1. Відзначити найважливіші компоненти зовнішньої інформації, виходячи із завдання і вимог 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. 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; загально-системні 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.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ : ГОСТ 27514-87. – [Действ. от 01.01.89]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 40 с.
2. Основные положения и временные руководящие указания по определению устойчивости энергосистем – М. : Энергия, 1964.
3. Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Ч.1. – М. : Союзтехэнерго, 1979. – 184 с.
4. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / Ульянов С. А. – М. : Энергия, 1970. – 520 с.
5. Ульянов С. А. Короткие замыкания в электрических системах / Ульянов С. А. – М. : Госэнергоиздат, 1952. – 280 с.
6. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / Веников В. А. – М. : Высшая школа, 1970. – 472 с.
7. Маркович И. М. Режимы энергетических систем / Маркович И. М. – М. : Энергия, 1969. – 352 с.
8. Лебедев С. А. Устойчивость параллельной работы электрических систем / С. А. Лебедев, П. С. Жданов – М. : Энергоиздат, 1934. – 387 с.
9. Щукин Б. Д. Применение ЭЦВМ для проектирования систем электроснабжения / Б. Д. Щукин, Ю. Ф. Лыков – М. : Энергия, 1973. – 120 с.
10. Хрущова Е. В. Применение цифровых вычислительных машин для расчетов токов короткого замыкания / Е. В. Хрущова // Вопросы применения вычислительной техники в энергетических системах. – Киев : Изд-во АН УССР, 1962. – С. 79 – 88.
11. Буслова Н. В. Расчет токов короткого замыкания в электрических сетях напряжением 6 – 20 кВ на ЕС-ЭВМ / Н. В. Буслова, Ю. И. Тугай, В. Е. Самкова // Электрические сети и системы : вып. 18. – Львов : Изд-во Львовского ун-та, 1982. – С. 121 – 123.
12. Техноробочий проект АСУ Винницкой энергосистемы. Подсистема оперативно-дисперсного управления. Задача – расчет токов короткого замыкания. – Винница, 1984.
13. Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций / Саати Т. – М. : Сов. радио, 1977. – 302 с.
14. Канторович Л. В. Оптимальные решения в экономике / Л. В. Канторович, А. Б. Горстко. – М. : Наука, 1972. – 231 с.
15. Мерди Дж. Модели популяций / Мерди Дж. // Математическое моделирование. – М. : Мир, 1979. – с. 109 – 127.
16. Дубинин Н. П. Генетика и человек / Дубинин Н. П. – М. : Просвещение, 1978. – 144 с.
17. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости / Демидович Б. П. – М. : Наука, 1967. – 472 с.

18. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору оборудования. – М. : ЭНАС, 2004. – 150 с.
19. Переходные процессы в системах электроснабжения / [Вино-славский В. Н., Пивняк Г. Г., Несен Л. И. и др.]. – К. : Выща школа, 1989. – 422 с.
20. Перехідні процеси в системах електропостачання : [під ред. Черемісіна М. М.] – Харків : Вид-во Факт, 2005. – 176 с.
21. Терешкевич Л. Б. Электромагнітні перехідні процеси в системах електроспоживання / Терешкевич Л. Б., Демов О. Д., Іванков В. О. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 60 с.
22. Аввакумов В. Г. Перехідні процеси в системах електропостачання: елементи теорії, програми, ілюстрації / Аввакумов В. Г., Терешкевич Л. Б. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 246 с.



*Навчальне видання*

**Аввакумов Володимир Григорович  
Терешкевич Леонід Борисович  
Лисенко Геннадій Леонідович**

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ  
В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОСТАЧАННЯ  
ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ, ПРОГРАМИ, ІЛЮСТРАЦІЇ**

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено Л. Терешкевичем

Підписано до друку 03.11.2015 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 15,9.  
Наклад 300 (1-й запуск 1-100) пр. Зам. № 2015-129.

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.