

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева
Кафедра «Электроэнергетика»

Горелов Ю.И.
доцент кафедры «Электроэнергетики», доцент

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

учебной дисциплины (модуля)
«Переходные процессы в электроэнергетических
системах»

Уровень профессионального образования:
высшее образование – бакалавриат

Направление (специальность) подготовки:
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль (специализация) подготовки:
«Электроснабжение»

Квалификация выпускника: 68 бакалавр
Форма обучения: (очная, заочная)

Тула 2014 г.

Рассмотрено на заседании кафедры «Электроэнергетики»

протокол №____ от "____" _____ 20____ г.

Зав. кафедрой _____ В.М. Степанов

Содержание

1. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	7
1.1 Основные понятия.	7
1.2 Назначение расчетов переходных электромагнитных процессов и предъявляемые к ним требования.	9
1.3 Основные допущения, принимаемые при исследованиях переходных электромагнитных процессов.....	11
2. ПРОСТЕЙШАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И СХЕМА ЕЕ ЗАМЕЩЕНИЯ.....	11
2.1 Определение сверхпереходных и переходных ЭДС синхронных машин	11
2.2 Определение переходной ЭДС.....	12
2.3 Определение сверхпереходной ЭДС	13
2.4 Параметры электродвигателей и обобщенной нагрузки.	15
3. ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ.	19
3.1 Применение собственных и взаимных проводимостей.....	19
3.2 Расчет собственных и взаимных проводимостей и сопротивлений.....	23
3.3 Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления.....	25
4. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ С ИСКЛЮЧЕНИЕМ И БЕЗ ИСКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ СВЯЗЕЙ	28
4.1 Системы относительных единиц	28
4.2 Составление схем замещения.....	30
4.2.1. Виды схем замещения.....	30
4.2.2 Составление схем замещения с приведением параметров всех элементов к базисной ступени напряжения.	31
4.2.3 Приближенное приведение.....	31
4.2.4 Составление схем замещения с трансформаторными связями.....	31
4.3 Схемы замещения прямой (обратной) последовательности трансформаторов	32
4.3.1 Двухобмоточные трансформаторы.....	32
4.3.2 Трехобмоточные трансформаторы.	32
4.3.3 Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной на две части обмоткой низшего напряжения.....	33
4.4 Точное приведение в именованных единицах.....	34

5. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА НАЛОЖЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ.....	35
5.2 Наложение аварийного режима на предшествующий.....	35
6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗАИМНЫХ И СОБСТВЕННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ПРОВОДИМОСТЕЙ.....	38
7. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ БЕЗ ТРАНСФОРМАТОРА	42
8. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В НЕПОДВИЖНЫХ МАГНИТНОСВЯЗАННЫХ ЦЕПЯХ.....	46
8.1 Основные предпосылки.....	46
8.2 Основные соотношения.....	46
8.3 Влияние рассеяния на свободные токи	53
9. ВКЛЮЧЕНИЕ ХОЛОСТОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	54
10. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ	55
10.1 Исходные уравнения	55
10.2 Индуктивности обмоток синхронной машины	56
10.3 Обобщенный вектор трехфазной системы.....	58
10.4 Замена переменных	60
11. УРАВНЕНИЯ ПАРКА-ГОРЕВА	63
11.1 Дифференциальная форма.....	63
11.2 Операторная форма	65
12 СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ И В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	68
12.1 Исходные положения рассмотрения переходного процесса в синхронной машине....	68
12.2 Переходные ЭДС и индуктивные сопротивления синхронной машины без демпферной обмотки.....	69
13 ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ И НАГРУЗКИ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ	73
13.1 Ударный ток короткого замыкания	73

13.2 Изменение тока КЗ и его составляющих в фазе А при отсутствии АРВ.	73
14 ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ	79
14.1 Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных обмоток	79
14.2 Влияние систем возбуждения и гашения магнитного поля на характер переходного процесса в синхронной машине	89
15 МЕТОД ТИПОВЫХ КРИВЫХ	96
16 МЕТОД СПРЯМЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	101
17 МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	105
17.1 Образование высших гармоник С.Г. при несимметрии.	106
17.2 Метод симметричных составляющих в исследовании переходных процессов при нарушении несимметрии трехфазной сети.	106
17.3 Разложение несимметричных трехфазных систем на симметричные составляющие	110
17.4 Применение метода симметричных составляющих к расчету несимметричных трехфазных цепей.....	110
18 ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТОКОВ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭС	112
18.1 Общие положения.	112
18.2 Синхронные машины	112
18.3 Асинхронные двигатели	115
18.4 Обобщенная нагрузка.....	115
18.5 Трансформаторы.....	116
18.6 Оценка величины реактивности намагничивания нулевой последовательности двухфазного трансформатора.....	118
18.7 Автотрансформаторы.....	119
18.8 Воздушные линии.....	120
18.9 Кабели.....	122
19 ОДНОКРАТНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ.....	122
19.1 Общие замечания.....	122

19.2 Двухфазное короткое замыкание.....	123
19.3 Однофазное короткое замыкание	124
19.4 Двухфазное короткое замыкание на землю	126
20 КОМПЛЕКСНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ.....	127
21 ПРАВИЛО ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.....	131
22 ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ	134
22.1 Разрыв одной фазы сети.....	135
22.2 Несимметрия от включения сопротивлений.....	137
22.3 Распределение напряжений при продольной несимметрии.....	140
23 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 КВ	145
23.1 Расчет сопротивлений различных элементов электроустановки	146
23.1.1 Активное и индуктивное сопротивления силовых трансформаторов	146
23.1.2 Активное и индуктивное сопротивления реакторов.....	147
23.1.3 Активное и индуктивное сопротивления шинопроводов.....	147
23.1.4 Активное и индуктивное сопротивление кабелей.....	147
23.1.5 Активное и индуктивное сопротивления воздушных линий и проводов	148
23.1.6 Активные сопротивления контактов и контактных соединений.....	148
23.1.7 Активные и индуктивные сопротивления трансформаторов тока	148
23.1.8 Активные и индуктивные сопротивления катушек автоматических выключателей	149
23.1.9 Параметры автономных источников электроэнергии и синхронных электродвигателей	149
23.1.10 Параметры асинхронных электродвигателей	149
23.1.11 Расчетные параметры комплексных нагрузок.....	149
23.1.12 Активное сопротивление дуги в месте КЗ	150
23.2 Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного кз	150
23.2 Расчет аperiodической составляющей тока кз	153
23.3 Расчет ударного тока кз	153
ЛИТЕРАТУРА	154

1. Переходные процессы электроэнергетических систем

1.1 Основные понятия.

Большая система энергетики – это система, состоящая из большого числа взаимосвязанных систем или подсистем, функционирующих как единое целое, но при решении практических задач часто рассматриваемых отдельно друг от друга.

Электроэнергетическая система – та часть энергетической системы, в которой теплота и различные виды энергии преобразуются в электрическую энергию, которая передается на расстояние, распределяется потребителям, у которых она преобразуется в другие виды энергии – механическую, тепловую, световую, химическую и т.д.

Электрическая система – часть электроэнергетической системы, связанной с той частью большей системы, в которой происходят различные взаимные преобразования электромагнитной и электрической энергии.

Электрическая система состоит из двух групп взаимодействующих элементов:

- *силовые элементы* – элементы, в которых происходит выработка, преобразование, передача и распределение и потребление электроэнергии;
- *элементы управления* – элементы, которые изменяют и регулируют состояние системы.

Силовые элементы электроэнергетической системы включают в себя:

- *выбатывающие* – генераторы с их первичными двигателями;
- *преобразующие* – трансформаторы, инверторы и выпрямители;
- *передающие и распределяющие* – линии передач, сети;
- *потребляющие* – нагрузки.

Элементы управления включают в себя:

- *регуляторы возбуждения синхронных машин*;
- *реле*;
- *выключатели*.

Режим – состояние системы, которое характеризуется показателями, количественно определяющими работу системы, эти показатели называются *параметрами режима*. Для электроэнергетической системы – это значения мощности, напряжений, токов, углов сдвига векторов э.д.с., напряжений, токов, частота тока . . .

Параметры системы – это показатели, количественно определяющие физические свойства системы, зависящие от схемы соединения элементов системы и априори принимаемых допущениях. Для электроэнергетической системы – это значения полных, активных и реактивных сопротивлений элементов, проводимости элементов, коэффициенты трансформации, постоянные времени, коэффициенты системы, матрица инцидентов системы, матрица взаимной проводимости системы.

Пример. Закон Ома

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z};$$

\dot{I}, \dot{U} - параметры режима, Z - параметр системы.

Нормальный режим системы – режим, при котором система надежно обеспечивает потребителя электроэнергией нормированного и постоянного качества.

Неизменные нормальные режимы не могут существовать в электроэнергетических системах, так как происходит постоянное изменение количества подключенных нагрузок, вариация значений вырабатываемых и потребляемых мощностей, изменение конфигурации системы, вызванных включением и отключением генераторов, линий передач, трансформаторов, подстанций.

Нормальный переходный режим - это переходы от одного нормального режима к другому во время нормальной работы электроэнергетической системы.

Аварии в электроэнергетических системах могут быть вызваны:

- *нарушением* режима системы, то есть перегрузками отдельных элементов системы и их дальнейшим отключением в результате срабатывания устройств автоматического управления;
- *разрушением* отдельных элементов системы.

Аварийные переходные режимы – это переход во время аварии из одного режима системы в другой, послеаварийный режим.

Режимы электроэнергетической системы делятся на:

- *нормальные установившиеся режимы* – режимы, применительно к которым в проектных организациях происходит проектирование электроэнергетической системы и определяются ее основные технико-экономические показатели;
- *послеаварийные установившиеся* – режимы, в общем случае характеризующиеся изменением топологии системы относительно ее нормального состояния, при этом система иногда может функционировать с ухудшенными технико-экономическими показателями;
- *нормальный переходный режим*;
- *аварийный переходный режим*.

Любые переходные режимы возникают в результате изменений параметров системы, вызванных какими-либо причинами.

Возмущающие воздействия – это причины, вызвавшие изменение параметров системы.

Возмущения режима – это появление начальных отклонений параметров системы.

Любой режим системы состоит из множества различных процессов.

Процесс – это последовательная смена каких-либо явлений.

Переходный режим электроэнергетической системы состоит из :

- *электромагнитных переходных процессов* - процессов изменения во времени электромагнитных параметров режима без учета влияния на них изменения частоты вращения синхронных генераторов;
- *электромеханических переходных процессов* – последовательного изменения электромагнитных явлений в электрических цепях при одновременном изменении механических явлений в вращающихся машинах;
- *волновых переходных процессов*;
- *переходных процессов излучений*;
- *тепломеханических переходных процессов*;
- *гидромеханических переходных процессов*;
- *механических переходных процессов*;
- *тепловых переходных процессов*.

Переходные процессы различаются по:

- *условиям протекания*;
- *причинам возникновения* – по видам возмущающих воздействий и значения возмущений;
- *допущениям* – по полноте математического описания;
- *скорости протекания*;
- *структуре* исследуемой системы;
- *допущениям*, принимаемым при математическом описании системы.

Квазипереходные процессы – это переходный процесс, рассматриваемый при упрощении изменения некоторых параметров режима, то есть когда часть параметров

режима вопреки реальности приняты не изменяющимися, или изменяющимися по заранее принятому, точно не соответствующему реальности закону.

Пример.

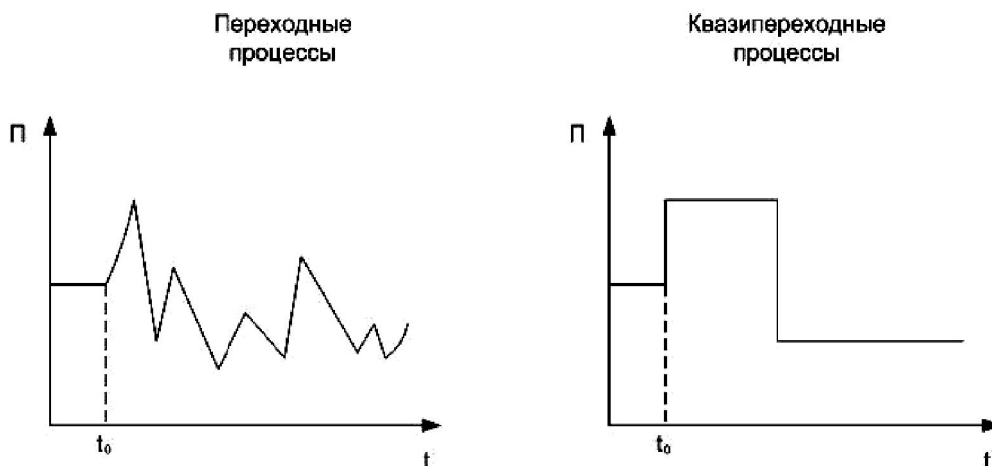


Рис.1. Пример переходного и квазипереходного процесса

Полное математическое описание – математическое описание, учитывающее в данной постановке задачи все основные составляющие и физические закономерности процесса.

Упрощенное математическое описание – математическое описание, учитывающее в данной постановке задачи только существенные составляющие и физические закономерности процесса, а менее существенные составляющие и закономерности не учитываются.

Статическая устойчивость – это способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим очень близкий к исходному, если возмущение не снято.

Динамическая устойчивость – это способность системы восстанавливать исходный режим или режим очень близкий к исходному при большом возмущении исходного состояния.

Результирующая устойчивость – это способность системы восстанавливать исходный режим или режим очень близкий к исходному после большого его возмущения, при этом некоторое время после большого возмущения системы находится в нерабочем состоянии и только потом возвращается в нормальное состояние.

Малое возмущение – это возмущение, которое влияет на характер поведения системы независимо от места его появления и от его значения.

Большое возмущение – это возмущение, влияние которого на характер поведения системы существенно зависит от места его появления и от его значения.

1.2 Назначение расчетов переходных электромагнитных процессов и предъявляемые к ним требования.

Наиболее распространенными в электроэнергетических системах переходными электромагнитными процессами являются процессы, вызванные:

- включением и отключением приемников электроэнергии;
- короткими замыканиями в системе;

- возникновением местной несимметрии в системе;
- действием форсировки возбуждения в синхронных машинах, а также их развозбуждением – гашением их магнитного поля.

Короткое замыкание – всякое не предусмотренное нормальными условиями работы системы замыкание между фазами, а в системах с заземленными нейтралями также замыкание одной или нескольких фаз на землю.

Простое короткое замыкание – это замыкание одной из фаз на землю в системах с незаземленными нейтралями или в системах с заземленными нейтралями через специальные компенсирующие устройства.

Переходное сопротивление – это сопротивление, возникающее в точке к.з., которое состоит из сопротивления электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю.

Металлическое к.з. – это короткое замыкание, для которого не учитывается переходное сопротивление. Металлическое к.з. характеризуется наибольшим при прочих равных условиях током к.з.

В 3-х фазных системах различают следующие виды к.з. :

1. трехфазное $K^{(3)}$;
2. двухфазное $K^{(2)}$;
3. однофазное $K^{(1)}$;
4. двухфазное на землю $K^{(1.1)}$.

Трехфазное к.з. – симметричное к.з., а остальные – несимметричные к.з.

Различают:

- поперечную несимметрию; (к.з., несимметричные нагрузки);
- продольную несимметрию; (нарушение симметрии некоторого элемента трехфазной сети).
- многократную несимметрию – несколько несимметрий одинакового или различного вида.

Сложные повреждения – повреждения сопровождающиеся сложной несимметрией

Под *расчетом переходного электромагнитного процесса* в электроэнергетической системе понимают вычисление токов и напряжений при заданных условиях. При этом, значения этих величины находят для заданного момента времени или рассчитывают их динамику в течении всего переходного процесса.

К числу задач для которых производят расчеты переходного электромагнитного процесса относятся:

1. сопоставление, оценка и выбор схемы соединения элементов электроэнергетической системы;
2. выявления условий работы потребителей в аварийных режимах;
3. выбор аппаратов и проводников;
4. проектирование и настройка устройств релейной защиты;
5. определение условий несинхронного включения синхронных машин или их включения способом синхронизации;
6. конструктивные решения элементов распределительных устройств;
7. определение числа заземленных нейтралей и их размещение в системе;
8. выбор числа и мощности дугогасительных устройств;
9. определение влияния линий электропередачи на провода связи и сигнализации;
10. проектирование и проверка защитных заземлений;
11. выбор характеристик разрядников для защиты от перенапряжений;
12. оценка и определение параметров устройств гашения магнитного поля синхронных генераторов;
13. проведение различных испытаний;

14. анализ произошедших ранее аварий.

1.3 Основные допущения, принимаемые при исследованиях переходных электромагнитных процессов.

При исследовании электромагнитных переходных процессов допускается:

- не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин (исключение: исследование переходного процесса в трансформаторе при его включении с разомкнутой вторичной обмоткой);
- при расчете токов КЗ не учитывать ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- все трехфазные элементы, входящие в исходную расчетную схему, предполагаются симметричными;
- при расчете токов КЗ не учитывать сдвиг по фазе э.д.с. синхронных машин, если продолжительность к.з. не превышает 0,5 сек.;
- не учитывать поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330-500 кВ, если их длина не превышает 150 км;
- при расчете токов КЗ наиболее удаленную от точки к.з. часть электроэнергетической системы представлять в виде одного источника с неизвестной по амплитуде э.д.с.;
- при расчете токов КЗ не вводить в расчетную схему источники энергии, если они связаны с частью электроэнергетической системы, где находится расчетная точка КЗ, с помощью электропередачи или вставки постоянного тока;
- при любом числе независимых контуров в исходной расчетной схеме апериодическую составляющую тока КЗ считать изменяющейся по экспоненциальному закону;
- при расчете тока КЗ электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах электроэнергетической системы, учитывать приближенно, с помощью их эквивалентных параметров;
- при расчете периодической составляющей тока КЗ не учитывать активные сопротивления различных элементов исходной расчетной схемы, если активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки КЗ не превышает 30% индуктивной составляющей указанного сопротивления;
- сопротивление постоянному току любого элемента исходной расчетной схемы принимать равным его активному сопротивлению

2. Простейшая электрическая система и схема ее замещения

2.1 Определение сверхпереходных и переходных ЭДС синхронных машин

Для расчета тока электромагнитных режимов в начальный момент переходного процесса необходимо знать сопротивления и ЭДС генераторов.

Значения соответствующих ЭДС зависят от нагрузки машины до момента внезапного нарушения режима. Их значение удобнее всего определять по выражениям,

полученным из векторных диаграмм синхронных машин для предшествующего режима. Удобно принять, что все значения выражены в относительных единицах.

2.2 Определение переходной ЭДС

Из векторной диаграммы следует, что для этой ЭДС могут быть получены ряд выражений, дающих примерно одинаковые значения.

Из рисунка видно, что гипотенуза треугольника BCD равна падению напряжения в переходном сопротивлении при протекании нагрузочного тока генератора I в предшествующем режиме $jI x'_d$. Это дает возможность определить катеты BD и BC . Следовательно, рассматривая треугольник ABD , можно определить искомую ЭДС $AD = \sqrt{(AC + CB)^2 + BD^2}$, то есть

$$E' = \sqrt{(U + I x'_d \sin \varphi)^2 + (I x'_d \cos \varphi)^2}.$$

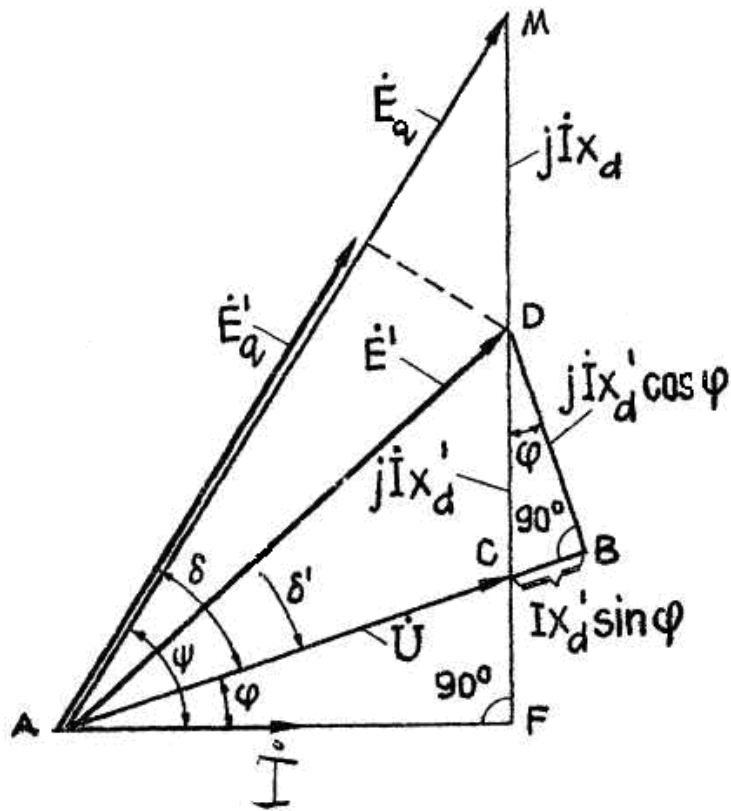


Рис. 1. Векторная диаграмма синхронной машины

Из треугольника ADF для гипотенузы AD справедливо

$$AD = \sqrt{AF^2 + (CF + CD)^2}$$

но AD это ЭДС E' , поэтому

$$E' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x'_d)^2}.$$

Из рисунка видно, что

$$E'_q = E' \cos(\delta - \delta'),$$

где

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I x_d \cos \varphi}{U + I x_d \sin \varphi};$$

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{I x'_d \cos \varphi}{U + I x'_d \sin \varphi};$$

На практике чаще всего в качестве E'_q близкие к ней величины AD , либо AB ,

$$E'_q \approx U + I x'_d \sin \varphi.$$

Если известны реактивная и активная мощности, генерируемые СГ в нормальном режиме, то разлагая ток нагрузки СГ на две составляющие:

$$I_a = I \cos \varphi;$$

$$I_r = I \sin \varphi;$$

и учитывая, что

$$BD = I_a x'_d; BC = I_r x'_d;$$

имеем

$$\begin{aligned} E' &= \sqrt{(U + I_r x'_d)^2 + (I_a x'_d)^2} = \sqrt{\left(U + \frac{UI_r x'_d}{U}\right)^2 + \left(\frac{UI_a x'_d}{U}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(U + \frac{Qx'_d}{U}\right)^2 + \left(\frac{Px'_d}{U}\right)^2}. \end{aligned}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Px_d}{U^2 + Qx_d};$$

$$\operatorname{tg} \delta' = \frac{Px'_d}{U^2 + Qx'_d};$$

$$E_q = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2}.$$

2.3 Определение сверхпереходной ЭДС

Выражения для определения ЭДС находятся по векторным диаграммам

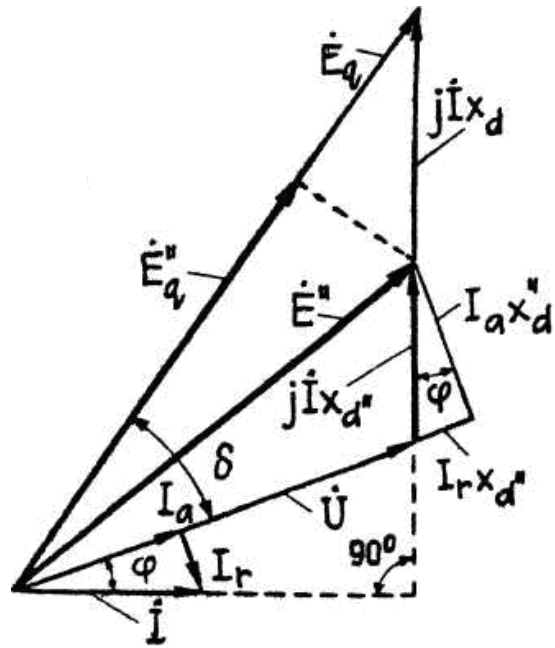


Рис. 2. Векторная диаграмма неявнополюсной машины

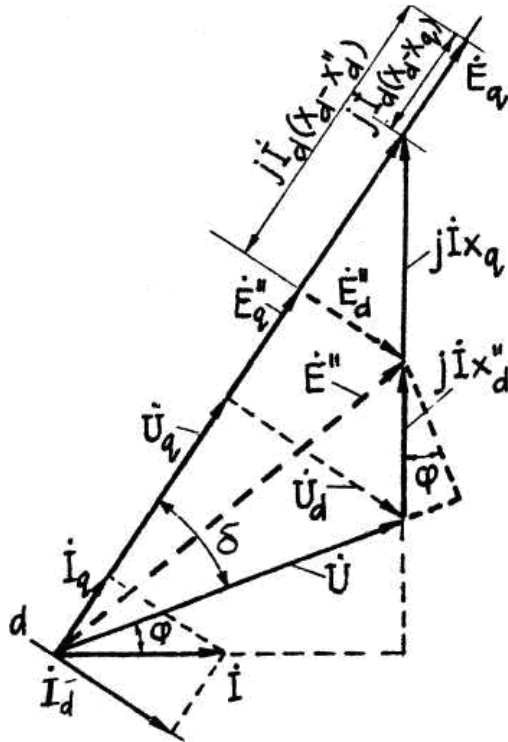


Рис. 3. Векторная диаграмма явнополюсной машины с демпферными обмотками

Очевидно, что для неявнополюсной машины они будут иметь такой же вид, как и для E'_q только в них следует x'_d заменить на x''_d .

$$E''_q \approx E'' = \sqrt{(U + I x''_d \sin \varphi)^2 + (I x''_d \cos \varphi)^2}.$$

или

$$E''_q \approx U + I x''_d \sin \varphi.$$

Строго говоря, для явнополюсных машин с демпферными обмотками сверхпереходную ЭДС следует определить по формуле

$$E_q'' = E_q - jI_d(x_d - x_d'')$$

Однако рассмотрение векторных диаграмм убеждает, что для практических расчетов для явнополюсных машин возможно использовать формулы

$$E_q'' \approx E'' = \sqrt{(U + Ix_d'' \sin \varphi)^2 + (Ix_d'' \cos \varphi)^2}.$$

или

$$E_q'' \approx U + Ix_d'' \sin \varphi.$$

2.4 Параметры электродвигателей и обобщенной нагрузки.

В синхронных двигателях и синхронных компенсаторах переходный процесс протекает так же, как и в синхронных генераторах. Отличие состоит в том, что ЭДС двигателей в начальный момент могут отличаться более значительно. Так, у перевозбужденного синхронного двигателя сверхпереходная ЭДС выше подведенного напряжения. Резкое снижение напряжения у двигателя при КЗ приводит к росту генерируемого им реактивного тока.

При работе двигателя в режиме недовозбуждения его сверхпереходная ЭДС ниже подведенного в нормальном режиме напряжения. Поэтому при КЗ возможны различные случаи. При $U_0 > E_0''$ двигатель будет продолжать потреблять реактивный ток из сети, а при $U_0 < E_0''$ двигатель будет генерировать реактивный ток.

Следовательно, синхронные двигатели вводятся в схему замещения своими параметрами $E_0''; x_d''$,

в перевозбужденном режиме по

$$E_q'' \approx E'' = \sqrt{(U + Ix_d'' \sin \varphi)^2 + (Ix_d'' \cos \varphi)^2}.$$

в недовозбужденном режиме по

$$E_q'' \approx E'' = \sqrt{(U - Ix_d'' \sin \varphi)^2 + (Ix_d'' \cos \varphi)^2}.$$

Для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с

1. перевозбуждением

$$E'' = U + Ix_d'';$$

2. недовозбуждением

$$E'' = U - Ix_d'';$$

Асинхронные двигатели в нормальном режиме работают с малым скольжением (2—5%) и с ЭДС E''_0 ниже подведенного напряжения. Поэтому в начальный момент переходного процесса их можно рассматривать как недовозбужденные синхронные двигатели.

Индуктивное сопротивление x'' (одинаковое по осям d и q) определяется из схемы замещения двигателя и представляет собой индуктивное сопротивление КЗ при заторможенном двигателе ($s = 100\%$). Вычисляют его по пусковому току двигателя

$$x'' = \frac{1}{I_{\text{пуск}}}.$$

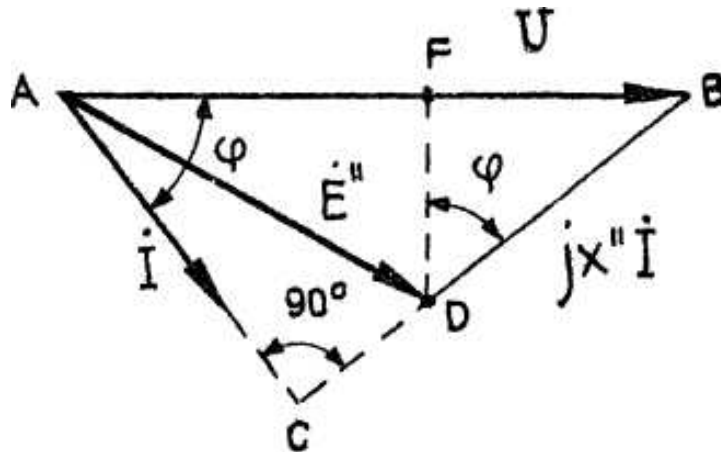


Рис. 4. Векторная диаграмма асинхронного двигателя.

Значение сверхпереходной ЭДС E'' асинхронного двигателя определяют по его векторной диаграмме предшествующего установившегося режима. Из диаграммы:

$$E'' = AD - \text{треугольник } AFD$$

$$E'' = AD = \sqrt{AF^2 + FD^2}$$

но

$$FB = Ix'' \sin \varphi;$$

$$FD = Ix'' \cos \varphi;$$

$$AF = AB - FB = U - Ix'' \sin \varphi;$$

поэтому

$$E'' = AD = \sqrt{AF^2 + FD^2} = \sqrt{(U - Ix'' \sin \varphi)^2 + (Ix'' \cos \varphi)^2};$$

или приближенно

$$E'' = U - Ix'' \sin \varphi;$$

Чем больше нагружен асинхронный двигатель, тем меньше будет его ЭДС.

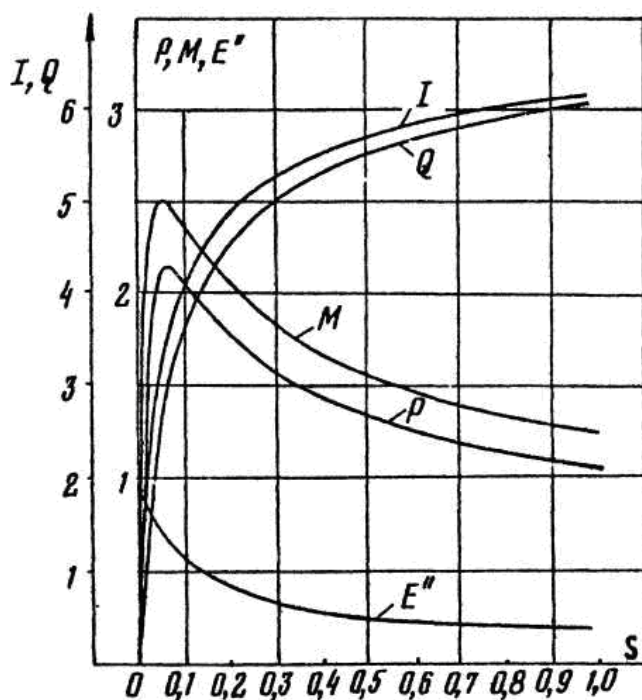


Рис. 5.

Зависимости параметров установившегося предшествующего режима асинхронного двигателя от скольжения: E'' - сверхпереходная ЭДС; I - потребляемый ток; P и Q - потребляемая активная и реактивная мощности; M - момент на валу двигателя.

При расчетах начального момента переходного процесса существенную роль играют только мощные двигатели, которые и учитываются каждый в отдельности.

Все другие двигатели и другие электроприемники учитываются в виде комплексной нагрузки. При этом следует учитывать влияние каждой нагрузки, если ток в месте КЗ от этой нагрузки составляет не менее 5% тока в месте КЗ, определенного без учета нагрузки. В общем случае ток КЗ комплексной нагрузки следует определять как геометрическую сумму токов отдельных ее элементов.

В приближенных расчетах допускается эквивалентирование комплексной нагрузки с представлением ее в виде эквивалентной ЭДС и эквивалентного сопротивления.

Рекомендуемые значения сопротивлений элементов комплексной нагрузки приведены в таблице 1.

Сопротивления элементов комплексной нагрузки (в относительных единицах)

Таблица 1

Потребители комплексной нагрузки	$\cos \varphi$	Z_1
Синхронные высоковольтные двигатели	0,9	$0,04 + j 0,22$
Асинхронные высоковольтные двигатели	0,9	$0,06 + j 0,18$
Асинхронные низковольтные двигатели	0,8	$0,09 + j 0,154$
Лампы накаливания	1,0	1
Газоразрядные источники света	0,85	$0,85 + j 0,53$
Преобразователи	0,9	$0,9 + j 0,44$

Электротермические установки	0,9	$1 + j0,49$
------------------------------	-----	-------------

Однако более часто электроприемники и мелкие двигатели учитываются в виде обобщенных нагрузок узлов энергосистемы с типовым составом потребителей и типовой схемой питающей сети.

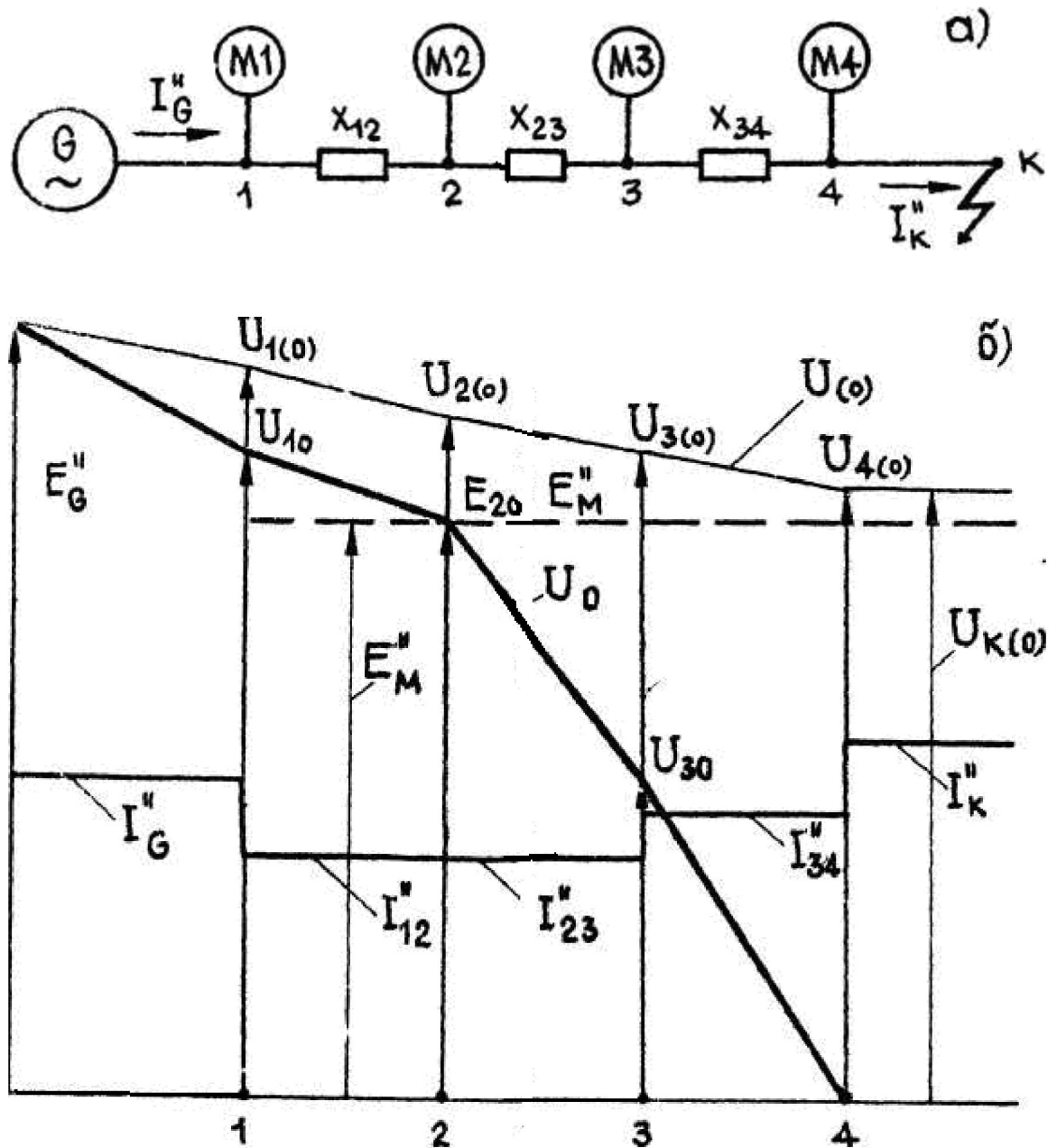


Рис. 6. Векторная диаграмма простейшей электрической цепи.

В практических расчетах обобщенная нагрузка в начальный момент КЗ учитывается приближенными параметрами

$$E_{H*}'' = 0.85; x_{H*} = 0.35.$$

выраженными в относительных единицах при номинальной мощности нагрузки и среднем номинальном напряжении той степени, к которой она присоединена.

Роль асинхронных двигателей и нагрузок в начальный момент переходного процесса зависит от значения остаточного напряжения в месте их присоединения и удаленности от

точки КЗ. В случаях, когда ЭДС двигателя или обобщенной нагрузки больше остаточного напряжения, они будут являться дополнительными источниками КЗ. Чем ближе расположены двигатели или другая нагрузка к месту КЗ, тем большую долю составляет их ток в общем токе в месте КЗ. Поэтому при расчетах сверхпереходного тока учитываются только те нагрузки и, отдельные двигатели, которые непосредственно связаны с местом КЗ или расположены на небольшой электрической удаленности от места КЗ.

3. Построение схем замещения.

3.1 Применение собственных взаимных проводимостей

Всякая электроэнергетическая система может быть представлена как n -полюсник, содержащий линейную пассивную электрическую схему, у которой в точках $j = 1, \dots, n$ за сопротивлениями Z_j подключены электродвижущие силы E_j (э. д. с), представляющие электрические машины $1, \dots, n$.

Вместо какого-либо генератора в схему может быть введена нагрузка. Тогда его э. д. с. станет равной нулю, а сопротивление или будет постоянным ($Z_H = \text{const}$), или будет функцией режима системы $[Z_H = \varphi(U, f)]$. В этом случае схема становится нелинейной. Токи, а следовательно, и мощности в любой ветви схемы могут быть определены через матрицу проводимостей n -полюсника Y (рис. 1).

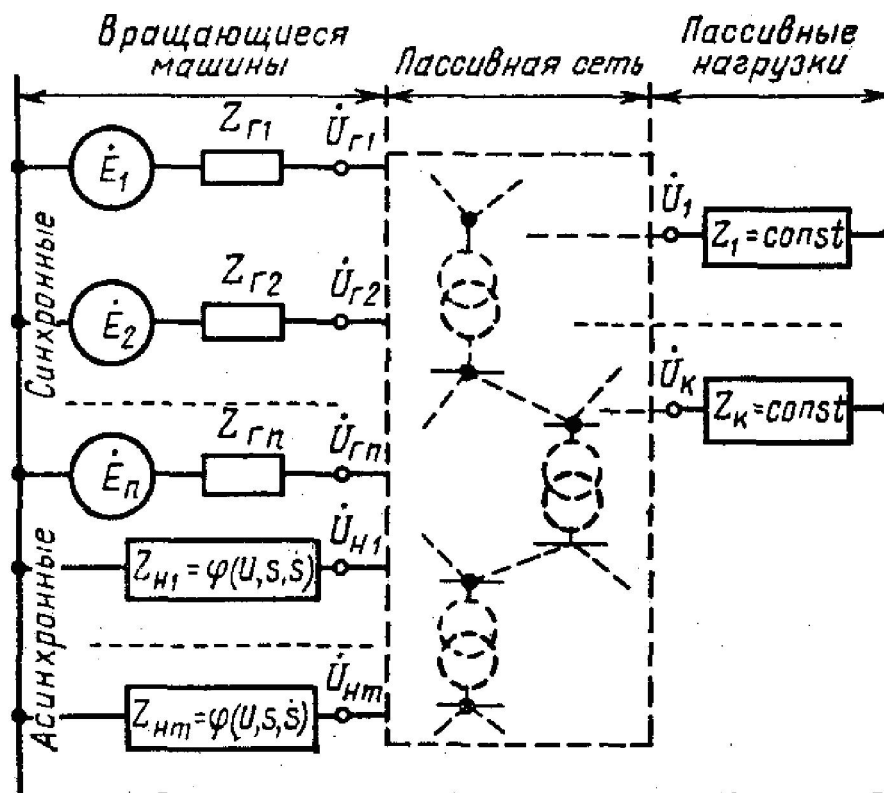


Рис. 1. Исходная расчетная схема электроэнергетической системы.

Ток со стороны генератора будет определяться соотношением $\dot{I} = Y \cdot \dot{E}$. Если э. д. с. \dot{E} в данной схеме известны, то для определения токов и мощностей надо найти проводимости Y . Матрица Y имеет диагональные Y_{nn} и недиагональные Y_{jk} элементы.

Известно, что $Y_{nn} = y_{nn} \angle \psi_{nn} = g_{nn} + jb_{nn}$ является *собственной проводимостью*, т. е. комплексной величиной (в общем случае), определяющей модуль и фазу тока в какой-либо ветви n схемы от действия э.д.с, приложенной в этой ветви при отсутствии э.д.с. во всех остальных ветвях. Величина $Y_{nk} = y_{nk} \angle \psi_{nk}$ является *взаимной проводимостью* между узлами n и k . Это комплексная величина, определяющая модуль и фазу тока в какой-либо ветви n от действия э. д. с, приложенной в другой ветви k , при отсутствии э.д.с. во всех остальных ветвях. Любую из этих проводимостей можно представить как

$$Y = g \mp jb = ye^{\mp j\psi} = ye^{\mp j(90^\circ - \alpha)} = \mp jye^{\pm j\alpha},$$

где $\psi = \arctg(b/g)$; $\alpha = 90^\circ - \psi$; $Y = \mp jye^{\pm j\alpha} = y(\sin \alpha \mp j \cos \alpha) = y(r/z \mp jx/z)$; здесь верхний знак отвечает индуктивной проводимости, а нижний — емкостной

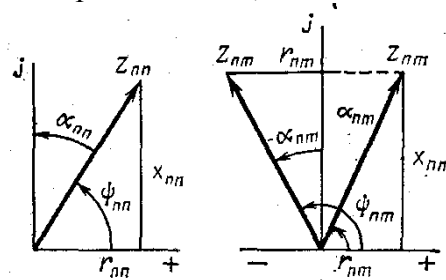


Рис. 2. Структура собственных Z_{nn} и взаимных Z_{nm} сопротивлений

При определении взаимной проводимости часто получают отрицательные значения ее вещественной составляющей, т.е. $-g$, и соответственно для угла $\alpha = \arctg(g/b)$. Это может вызвать недоумение, так как у какого-либо реального элемента отрицательная составляющая проводимости может быть только в активной схеме (при наличии в этом элементе источника энергии). Однако взаимная проводимость характеризует не реальный элемент, а представляет собой некоторый комплексный коэффициент пропорциональности между током в одной ветви схемы и напряжением в другой ветви. Поэтому она может иметь отрицательную вещественную составляющую и в пассивных схемах. У собственных проводимостей Y_{nn}, Y_{kk} , определяемых как отношения тока к напряжению в данной точке схемы, активные составляющие не могут быть отрицательными, если отдельные ветви схемы не содержат отрицательных активных сопротивлений, т. е. некоторых источников мощности, наличие которых в данном случае из рассмотрения исключается. Таким образом, углы α_{nn} и α_{kk} собственных проводимостей и их вещественные составляющие всегда положительны; угол α_{nm} может быть как положительным, так и отрицательным.

Величины, обратные собственным проводимостям, называются *собственными сопротивлениями*, а величины, обратные взаимным проводимостям, — *взаимными сопротивлениями*.

Для того чтобы найти активные и реактивные мощности, токи и напряжения в любом элементе системы при установившемся режиме или очень медленном его изменении применяют известный способ наложения (суперпозиции). Для этого необходимо, чтобы все синхронные машины, были представлены некоторыми постоянными сопротивлениями с приложенными за ними э.д.с, а асинхронные двигатели нагрузки — пассивными элементами. Рассматриваемая система при этом должна быть или линейной, или посредством каких-либо преобразований из нее должны быть выделены линейные части. После преобразований схема системы может быть положена в основу расчетов установившихся или квазипереходных режимов. Она становится *схемой замещения*, объединяющей генераторы (источники напряжения в виде э. д. с. \dot{E} и сопротивления Z_H), нагрузки и элементы сети (см. рис. 1).

Электрическая сеть представлена в схеме замещения линейной пассивной электрической цепью, режим которой может быть описан узловыми уравнениями, связывающими напряжения в узловых точках этой сети с токами генераторов и нагрузок. Для сети, содержащей n узлов, эти уравнения в матричной форме записи имеют вид

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \cdots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \cdots & -Y_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \cdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \cdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix}, (1)$$

где за положительное принято направление тока в сеть.

Элементы матрицы узловых проводимостей сети Y_0 легко определяются по схеме замещения сети:

- диагональный элемент $Y_{ii}, (i = 1, 2, \dots, n)$, называемый *собственной проводимостью* узла i , равен сумме проводимостей ветвей сети, связанных с узлом i ;
- недиагональный элемент $Y_{ij}, (i, j = 1, 2, \dots, n)$, называемый *взаимной проводимостью* узлов i и j , равен проводимости ветви, соединяющей эти узлы.

Рассмотрим линейную схему замещения электрической системы при представлении нагрузок постоянными сопротивлениями $Z_H = const$. Полагая, что к первым m узлам сети ($i = 1, \dots, m < n$) подключены генераторы, а к остальным узлам ($j = m + 1, \dots, n$) — нагрузки, запишем уравнения нагрузок с учетом положительных направлений токов согласно (1):

$$\dot{I}_j = -(1/Z_{Hj})\dot{U}_j = -Y_{Hj}\dot{U}_j, j = m + 1, \dots, n. (2)$$

Объединив (1) и (2), получим

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} Y_{11} & \cdots & -Y_{1(m)} & -Y_{1(m+1)} & \cdots & -Y_{1(n)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -Y_{(m)1} & \cdots & Y_{(m)(m)} & -Y_{(m)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m)(n)} \\ \hline -Y_{(m+1)1} & \cdots & -Y_{(m+1)(m)} & Y_{(m+1)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m+1)(n)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -Y_{n1} & \cdots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \cdots & Y_{nn} \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \cdots \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_{m+1} \\ \cdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \cdots \\ \dot{I}_m \\ -Y_{n(m+1)}\dot{U}_{m+1} \\ \cdots \\ -Y_{nn}\dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

или

$$\left[\begin{array}{cccccc|ccc} Y_{11} & \cdots & -Y_{1(m)} & -Y_{1(m+1)} & \cdots & -Y_{1(n)} & & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & & \\ -Y_{(m)1} & \cdots & -Y_{(m)(m)} & -Y_{(m)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m)(n)} & & & \\ \hline -Y_{(m+1)1} & \cdots & -Y_{(m+1)(m)} & Y_{(m+1)(m+1)} + Y_{(n)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m+1)(n)} & & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & & \\ -Y_{(n)1} & \cdots & -Y_{(n)(m)} & -Y_{(n)(m+1)} & \cdots & Y_{(n)(n)} + Y_{(n)(n)} & & & \end{array} \right] \times \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \cdots \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_{m+1} \\ \cdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \cdots \\ \dot{I}_m \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Приведение уравнений (2) к виду (4) соответствует введению постоянных сопротивлений нагрузок в схему замещения сети. Это привело к изменению собственных проводимостей нагрузочных узлов $Y_{jj}, (j = m + 1, \dots, n)$ и исключению токов нагрузок как внешних переменных сети. В соответствии с указанным разделением (4) на блоки, эти уравнения можно записать в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} Y_{ГГ} & Y_{ГН} \\ Y_{НГ} & Y_{НН} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_Г \\ \dot{U}_Н \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_Г \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Порядок системы уравнений (5) равен n , но его можно понизить до $m < n$, исключив из состава переменных напряжения нагрузок. Способ понижения порядка используется в том случае, когда в задачу расчета режима не входит определение $\dot{U}_Н$. Раскроем (5):

$$Y_{ГГ}\dot{U}_Г + Y_{ГН}\dot{U}_Н = \dot{I}_Г; \quad (5a)$$

$$Y_{НГ}\dot{U}_Г + Y_{НН}\dot{U}_Н = 0 \quad (5б)$$

Из (5б) получим

$$\dot{U}_Н = -(Y_{НН})^{-1} Y_{НГ} \dot{U}_Г.$$

Подставив последнее выражение в (5a), получим

$$(Y_{ГГ} - Y_{ГН}(Y_{НН})^{-1} Y_{НГ}) \dot{U}_Г = \dot{I}_Г;$$

или

$$Y_C \dot{U}_Г = \dot{I}_Г; \quad (6)$$

где

$$Y_C = Y_{ГГ} - Y_{ГН}(Y_{НН})^{-1} Y_{НГ}.$$

Элементы матрицы проводимостей в (6) в отличие от (2) требуют для своего определения сложных вычислений, и только диагональные элементы этой матрицы имеют ясную физическую трактовку. Действительно, рассмотрим произвольное (i -е) уравнение системы (6):

$$-Y_{Ci1}\dot{U}_{Г1} - \dots - Y_{Ci(i-1)}\dot{U}_{Г(i-1)} + Y_{Cii}\dot{U}_{Гi} - Y_{Ci(i+1)}\dot{U}_{Г(i+1)} - \dots - Y_{Cim}\dot{U}_{Гm} = \dot{I}_{Гi}. \quad (7)$$

Собственная проводимость узла Y_{Cii} может быть определена как отношение тока к напряжению узла i при равенстве нулю напряжений всех остальных узлов (т. е. при замыкании этих узлов накоротко), иными словами, Y_{Cii} — входная проводимость схемы относительно узла i . Так как в рассматриваемой пассивной цепи активные сопротивления ветвей положительны, то и активная составляющая Y_{Cii} будет положительна, а знак реактивной составляющей будет определяться соотношением индуктивных и емкостных сопротивлений ветвей схемы.

Взаимная проводимость узлов $Y_{Cij}, (j \neq i)$ может быть определена как взятое с обратным знаком отношение тока в узле i к напряжению в узле j при равенстве нулю напряжений всех остальных узлов, т. е. является коэффициентом пропорциональности между током в одном узле схемы и напряжением в другом и физического аналога, в отличие от собственной проводимости, не имеет. В связи с этим знак активной составляющей взаимной проводимости может оказаться отрицательным для пассивной схемы, активные сопротивления ветвей которой положительны.

Для линейной схемы замещения электрической цепи и представления нагрузок постоянными сопротивлениями схема замещения электрической системы с учетом э. д. с. и сопротивлений генераторов также будет линейной. Уравнения узловых напряжений для электрической системы можно получить, дополнив (6) уравнениями

$$\dot{E}_{ri} - \dot{U}_{ri} = Z_{ri} \dot{I}_{ri}; i = 1, \dots, m;$$

или в матричной форме

$$\dot{E}_Г - \dot{U}_Г = Z_Г \dot{I}_Г; \quad (8)$$

где $\dot{E}_Г, \dot{U}_Г, \dot{I}_Г$ — векторы э. д. с, напряжений и токов генераторов; $Z_Г$ — диагональная матрица сопротивлений генераторов.

Обозначив $Z_{\Gamma}^{-1} = Y_{\Gamma}$, запишем (8) в виде

$$Y_{\Gamma} \dot{E}_{\Gamma} - Y_{\Gamma} \dot{U}_{\Gamma} = \dot{I}_{\Gamma}. \quad (9)$$

Подставив \dot{I}_{Γ} из (9) в (6), получим

$$-Y_{\Gamma} \dot{E}_{\Gamma} + (Y_C + Y_{\Gamma}) \dot{U}_{\Gamma} = 0. \quad (10)$$

Объединив (9) и (10) в матричное уравнение, запишем систему узловых уравнений электрической системы в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} Y_{\Gamma} & -Y_{\Gamma} \\ -Y_{\Gamma} & Y_C + Y_{\Gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_{\Gamma} \\ \dot{U}_{\Gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{\Gamma} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Порядок системы уравнений (11) равен удвоенному числу генераторов, т. е. $2m$. Если в задачу расчета режима не входит определение \dot{U}_{Γ} , то порядок (11) можно понизить до m аналогично тому, как это делалось при получении (6). Исключив \dot{U}_{Γ} из (11), получим систему уравнений порядка m :

$$Y_{\Delta} \dot{E}_{\Gamma} = \dot{I}_{\Gamma}, \quad (12)$$

где

$$Y_{\Delta} = Y_{\Gamma} - Y_{\Gamma} (Y_C + Y_{\Gamma})^{-1} Y_{\Gamma}.$$

Таким образом представление генераторов и нагрузок в схеме замещения электрической системы в виде элементов электрической цепи, содержащих постоянные сопротивления, позволяет понижать порядок системы узловых уравнений путем исключения пассивных узлов.

Собственные и взаимные проводимости, т. е. элементы матрицы узловых проводимостей линейной электрической цепи, определяются через проводимости ветвей цепи, если узловые уравнения записаны для всех узлов (определение элементов матрицы Y_{Γ} в (1)). При расчете этих проводимостей существенные трудности возникают, если из указанной полной системы узловых уравнений необходимо исключить уравнения пассивных узлов, т. е. узлов, к которым не подключены источники тока или э. д. с.

3.2 Расчет собственных и взаимных проводимостей и сопротивлений

Для линейной схемы расчет собственных и взаимных проводимостей и сопротивлений может быть произведен четырьмя способами.

1. *Способ наложения*. Система может быть в этом случае представлена схемой, показанной на рис. 2.4, а. Заменяем рассмотрение этой схемы последовательным рассмотрением подсхем, показанных на рис. 2.4, б, в. Этих подсхем должно быть столько, сколько в схеме (рис. 2.4, а) имеется ветвей, содержащих э. д. с. Ток в любой ветви будет

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{13} - \dots - \dot{I}_{1n} - \dots - \dot{I}_{1k},$$

где \dot{I}_{11} — собственный ток; $\dot{I}_{12}, \dot{I}_{13}, \dots, \dot{I}_{1n}, \dots, \dot{I}_{1k}$ — взаимные токи.

Под *собственным током* понимается составляющая тока в любой ветви, вызванная действием э. д. с, приложенной в данной ветви при отсутствии (равенстве нулю) э. д. с. в других ветвях. Под *взаимным током* понимается составляющая тока в какой-либо ветви, вызванная действием э. д. с. в другой ветви при равенстве нулю э. д. с. во всех остальных ветвях.

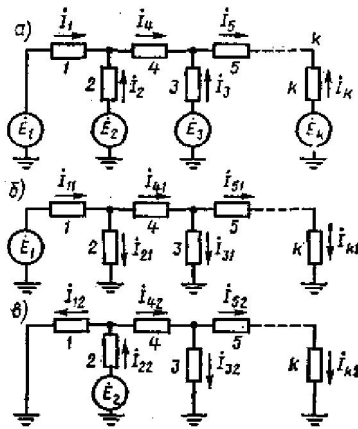


Рис. 3. Схема определения собственных и взаимных сопротивлений способом наложения: *а* — исходный режим расчетной схемы; *б* — подсхема при действии э. д. с. \dot{E}_1 ; *в* — подсхема при действии э. д. с. \dot{E}_2 .

Очевидно, что

$$\dot{I}_{nn} = \dot{E}_n Y_{nn}; \dot{I}_{nm} = \dot{E}_m Y_{nm};$$

где Y_{nn} — собственная проводимость, равная \dot{I}_{nn} / \dot{E}_n ; Y_{nm} — взаимная проводимость, равная \dot{I}_{nm} / \dot{E}_m .

2. *Способ преобразования.* Собственные и взаимные проводимости для любой схемы могут находиться путем преобразования. При этом любая схема приводится к виду схемы, показанной на рис. 4. Исходя из преобразованной схемы, легко найти взаимные и собственные проводимости: $Y_{n2} = 1/Z_{n2}$; $Y_{n3} = 1/Z_{n3}$; и т. д.; $Y_{nn} = 1/Z_{n0} + 1/Z_{n2} + 1/Z_{n3} + \dots + 1/Z_{nm}$ и т. д.

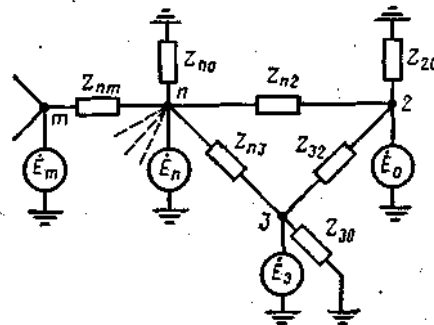


Рис. 4. Схема определения собственных и взаимных проводимостей или сопротивлений способом преобразования.

3. *Способ единичных токов.* Для определения Y_{kk} , т. е. собственной проводимости какой-либо ветви, начинающейся точкой k , и ее взаимной проводимости с точкой n , ($n = 1, 2, 3, \dots$) поступают следующим образом. Предполагают, что к ветви k (см. рис. 3, *а*) приложена некая расчетная э. д. с. ΔE_k , значения и фаза которой приняты такими, что в ветви n от действия только этой э. д. с. (при равных нулю э. д. с. во всех остальных ветвях) протекает ток $\dot{I}_{nk} = 1$. Зная ток в ветви n , находим, что падение напряжения в ней $\Delta \dot{U}_n = \dot{I}_{nk} Z_n = 1 \cdot Z_n$. Очевидно, что напряжение, приложенное в точке присоединения сопротивления Z_n , равно $\Delta \dot{U}_n$. Производя далее токораспределение, находим токи и

напряжения во всех ветвях и в конечном счете ток \dot{I}_{kk} и э. д. с. ΔE_k . При этом взаимная проводимость $Y_{nk} = 1/\Delta E_k$, а собственная проводимость $Y_{kk} = \dot{I}_{kk}/\Delta E_k$.

4. *Способ матричного определения собственных и взаимных проводимостей.* В этом случае для определения собственных и взаимных проводимостей составляются специальные программы и вычисления обычно проводятся на ЦВМ. Иногда рекомендуется собственную проводимость какого-либо узла k (точки) сложной схемы определять делением определителя M матрицы узловых проводимостей (полинома проводимостей ветвей деревьев) на полином M_{k0} проводимостей двух соответствующих деревьев (для узлов k и 0) или

$$Y_{k0} = Y_{kk} = M/M_{k0}.$$

Взаимная проводимость между узлами n, k будет выражаться как

$$Y_{nk} = M/[M_{nk,0m} - M_{km,0n}],$$

где для определения $M_{nk,0m}$ и $M_{km,0n}$ необходимо выявить пути между узлами kn и $0m$, а затем между узлами km и $0n$, где k, n, m — номера узлов.

Способы матричного определения оправданы только при сложных схемах. С помощью компьютера такие расчеты без особых затруднений позволяют находить проводимости для сетей, имеющих до 3000 узлов и более. Однако при проведении расчетов на компьютере обычно нет надобности отдельно вычислять собственные и взаимные проводимости, с тем чтобы далее находить режим, определяя токи, потоки мощностей, напряжения в узлах и т. д. Все эти операции (или та часть из них, которая необходима для конкретных целей исследования) совмещается в одной программе или программе с подпрограммами.

3.3 Определение угловых характеристик мощности через собственные и взаимные сопротивления

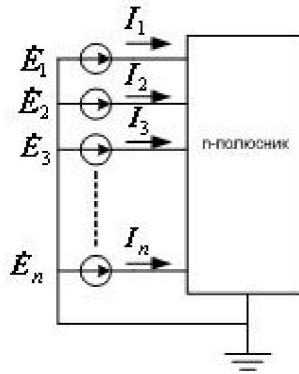
Если известна матрица узловых сопротивлений или проводимостей, то для тока в месте короткого замыкания в соответствии с принципом наложения

$$I_K = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{Z_{iK}} = \sum_{i=1}^n Y_{iK} E_i,$$

где E_1, \dots, E_n — э.д.с. генераторов, Z_{iK}, Y_{iK} — взаимные сопротивления или проводимости между источником э.д.с. и точкой короткого замыкания.

Схему замещения без э.д.с. можно рассматривать как многополюсник, который может быть охарактеризован при помощи матрицы узловых проводимостей

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$



При этом собственные проводимости Y_{ii} представляют собой комплексную величину, определяющие модуль и фазу тока I_i в ветви i от действия э.д.с. E_i , приложенной к этой же ветви, при условии равенства нулю всех остальных э.д.с.

$$I_i = Y_{ii} E_i;$$

а взаимные проводимости Y_{ij} представляют собой комплексную величину, определяющие модуль и фазу тока I_i в ветви i от действия э.д.с. E_j , приложенной к ветви j , при условии равенства нулю всех остальных э.д.с.:

$$I_i = Y_{ij} E_j.$$

Тогда ток в ветви k можно определить по формуле

$$I_k = E_k Y_{kk} - \sum_{i \neq k} Y_{ki} E_i.$$

Если учесть, что в общем случае э.д.с. E_i является комплексной величиной, то есть

$$E_i = |E_i| e^{j\delta_i},$$

а Y_{ij} - есть тоже комплексная величина, представимая в виде

$$Y_{ij} = g_{ij} - jb_{ij} = -jy_{ij} e^{j\alpha_{ij}};$$

$$\alpha_{ij} = \arctg\left(\frac{g_{ij}}{b_{ij}}\right); y_{ij} = \sqrt{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}.$$

Тогда выражение для тока может быть переписано в виде

$$I_k = E_k Y_{kk} - \sum_{i \neq k} Y_{ki} E_i = -|E_k| e^{j\delta_k} j y_{kk} e^{j\alpha_{kk}} + \sum_{i \neq k} |E_i| e^{j\delta_i} j y_{ki} e^{j\alpha_{ki}}.$$

При расчетах электроэнергетических систем очень часто в качестве системы координат выбирают прямоугольную систему, у которой одна ось q_k совпадает по направлению с напряжением E_k , а другая ось d_k отстает от E_k на 90° , причем k выбирают из каких-либо соображений или произвольно. В этой системе координат

$$I_k = e^{j\delta_k} (I_{qk} - jI_{dk}) = -|E_k| e^{j\delta_k} j y_{kk} e^{j\alpha_{kk}} + \sum_{i \neq k} |E_i| e^{j\delta_i} j y_{ki} e^{j\alpha_{ki}}.$$

Если поделить обе части уравнения на $e^{j\delta_k}$, а затем умножить их на j , то

$$jI_{qk} + I_{dk} = |E_k| y_{kk} e^{j\alpha_{kk}} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} e^{j(\delta_i + \alpha_{ki} - \delta_k)}.$$

Учитывая формулу Эйлера

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi,$$

получаем

$$jI_{qk} + I_{dk} = |E_k| y_{kk} \cos \alpha_{kk} + j|E_k| y_{kk} \sin \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \cos(\delta_i + \alpha_{ki} - \delta_k) - \\ - j \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \sin(\delta_i + \alpha_{ki} - \delta_k).$$

Приравнявая действительные и мнимые части и учитывая четность функции косинус и нечетность функции синус, находим:

$$I_{dk} = |E_k| y_{kk} \cos \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \alpha_{ki}); \\ I_{qk} = |E_k| y_{kk} \sin \alpha_{kk} + \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \alpha_{ki}).$$

Обозначая через $\delta_{ki} = \delta_k - \delta_i$ - угол между э.д.с. E_k и E_i , получаем

$$I_{dk} = |E_k| y_{kk} \cos \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \cos(\delta_{ki} - \alpha_{ki}); \\ I_{qk} = |E_k| y_{kk} \sin \alpha_{kk} + \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \sin(\delta_{ki} - \alpha_{ki}).$$

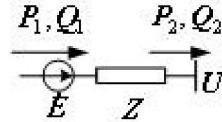
Комплексная мощность (полная мощность), протекающая через точку k схемы замещения, определяется как

$$S_k = E_k I_k = E_k (I_{qk} + jI_{dk}) = E_k I_{qk} + jE_k I_{dk} = P_k + jQ_k,$$

где P_k, Q_k - активная и реактивная мощность соответственно. Поэтому

$$Q_k = |E_k|^2 y_{kk} \cos \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_k| |E_i| y_{ki} \cos(\delta_{ki} - \alpha_{ki}); \\ P_k = |E_k|^2 y_{kk} \sin \alpha_{kk} + \sum_{i \neq k} |E_k| |E_i| y_{ki} \sin(\delta_{ki} - \alpha_{ki}).$$

Например для простейшей схемы



$$Y_{11} = Y_{12} = 1/Z; y_{11} = y_{12} = 1/z; \alpha = \alpha_{11} = \alpha_{12} = \arcsin\left(\frac{r}{z}\right);$$

поэтому

$$P_1 = \frac{E^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta - \alpha); Q_1 = \frac{E^2}{z} \cos \alpha - \frac{EU}{z} \cos(\delta - \alpha); \\ P_2 = -\frac{U^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta + \alpha); Q_2 = -\frac{U^2}{z} \cos \alpha + \frac{EU}{z} \cos(\delta + \alpha);$$

Если $E = 1; U = 0.95; Z = 0.05 + j0.2$, то

$$z = \sqrt{0.05^2 + 0.2^2} = 0.206; \alpha = \arcsin(0.05/0.206) = 14^\circ;$$

поэтому

$$\begin{aligned}
P_1 &= \frac{1}{0.206} \sin 14^\circ + \frac{0.95}{0.206} \sin(\delta - 14^\circ) = 1.174 + 4.612 \sin(\delta - 14^\circ); \\
Q_1 &= \frac{0.95^2}{0.206} \cos 14^\circ - \frac{0.95}{0.206} \cos(\delta - 14^\circ) = 4.251 - 4.612 \cos(\delta - 14^\circ); \\
P_2 &= -\frac{1}{0.206} \sin 14^\circ + \frac{0.95}{0.206} \sin(\delta + 14^\circ) = -1.174 + 4.612 \sin(\delta + 14^\circ); \\
Q_2 &= -\frac{0.95^2}{0.206} \cos 14^\circ + \frac{0.95}{0.206} \cos(\delta + 14^\circ) = -4.251 + 4.612 \cos(\delta + 14^\circ);
\end{aligned}$$

4. Составление схем замещения с исключением и без исключения трансформаторных связей

4.1 Системы относительных единиц

Применение относительных единиц существенно упрощает расчетные выражения, облегчает контроль расчетных данных.

Для выражения параметров различных элементов схемы замещения электроэнергетической системы необходимо иметь 4 базисные единицы $U_\delta, S_\delta, I_\delta, Z_\delta$. Так как для трехфазной сети справедливы соотношения:

$$\begin{aligned}
S &= \sqrt{3}UI, \\
Z &= \frac{U}{\sqrt{3}I},
\end{aligned}$$

то достаточно задания любых двух базисных величин.

В частности:

1. при задании в качестве базисных U_δ, I_δ :

$$S_\delta = \sqrt{3}U_\delta I_\delta, Z_\delta = \frac{U_\delta}{\sqrt{3}I_\delta};$$

2. при задании в качестве базисных U_δ, S_δ :

$$I_\delta = \frac{S_\delta}{\sqrt{3}U_\delta}, Z_\delta = \frac{U_\delta^2}{S_\delta};$$

3. при задании в качестве базисных U_δ, Z_δ :

$$I_\delta = \frac{U_\delta}{\sqrt{3}Z_\delta}, S_\delta = \frac{U_\delta^2}{Z_\delta};$$

4. при задании в качестве базисных I_δ, S_δ :

$$U_\delta = \frac{S_\delta}{\sqrt{3}I_\delta}, Z_\delta = \frac{S_\delta}{3I_\delta^2};$$

5. при задании в качестве базисных I_δ, Z_δ :

$$U_\delta = \sqrt{3}Z_\delta I_\delta, S_\delta = 3I_\delta^2 Z_\delta;$$

6. при задании в качестве базисных S_δ, Z_δ :

$$I_{\delta} = \sqrt{\frac{S_{\delta}}{3Z_{\delta}}}, U_{\delta} = \sqrt{S_{\delta}Z_{\delta}}.$$

Относительное значение любого параметра определяется как частное от деления значения параметра в именованных единицах на значение соответствующей базисной величины

$$\dot{Y} = \frac{Y}{Y_{\delta}}.$$

Тогда

1. при задании в качестве базисных U_{δ}, I_{δ} :

$$E_{*} = \frac{E}{U_{\delta}}, U_{*} = \frac{U}{U_{\delta}}, I_{*} = \frac{I}{I_{\delta}}, S_{*} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{\delta}I_{\delta}}, Z_{*} = \frac{\sqrt{3}I_{\delta}Z}{U_{\delta}};$$

2. при задании в качестве базисных U_{δ}, S_{δ} :

$$E_{*} = \frac{E}{U_{\delta}}, U_{*} = \frac{U}{U_{\delta}}, I_{*} = \frac{\sqrt{3}U_{\delta}I}{S_{\delta}}, S_{*} = \frac{S}{S_{\delta}}, Z_{*} = \frac{S_{\delta}Z}{U_{\delta}^2};$$

3. при задании в качестве базисных U_{δ}, Z_{δ} :

$$E_{*} = \frac{E}{U_{\delta}}, U_{*} = \frac{U}{U_{\delta}}, I_{*} = \frac{\sqrt{3}Z_{\delta}I}{U_{\delta}}, S_{*} = \frac{SZ_{\delta}}{U_{\delta}^2}, Z_{*} = \frac{Z}{Z_{\delta}};$$

4. при задании в качестве базисных I_{δ}, S_{δ} :

$$E_{*} = \frac{\sqrt{3}I_{\delta}E}{S_{\delta}}, U_{*} = \frac{\sqrt{3}I_{\delta}U}{S_{\delta}}, I_{*} = \frac{I}{I_{\delta}}, S_{*} = \frac{S}{S_{\delta}}, Z_{*} = \frac{3I_{\delta}^2Z}{S_{\delta}};$$

5. при задании в качестве базисных I_{δ}, Z_{δ} :

$$E_{*} = \frac{E}{\sqrt{3}Z_{\delta}I_{\delta}S_{\delta}}, U_{*} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_{\delta}I_{\delta}S_{\delta}}, I_{*} = \frac{I}{I_{\delta}}, S_{*} = \frac{S}{3I_{\delta}^2Z_{\delta}}, Z_{*} = \frac{Z}{Z_{\delta}};$$

6. при задании в качестве базисных S_{δ}, Z_{δ} :

$$E_{*} = \frac{E}{\sqrt{S_{\delta}Z_{\delta}}}, U_{*} = \frac{U}{\sqrt{S_{\delta}Z_{\delta}}}, I_{*} = \frac{\sqrt{3}Z_{\delta}I}{\sqrt{S_{\delta}}}, S_{*} = \frac{S}{S_{\delta}}, Z_{*} = \frac{Z}{Z_{\delta}}.$$

Часто в каталожных данных элементов электроэнергетической системы их параметры представлены в процентах или относительных единицах относительно номинальных условий, тогда для перевода их значений в относительные, соответствующие базисным величинам необходимо значения этих параметров перевести в именованные, а затем в относительные при базисных условиях:

$$Y = Y_{* \text{ ном}} \cdot Y_{\text{ном}};$$

$$\dot{Y} = \frac{Y}{Y_{\delta}};$$

или

$$Y = Y_{* \text{ ном}} \frac{Y_{\text{ном}}}{Y_{\delta}}.$$

Тогда:

1. при задании в качестве базисных U_{δ}, I_{δ} :

$$E = E_{*} \frac{E_{ном}}{U_{\delta}}, U = U_{*} \frac{U_{ном}}{U_{\delta}}, I = I_{*} \frac{I_{ном}}{I_{\delta}}, S = S_{*} \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{\delta}I_{\delta}}, Z = Z_{*} \frac{\sqrt{3}I_{\delta}Z_{ном}}{U_{\delta}};$$

2. при задании в качестве базисных U_{δ}, S_{δ} :

$$E = E_{*} \frac{E_{ном}}{U_{\delta}}, U = U_{*} \frac{U_{ном}}{U_{\delta}}, I = I_{*} \frac{\sqrt{3}U_{\delta}I_{ном}}{S_{\delta}}, S = S_{*} \frac{S_{ном}}{S_{\delta}}, Z = Z_{*} \frac{S_{\delta}Z_{ном}}{U_{\delta}^2};$$

3. при задании в качестве базисных U_{δ}, Z_{δ} :

$$E = E_{*} \frac{E_{ном}}{U_{\delta}}, U = U_{*} \frac{U_{ном}}{U_{\delta}}, I = I_{*} \frac{\sqrt{3}Z_{\delta}I_{ном}}{U_{\delta}}, S = S_{*} \frac{Z_{\delta}S_{ном}}{U_{\delta}^2}, Z = Z_{*} \frac{Z_{ном}}{Z_{\delta}};$$

4. при задании в качестве базисных I_{δ}, S_{δ} :

$$E = E_{*} \frac{\sqrt{3}I_{\delta}E_{ном}}{S_{\delta}}, U = U_{*} \frac{\sqrt{3}I_{\delta}U_{ном}}{S_{\delta}}, I = I_{*} \frac{I_{ном}}{I_{\delta}}, S = S_{*} \frac{S_{ном}}{S_{\delta}}, Z = Z_{*} \frac{3I_{\delta}^2Z_{ном}}{S_{\delta}};$$

5. при задании в качестве базисных I_{δ}, Z_{δ} :

$$E = E_{*} \frac{E_{ном}}{\sqrt{3}Z_{\delta}I_{\delta}}, U = U_{*} \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}Z_{\delta}I_{\delta}}, I = I_{*} \frac{I_{ном}}{I_{\delta}}, S = S_{*} \frac{S_{ном}}{3I_{\delta}^2Z_{\delta}}, Z = Z_{*} \frac{Z_{ном}}{Z_{\delta}};$$

6. при задании в качестве базисных S_{δ}, Z_{δ} :

$$E = E_{*} \frac{E_{ном}}{\sqrt{S_{\delta}Z_{\delta}}}, U = U_{*} \frac{U_{ном}}{\sqrt{S_{\delta}Z_{\delta}}}, I = I_{*} \frac{\sqrt{3Z_{\delta}}I_{ном}}{\sqrt{S_{\delta}}}, S = S_{*} \frac{S_{ном}}{S_{\delta}}, Z = Z_{*} \frac{Z_{ном}}{Z_{\delta}}.$$

4.2 Составление схем замещения

4.2.1. Виды схем замещения

Схема замещения – это приближенная схема исходной электрической цепи, которая при определенных условиях отображает основные свойства реальной цепи.

Существует два приема составления схем замещения:

- с исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени, принятой за основную (базисную) ступень;
- с сохранением трансформаторных связей между различными ступенями напряжения.

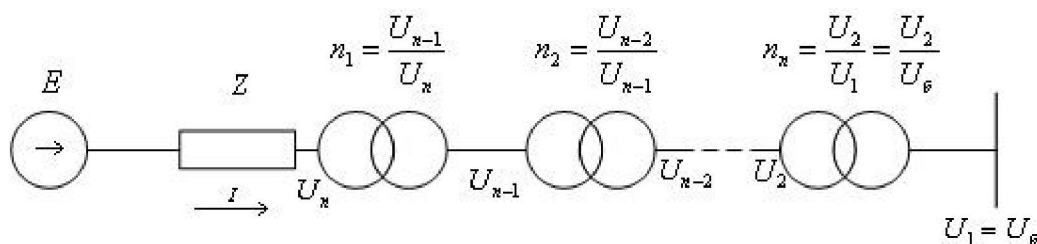
Приемы составления схем замещения	Достоинства	Недостатки
С исключением трансформаторных связей	- легкость в расчетах аналитическим способом;	-необходимость пересчета для получения действительных значений токов и напряжений; -необходимость пересчета при установке устройств управления коэффициентами трансформации в ЭЭС; -трудности в расчетах при питании сети от двух или более источников с различными напряжениями.
С сохранением трансформаторных связей	- исключение необходимости пересчета для нахождения истинных значений токов и напряжений; - возможность расчетов при	- более сложная схема замещения; -невозможность проведения расчетов аналитическим способом.

	переменных во времени коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов.	
--	---	--

4.2.2 Составление схем замещения с приведением параметров всех элементов к базисной ступени напряжения.

Ограничения. Трансформаторы с соединением обмоток по схеме Y/Δ учитываются по схеме Y/Y .

Точное приведение



Выбирают некоторую базисную ступень напряжения $U_6 = U_1$, тогда в именованных единицах с учетом истинных коэффициентов трансформации трансформаторов значения параметров ЭЭС ступени напряжения, отделенной от базисной ступени n трансформаторными связями, определяется по формулам:

$$\hat{E} = (n_1 n_2 \dots n_n) E;$$

$$U = (n_1 n_2 \dots n_n) U_6;$$

$$\hat{I} = \frac{I}{(n_1 n_2 \dots n_n)};$$

$$\hat{Z} = (n_1 n_2 \dots n_n)^2 Z.$$

Для приведения значений параметров элементов ЭЭС к одной ступени напряжения в именованных единицах при их задании в относительных единицах необходимо найти их значения в именованных единицах, а затем провести пересчет по приведенным выше формулам.

Для приведения значений параметров элементов ЭЭС к одной ступени напряжения в относительных единицах при их задании в относительных единицах необходимо найти их значения в именованных единицах, провести пересчет по приведенным выше формулам, а затем найти их относительные значения, поделив найденные приведенные на базисные.

4.2.3 Приближенное приведение.

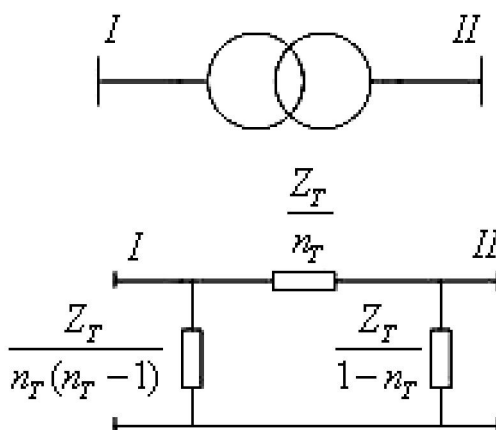
Если истинные коэффициенты трансформации неизвестны, то часто используют прием, называемый приближенным приведением. Он заключается в следующем: для каждой ступени напряжения устанавливается одно среднее номинальное напряжение, выбранное из ряда:

3,15; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175 кВ;

и коэффициенты трансформации для каждого трансформатора определяются как отношение выбранных средних номинальных напряжений.

4.2.4 Составление схем замещения с трансформаторными связями.

Расчеты в этом случае проводят в именованных единицах. Каждый двухобмоточный трансформатор представляют П-образной схемой замещения, при этом сопротивление трансформатора Z_T приводят к ступени напряжения II :



4.3 Схемы замещения прямой (обратной) последовательности трансформаторов

4.3.1 Двухобмоточные трансформаторы.

Двухобмоточный трансформатор в схеме замещения может быть представлен комплексным(полным) сопротивлением

$$Z = r + jx ;$$

при этом относительные значения относительно номинального режима работы полного Z , активного r и реактивного сопротивления x могут быть вычислены по каталожным данным по следующим формулам:

$$Z_{*ном} = u_{\kappa} / 100;$$

$$r_{*ном} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{S_{ном}} \cdot 10^{-3};$$

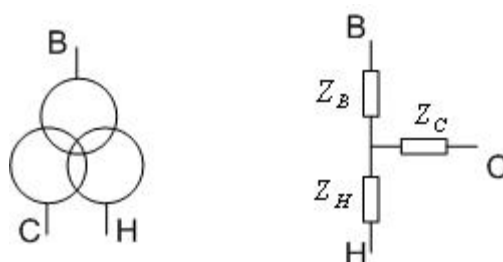
$$x_{*ном} = \sqrt{Z_{*ном}^2 - r_{*ном}^2} ;$$

где u_{κ} - напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения соответствующей обмотки трансформатора; ΔP_{κ} - потери активной мощности в режиме к.з., кВт; $S_{ном}$ - номинальная мощность трансформатора, МВА.

У трансформаторов мощностью более 1 МВА обычно принимают $Z \approx x$.

4.3.2 Трехобмоточные трансформаторы.

Схема замещения трехобмоточных трансформаторов обычно представляет собой трехлучевую звезду:



В каталожных данных для трехобмоточных трансформаторов задаются три напряжения к.з. между попарно взятыми обмотками, $u_{\kappa B-C}, u_{\kappa B-H}, u_{\kappa C-H}$. Сопротивления Z_B, Z_H, Z_C в схеме замещения не имеют физического смысла и являются абстрактными математическими величинами, удовлетворяющими уравнению

$$\begin{aligned} u_{\kappa B-C} / 100 &= Z_{B(\text{ном})} + Z_{C(\text{ном})}, \\ u_{\kappa B-H} / 100 &= Z_{B(\text{ном})} + Z_{H(\text{ном})}, \\ u_{\kappa C-H} / 100 &= Z_{C(\text{ном})} + Z_{H(\text{ном})}, \end{aligned}$$

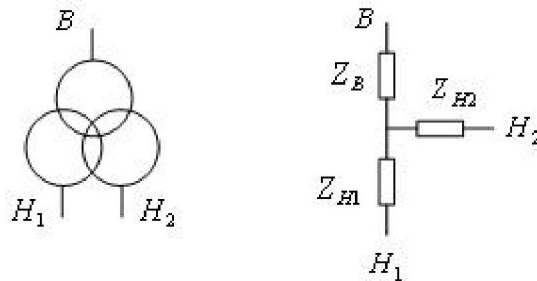
здесь $Z_{B(\text{ном})}, Z_{H(\text{ном})}, Z_{C(\text{ном})}$ - выражаются в относительных единицах относительно номинального режима трансформатора.

Решение этой системы уравнений дает

$$\begin{aligned} Z_{B(\text{ном})} &= 0,5(u_{\kappa B-C} + u_{\kappa B-H} - u_{\kappa C-H}) / 100, \\ Z_{C(\text{ном})} &= 0,5(u_{\kappa B-C} + u_{\kappa C-H} - u_{\kappa B-H}) / 100, \\ Z_{H(\text{ном})} &= 0,5(u_{\kappa B-H} + u_{\kappa C-H} - u_{\kappa B-C}) / 100, \end{aligned}$$

4.3.3 Двухобмоточные трансформаторы с расщепленной на две части обмоткой низшего напряжения.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора с расщепленной на две части обмоткой низшего напряжения обычно представляет собой трехлучевую звезду:



Параметры схемы замещения в относительных единицах относительно номинального режима работы трансформатора могут быть рассчитаны по формуле

$$\begin{aligned} Z_{H1(\text{ном})} &= Z_{H2(\text{ном})} = 0,5u_{\kappa H1-H2} / 100; \\ Z_{B(\text{ном})} &= (u_{\kappa B-H} - 0,25u_{\kappa H1-H2}) / 100, \end{aligned}$$

где $u_{\kappa H1-H2}$ - напряжение короткого замыкания между частями расщепленной обмотки низшего напряжения; $u_{\kappa B-H}$ - напряжение КЗ между обмоткой высшего напряжения и параллельно соединенными частями обмотки низшего напряжения.

Иногда в каталожных данных вместо $u_{\kappa H1-H2}$ и $u_{\kappa B-H}$ бывает представлен коэффициент расщепления K_p , определяемый как

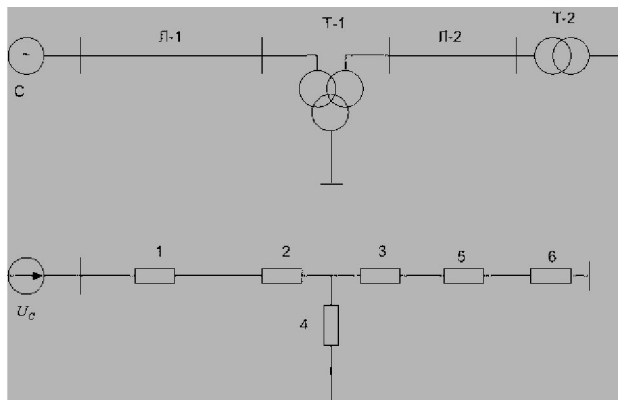
$$K_p = \frac{u_{\kappa H1-H2}}{u_{\kappa B-H}},$$

тогда

$$Z_{H1(ном)} = Z_{H2(ном)} = 0,5K_p u_{кВ-H} / 100;$$

$$Z_{B(ном)} = (1 - 0,25K_p) u_{кВ-H} / 100,$$

Пример



Данные:

- трансформатор Т-1 : 40 МВА; 115/38,5/11 кВ;
 $u_{BC} = 17\%$; $u_{BH} = 10,5\%$; $u_{CH} = 6\%$;
- трансформатор Т-2: 6,3 МВА; 35/6,6 кВ; $u_K = 7.5\%$;
- линия Л-1 : 60 км ; $x = 0,4$ Ом/км;
- линия Л-2: 10 км ; $x = 0,4$ Ом/км;
- система: напряжение неизменно и составляет 117 кВ.

4.4 Точное приведение в именованных единицах

В качестве основной ступени выбираем, например, ступень к которой подключена система. Тогда

1. для линий электропередач

$$x_1 = 0,4 * 60 = 24 \text{ ом};$$

$$x_5 = 0,4 * 10 * \left(\frac{115}{38,5}\right)^2 = 36 \text{ ом}.$$

2. для трансформатора Т-1

$$u_B = 0,5(17 + 10,5 - 6) = 10,75\%;$$

$$u_C = 0,5(17 + 6 - 10,5) = 6,25\%;$$

$$u_H = 0,5(6 + 10,5 - 17) = -0,25\%;$$

$$x_2 = \frac{10,75}{100} \frac{115^2}{40} = 35,5 \text{ ом};$$

$$x_3 = \frac{6,25}{100} \frac{115^2}{40} = 20,5 \text{ ом};$$

$$x_4 = \frac{-0,25}{100} \frac{115^2}{40} = -0,83 \text{ ом};$$

3. для трансформатора Т-2:

$$x_6 = \frac{7,5}{100} \frac{35^2}{6,3} \left(\frac{115}{38,5} \right)^2 = 131 \text{ ом};$$

4. для системы

$$U_c = \frac{117}{\sqrt{3}} = 67,5 \text{ кВ}.$$

5. Применение принципа наложения при расчетах переходных режимов.

Принцип наложения: действительный режим электроэнергетической системы можно представить как результат наложения ряда условных режимов, каждый из которых определяется в предположении, что к схеме приложена только одна э.д.с., в то время как все остальные равны нулю.

Принцип наложения применим, если схема замещения ЭЭС представляет собой линейную электрическую цепь.

На практике используют следующие формы принципа наложения:

- наложение аварийного режима на предшествующий;
- применение собственных и взаимных сопротивлений или проводимостей.

5.2 Наложение аварийного режима на предшествующий.

Если генераторы введены в схему замещения своими э.д.с., которые были у них до короткого трехфазного замыкания, то аварийный режим удобно представить в виде наложения двух режимов:

1. э.д.с. генераторов остаются неизменными, а в точку к.з. водится э.д.с., равная по величине напряжению в этой точке до короткого замыкания;
2. э.д.с. генераторов равны нулю, а в точку к.з. водится э.д.с., равная по величине напряжению в этой точке до короткого замыкания, взятая с обратным знаком.

Тогда при трехфазном коротком замыкании для любой точки схемы замещения:

$$I = I_1 + I_2;$$

$$U = U_1 + U_2.$$

Пример.

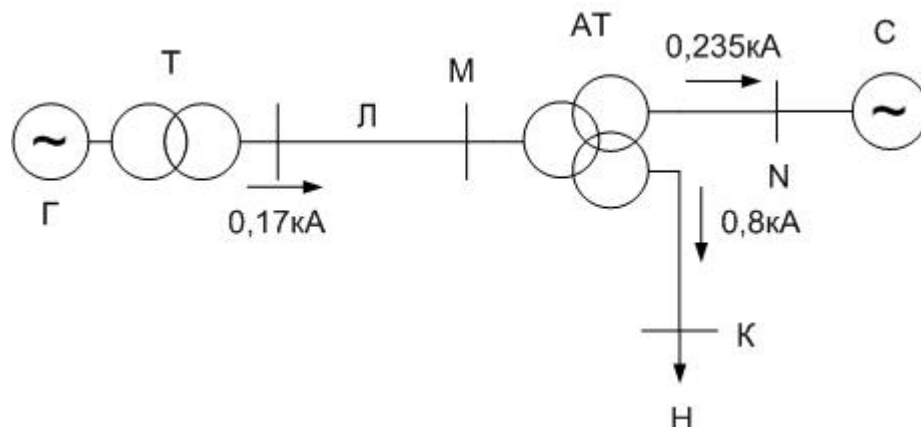


Рис1. Исходная схема ЭЭС.

Исходные данные:

$$U_M = 224 \text{ кВ}; \quad U_N = 116 \text{ кВ}; \quad U_K = 10,2 \text{ кВ};$$

$$Г: S = 194 \text{ МВА}; \quad x_d = 0,235; \quad U_G = 18 \text{ кВ};$$

$$Т: S = 200 \text{ МВА}; \quad 242/18 \text{ кВ}; \quad u_K = 12\%;$$

$$АТ: S = 125 \text{ МВА}; \quad 220/121/11 \text{ кВ}; \quad u_{BC} = 10,5\%; u_{BH} = 36,3\%; u_{CH} = 23\%;$$

$$Л: 135 \text{ км}; \quad 0,4 \text{ ом};$$

$$С: \quad x = 10 \text{ ом}.$$

Найти ток короткого замыкания.

Решение

Составляем схему замещения

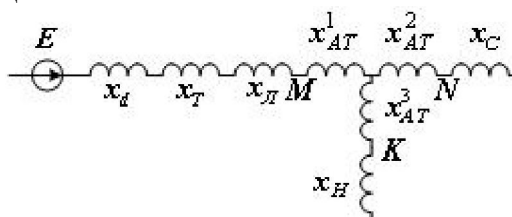


Рис.2. Схема замещения ЭЭС.

Выбирая в качестве основной ступени линию электропередач с напряжением в точке М равным 224 кВ, имеем:

$$U_\theta = U_M = 224 \text{ кВ};$$

$$U_K = U_K n_1 = 10,2 \frac{220}{11} = 208 \text{ кВ}; \quad U_N = U_N n_2 = 116 \frac{220}{121} = 211 \text{ кВ};$$

$$\hat{x}_d = x_d \frac{U_G^2}{S_G} (n_3)^2 = 0,235 \frac{18^2}{194} \left(\frac{242}{18} \right)^2 = 71 \text{ ом};$$

$$\hat{x}_T = \frac{u_K}{100} \frac{U_B^2}{S_T} = \frac{12}{100} \frac{242^2}{200} = 35 \text{ ом};$$

$$\hat{x}_L = 0,4 * 135 = 54 \text{ ом};$$

$$\hat{x}_{AT}^1 = \frac{u_{BC} + u_{BH} - u_{CH}}{200} \cdot \frac{U_B^2}{S_{AT}} = \frac{10,5 + 36,3 - 23}{200} \cdot \frac{220^2}{125} = 46 \text{ ом};$$

$$\hat{x}_{AT}^2 = \frac{u_{BC} + u_{CH} - u_{BH}}{200} \cdot \frac{U_B^2}{S_{AT}} = \frac{10,5 + 23 - 36,3}{200} \cdot \frac{220^2}{125} = -5,4 \text{ ом};$$

$$\hat{x}_{AT}^3 = \frac{u_{CH} + u_{BH} - u_{BC}}{200} \cdot \frac{U_B^2}{S_{AT}} = \frac{23 + 36,3 - 10,5}{200} \cdot \frac{220^2}{125} = 94,5 \text{ ом};$$

$$\hat{x}_C = x_C (n_2)^2 = 10 \left(\frac{220}{121} \right)^2 = 33 \text{ ом};$$

$$\hat{x}_H = \frac{U_K}{\sqrt{3} I_K} (n_1)^2 = \frac{10,2}{\sqrt{3} \cdot 0,8} \left(\frac{220}{11} \right)^2 = 2945 \text{ ом}.$$

Введем в точку короткого замыкания э.д.с., равную

$$E_1 = \frac{U_K}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 \text{ кВ};$$

Тогда упрощенная схема нормального режима имеет вид:

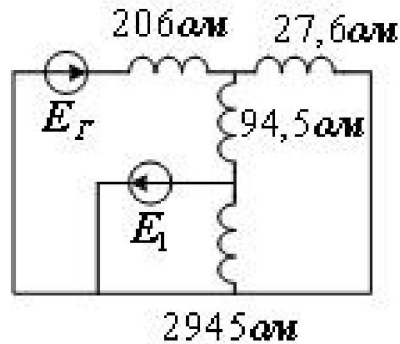


Рис.3. Упрощенная схема замещения нормального режима.

В аварийном режиме E_r отсутствует, а вместо E_1 вводится E_2 , равная -120 кВ.

Тогда схема замещения аварийного режима имеет вид:

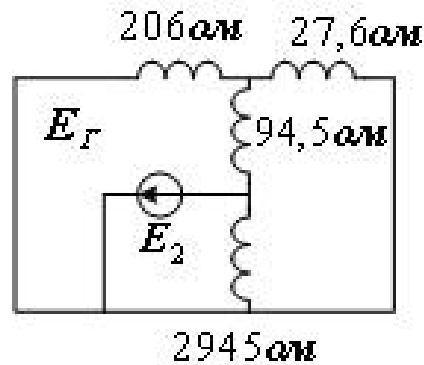
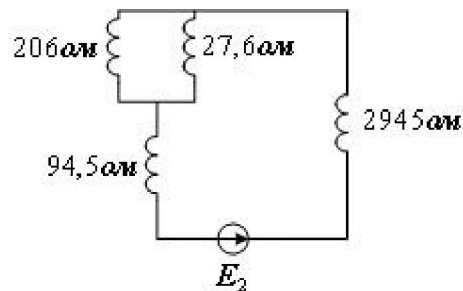


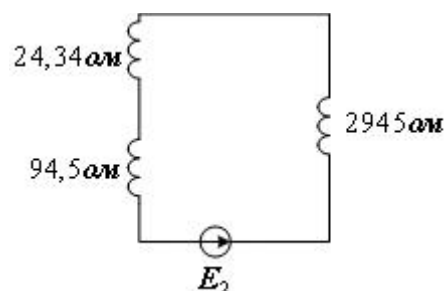
Рис.4. Схема замещения аварийного режима.

Последовательно упрощаем схему:

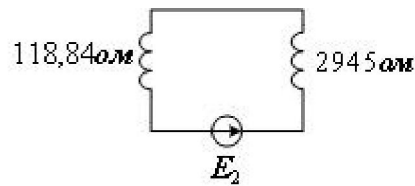


$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{206} + \frac{1}{27,6} = 0,04108625299001;$$

$$Z = 1/0,04108625299001 = 24,339 \text{ Ом}$$

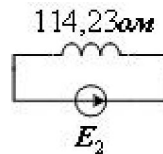


$$Z = 94.5 + 24.34 = 118.84 \text{ ом};$$



$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{2945} + \frac{1}{118.84} = 0.00875;$$

$$Z = 1/0.00875 = 114,23 \text{ ом}$$



Тогда

$$\hat{I}_K = -\frac{E_2}{114.23} = \frac{120}{114.23} = 1.05 \text{ кА}; I'_K = \hat{I}_K \frac{220}{11} = 1.05 * \frac{220}{11} = 21 \text{ кА}; I_K = 21 + 0.8 = 21.8 \text{ кА}.$$

6. Использование взаимных и собственных сопротивлений и проводимостей.

Если известна матрица узловых сопротивлений или проводимостей, то для тока в месте короткого замыкания в соответствии с принципом наложения

$$I_K = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{Z_{iK}} = \sum_{i=1}^n Y_{iK} E_i,$$

где E_1, \dots, E_n - э.д.с. генераторов, Z_{iK}, Y_{iK} - взаимные сопротивления или проводимости между источником э.д.с. и точкой короткого замыкания.

Схему замещения без э.д.с. можно рассматривать как многополюсник, который может быть охарактеризован при помощи матрицы узловых проводимостей

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

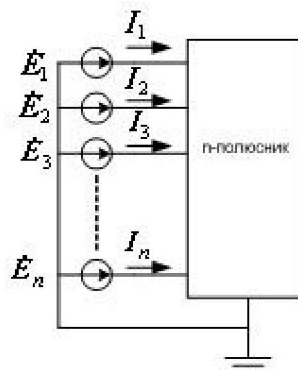


Рис. 5. Схема замещения ЭЭС с многополюсником.

При этом собственные проводимости Y_{ii} представляют собой комплексную величину, определяющие модуль и фазу тока I_i в ветви i от действия э.д.с. E_i , приложенной к этой же ветви, при условии равенства нулю всех остальных э.д.с.

$$I_i = Y_{ii} E_i;$$

а взаимные проводимости Y_{ij} представляют собой комплексную величину, определяющие модуль и фазу тока I_i в ветви i от действия э.д.с. E_j , приложенной к ветви j , при условии равенства нулю всех остальных э.д.с.:

$$I_i = Y_{ij} E_j.$$

Тогда ток в ветви k можно определить по формуле

$$I_k = E_k Y_{kk} - \sum_{i \neq k} Y_{ki} E_i.$$

Если учесть, что в общем случае э.д.с. E_i является комплексной величиной, то есть

$$E_i = |E_i| e^{j\delta_i},$$

а Y_{ij} - есть тоже комплексная величина, представимая в виде

$$Y_{ij} = g_{ij} - jb_{ij} = -jy_{ij} e^{j\alpha_{ij}};$$

$$\alpha_{ij} = \arctg\left(\frac{g_{ij}}{b_{ij}}\right); y_{ij} = \sqrt{g_{ij}^2 + b_{ij}^2}.$$

Тогда выражение для тока может быть переписано в виде

$$I_k = E_k Y_{kk} - \sum_{i \neq k} Y_{ki} E_i = -|E_k| e^{j\delta_k} j y_{kk} e^{j\alpha_{kk}} + \sum_{i \neq k} |E_i| e^{j\delta_i} j y_{ki} e^{j\alpha_{ki}}.$$

При расчетах электроэнергетических систем очень часто в качестве системы координат выбирают прямоугольную систему, у которой одна ось q_k совпадает по направлению с напряжением E_k , а другая ось d_k отстает от E_k на 90° , причем k выбирают из каких-либо соображений или произвольно. В этой системе координат

$$I_k = e^{j\delta_k} (I_{qk} - jI_{dk}) = -|E_k| e^{j\delta_k} j y_{kk} e^{j\alpha_{kk}} + \sum_{i \neq k} |E_i| e^{j\delta_i} j y_{ki} e^{j\alpha_{ki}}.$$

Если поделить обе части уравнения на $e^{j\delta_k}$, а затем умножить их на j , то

$$jI_{qk} + I_{dk} = |E_k| y_{kk} e^{j\alpha_{kk}} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} e^{j(\delta_i + \alpha_{ki} - \delta_k)}.$$

Учитывая формулу Эйлера

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi,$$

получаем

$$\begin{aligned} jI_{qk} + I_{dk} &= |E_k| y_{kk} \cos \alpha_{kk} + j |E_k| y_{kk} \sin \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \cos(\delta_i + \alpha_{ki} - \delta_k) - \\ &- j \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \sin(\delta_i + \alpha_{ki} - \delta_k). \end{aligned}$$

Приравнявая действительные и мнимые части и учитывая четность функции косинус и нечетность функции синус, находим:

$$\begin{aligned} I_{dk} &= |E_k| y_{kk} \cos \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \alpha_{ki}); \\ I_{qk} &= |E_k| y_{kk} \sin \alpha_{kk} + \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \alpha_{ki}). \end{aligned}$$

Обозначая через $\delta_{ki} = \delta_k - \delta_i$ - угол между э.д.с. E_k и E_i , получаем

$$I_{dk} = |E_k| y_{kk} \cos \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \cos(\delta_{ki} - \alpha_{ki});$$

$$I_{qk} = |E_k| y_{kk} \sin \alpha_{kk} + \sum_{i \neq k} |E_i| y_{ki} \sin(\delta_{ki} - \alpha_{ki}).$$

Комплексная мощность (полная мощность), протекающая через точку k схемы замещения, определяется как

$$S_k = E_k I_k = E_k (I_{qk} + j I_{dk}) = E_k I_{qk} + j E_k I_{dk} = P_k + j Q_k,$$

где P_k, Q_k - активная и реактивная мощность соответственно.

Поэтому

$$Q_k = |E_k|^2 y_{kk} \cos \alpha_{kk} - \sum_{i \neq k} |E_k| |E_i| y_{ki} \cos(\delta_{ki} - \alpha_{ki});$$

$$P_k = |E_k|^2 y_{kk} \sin \alpha_{kk} + \sum_{i \neq k} |E_k| |E_i| y_{ki} \sin(\delta_{ki} - \alpha_{ki}).$$

Например для простейшей схемы

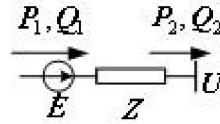


Рис. 6. Простейшая схема ЭЭС.

$$Y_{11} = Y_{12} = 1/Z; y_{11} = y_{12} = 1/z; \alpha = \alpha_{11} = \alpha_{12} = \arcsin\left(\frac{r}{z}\right);$$

поэтому

$$P_1 = \frac{E^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta - \alpha); Q_1 = \frac{E^2}{z} \cos \alpha - \frac{EU}{z} \cos(\delta - \alpha);$$

$$P_2 = -\frac{U^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta + \alpha); Q_2 = -\frac{U^2}{z} \cos \alpha + \frac{EU}{z} \cos(\delta + \alpha);$$

Если $E = 1; U = 0.95; Z = 0.05 + j0.2$, то

$$z = \sqrt{0.05^2 + 0.2^2} = 0.206; \alpha = \arcsin(0.05/0.206) = 14^\circ;$$

поэтому

$$P_1 = \frac{1}{0.206} \sin 14^\circ + \frac{0.95}{0.206} \sin(\delta - 14^\circ) = 1.174 + 4.612 \sin(\delta - 14^\circ);$$

$$Q_1 = \frac{0.95^2}{0.206} \cos 14^\circ - \frac{0.95}{0.206} \cos(\delta - 14^\circ) = 4.251 - 4.612 \cos(\delta - 14^\circ);$$

$$P_2 = -\frac{1}{0.206} \sin 14^\circ + \frac{0.95}{0.206} \sin(\delta + 14^\circ) = -1.174 + 4.612 \sin(\delta + 14^\circ);$$

$$Q_2 = -\frac{0.95^2}{0.206} \cos 14^\circ + \frac{0.95}{0.206} \cos(\delta + 14^\circ) = -4.251 + 4.612 \cos(\delta + 14^\circ);$$

и графики зависимости P_1, P_2, Q_1, Q_2 от угла δ между E и U имеют вид

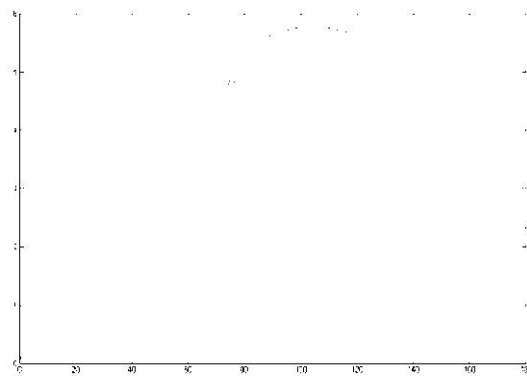


Рис. 7. График зависимости активной составляющей мощности P_1 от угла δ .



Рис. 8. График зависимости реактивной составляющей мощности Q_1 от угла δ .

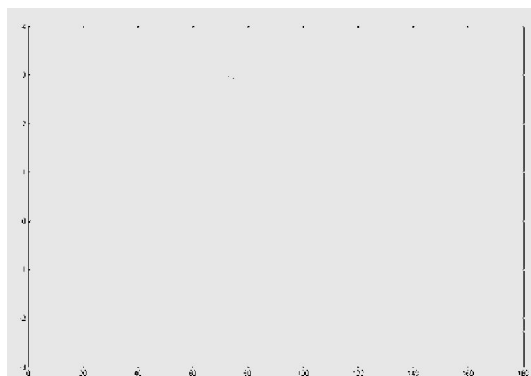


Рис. 9. График зависимости активной составляющей мощности P_2 от угла δ .

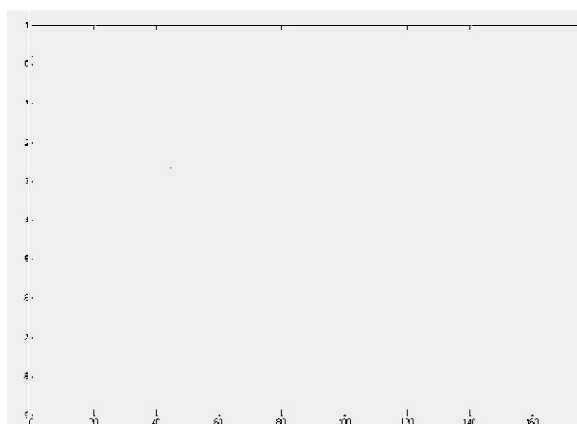


Рис. 10. График зависимости реактивной составляющей мощности Q_2 от угла δ .

7. Переходный процесс при коротком замыкании в трехфазной цепи без трансформатора

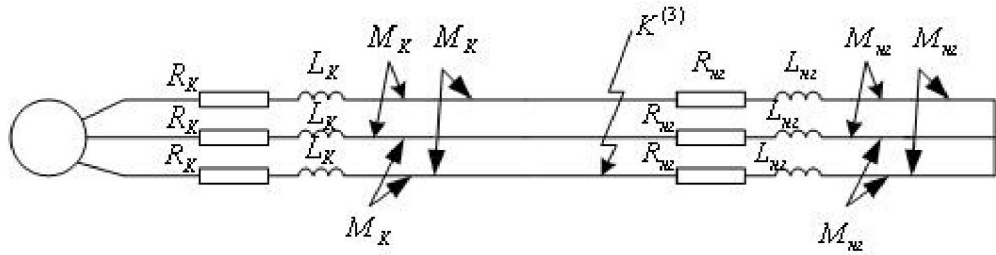


Рис. 1. Исходная электрическая схема трехфазной ЭЭС

При трехфазном коротком замыкании, ввиду симметричности можно рассматривать поведение параметров режима только для одной фазы:

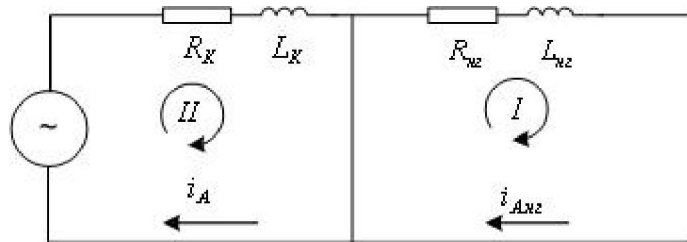


Рис. 1. Исходная электрическая схема ЭЭС (фаза А)

Для контура I имеем:

$$R_{н2} i_{A.н2} + L_{н2} \frac{di_{A.н2}}{dt} + M_{н2} \frac{di_{B.н2}}{dt} + M_{н2} \frac{di_{C.н2}}{dt} = 0;$$

или ввиду симметричности сети

$$i_{A.н2} + i_{B.н2} + i_{C.н2} = 0; i_{A.н2} = -(i_{B.н2} + i_{C.н2});$$

откуда

$$R_{н2} i_{A.н2} + (L_{н2} - M_{н2}) \frac{di_{A.н2}}{dt} = 0;$$

это однородное линейное дифференциальное уравнение 1-го порядка с постоянными коэффициентами, решение которого дает

$$i_{A.н2}(t) = i_{A.н20} \exp\left(-\frac{t}{T_{A.н2}}\right);$$

где $i_{A.н20}$ - начальное значение аperiodической составляющей тока в правом участке цепи; а $T_{A.н2}$ - постоянная времени нагрузки, определяемая по формуле:

$$T_{A.н2} = \frac{L_{н2} - M_{н2}}{R_{н2}}.$$

Для контура II имеем:

$$R_K i_A + L_K \frac{di_A}{dt} + M_K \frac{di_B}{dt} + M_K \frac{di_C}{dt} = U(t);$$

или ввиду симметричности сети

$$i_A + i_B + i_C = 0; i_A = -(i_B + i_C);$$

откуда

$$R_K i_A + (L_K - M_K) \frac{di_A}{dt} = U(t);$$

это неоднородное линейное дифференциальное уравнение 1-го порядка с постоянными коэффициентами, решение которого при

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha);$$

дает

$$i_A(t) = i_{A0} \exp\left(-\frac{t}{T_A}\right) + I_{\Pi m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K);$$

где $I_{\Pi m}$ - максимальное значение периодической составляющей тока в левом участке цепи равное

$$I_{\Pi m} = \frac{U_m}{\sqrt{R_K^2 + (\omega(L_K - M_K))^2}};$$

φ_K - угол сдвига по фазе периодической составляющей тока к.з. по отношению к напряжению равный

$$\varphi_K = \arctg\left(\frac{\omega(L_K - M_K)}{R_K}\right);$$

а T_A - постоянная времени нагрузки, определяемая по формуле:

$$T_A = \frac{L_K - M_K}{R_K}.$$

Начальное значение аperiodической составляющей тока к.з. i_{A0} определяется из условия: ток $i(0)$ в цепи с индуктивностью к моменту короткого замыкания равен току в начальный момент к.з., который в свою очередь равен сумме начальных значений периодической и аperiodической составляющих:

$$i(0) = i_{\Pi 0} + i_{A0};$$

$$I_m \sin(\alpha - \varphi) = I_{\Pi m} \sin(\alpha - \varphi_K) + i_{A0};$$

где

$$I_{\Pi m} = \frac{U_m}{\sqrt{R_K^2 + (\omega(L_K - M_K))^2}};$$

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_{нз})^2 + (\omega((L_K + L_{нз}) - (M_K + M_{нз})))^2}};$$

$$\varphi_K = \arctg\left(\frac{\omega(L_K - M_k)}{R_K}\right);$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega(L_K + L_{нз} - M_K - M_{нз})}{R_K + R_{нз}}\right);$$

откуда

$$i_{A0} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{\Pi m} \sin(\alpha - \varphi_K).$$

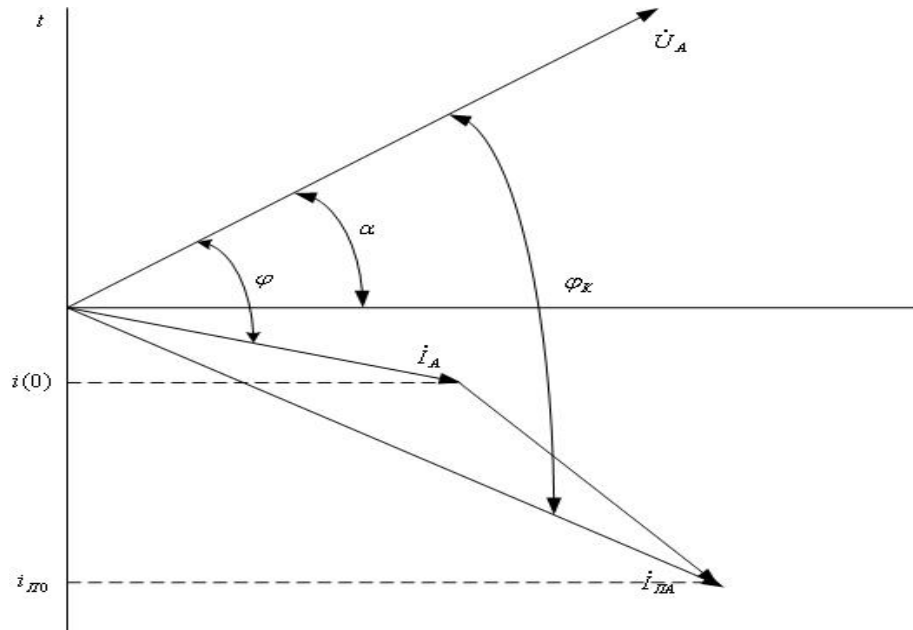


Рис. 3. Векторная диаграмма ЭЭС

Из векторной диаграммы видно, что модуль начального значения аperiodической составляющей тока КЗ равен проекции на ось времени отрезка прямой, соединяющей концы векторов \dot{I}_A и $\dot{I}_{\Pi A}$. Если эта прямая параллельна оси времени то модуль начального значения аperiodической составляющей тока КЗ максимален, если же эта прямая перпендикулярна оси времени, то модуль начального значения аperiodической составляющей тока КЗ равен нулю.

Если в цепи до КЗ преобладала активно-емкостная нагрузка, то ток по фазе будет опережать напряжение и начальное значение аperiodической составляющей току КЗ может превысить амплитуду периодической составляющей тока КЗ. В электроэнергетических системах такой вид нагрузки практически не встречается, а поэтому обычно принимают, что в момент КЗ $i(0) = 0$. Тогда

$$i_{A0} = -i_{\Pi 0} = -I_{\Pi m} \sin(\alpha - \varphi_K);$$

и

$$i(t) = I_{\Pi m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - I_{\Pi m} \sin(\alpha - \varphi_K) \exp(-t/T_a);$$

откуда видно, что при определенных условиях мгновенное значение полного тока может существенно превышать амплитуду периодической составляющей тока КЗ. Максимально возможное мгновенное значение полного тока называют ударным током к.з..

В случае, когда в цепи преобладает индуктивность, то

$$\varphi_K = \arctg\left(\frac{\omega(L_K - M_k)}{R_K}\right) = \arctg(\infty) = \frac{\pi}{2};$$

тогда при $\omega t = \pi$ или, учитывая что $f = 50 \text{ кГц}$, $t = \frac{\pi}{2\pi f} = \frac{1}{100} = 0.01 \text{ сек}$, будет достигаться ударный ток

$$i_{y0} = I_{\Pi m} + I_{\Pi m} \exp(-0.01/T_a) = k_{y0} I_{\Pi m};$$

$$k_{y0} = 1 + \exp(-0.01/T_a).$$

Точное значение ударного коэффициента при любых отношениях X/R может быть получено путем максимизации функции

$$g(t) = \sin(\omega t - \varphi_K) + \sin(\varphi_K) \exp(-\frac{t}{T_a});$$

$$g'(t) = \omega \cos(\omega t - \varphi_K) - \frac{\sin(\varphi_K)}{T_a} \exp(-\frac{t}{T_a}) = 0;$$

Решение трансцендентного уравнения представляет определенные трудности, поэтому часто используют упрощенные формулы:

$$k_{y0} = 1 + \exp(-0.01(0.5 + \varphi_K / \pi) / T_a), \quad \text{при} \quad R/X > 0.2;$$

$$k_{y0} = 1.02 + 0.98 \exp(-3/(\omega T_a)), \quad \text{при} \quad R/X > 0.8;$$

При анализе переходного процесса более сложной схемы исходят из следующих предположений:

1. свободная (апериодическая) составляющая тока КЗ представляет собой:

$$i_a(t) = i_{a01} \exp(-\frac{t}{T_{a1}}) + i_{a02} \exp(-\frac{t}{T_{a2}}) + \dots + i_{a0n} \exp(-\frac{t}{T_{an}});$$

2. ее заменяют на

$$i_a(t) = i_{a0} \exp(-\frac{t}{T_{a.эк}}),$$

3. для определения $T_{a.эк}$ используют следующие подходы:

- с использованием составляющих комплексного результирующего сопротивления расчетной схемы, найденного при промышленной частоте (ударный коэффициент оказывается заниженным);

•

$$T_{a.эк} = \frac{\text{Im} Z_{эк}}{\omega \text{Re} Z_{эк}};$$

- с использованием индуктивных и активных сопротивлений, найденных при поочередном исключении из схемы всех активных, а затем всех реактивных сопротивлений (ударный коэффициент оказывается завышенным) – способ предельных частот :

$$T_{a.эк} = \frac{X_{\Sigma(R=0)}}{R_{\Sigma(X=0)}};$$

- с использованием составляющих комплексного результирующего сопротивления расчетной схемы, найденного при частоте 20 гц (ударный коэффициент близок к истинному):

$$T_{a.эк} = 2.5 \frac{\text{Im } Z_{эк(20)}}{\omega \text{Re } Z_{эк(20)}};$$

8. Переходный процесс в неподвижных магнитносвязанных цепях.

8.1 Основные предпосылки.

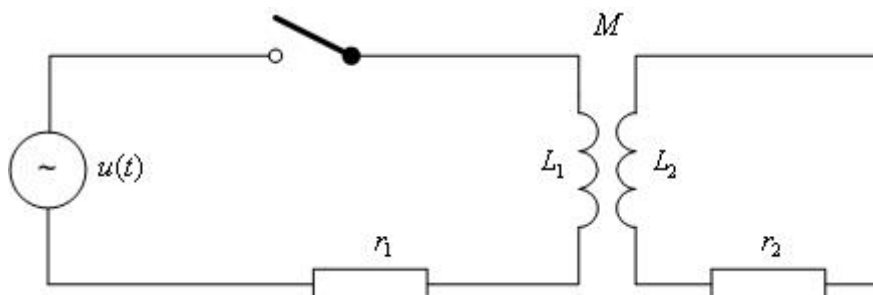
Между токами и напряжениями в рассматриваемой цепи сохраняется линейная зависимость, а поэтому их динамика при переходном процессе может быть описана линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Это предположение является справедливым для силовых трансформаторов и автотрансформаторов при переходном процессе, возникающем при коротких замыканиях или перегрузках.

Для измерительных трансформаторов это предположение не является верным, так как ток в их вторичной обмотке сильно зависит от насыщения магнитопровода, а следовательно его динамика является существенно нелинейной.

Это предположение не является верным для силовых трансформаторов или автотрансформаторов в условиях их включения или при внезапном сбросе их нагрузки, так как в этом случае существенное влияние на переходный процесс оказывает изменение насыщения магнитопровода трансформатора, а это нелинейный процесс.

8.2 Основные соотношения.



Для каждого контура при включении трансформатора с закороченной вторичной обмоткой:

- постоянные времени

$$T_{10} = \frac{L_1}{r_1}; T_{20} = \frac{L_2}{r_2};$$

- коэффициенты рассеяния

$$\sigma_1 = \frac{L_1 - M}{L_1}; \sigma_2 = \frac{L_2 - M}{L_2}.$$

Коэффициент магнитной связи между контурами:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}};$$

общий коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - k^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_1 \sigma_2 \approx \sigma_1 + \sigma_2.$$

При включении выключателя в контурах первичной и вторичной обмотки будут протекать токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$, удовлетворяющие уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \\ 0 &= i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\}$$

Данная система уравнений может быть записана в операторной форме (при условии $i_1(0) = 0$ и $i_2(0) = 0$)

$$\left. \begin{aligned} u(p) &= I_1(p)r_1 + L_1 p I_1(p) + M p I_2(p); \\ 0 &= I_2(p)r_2 + L_2 p I_2(p) + M p I_1(p). \end{aligned} \right\}$$

Из второго уравнения

$$I_2(p) = -\frac{M p}{r_2 + L_2 p} I_1(p);$$

подставляя выражение $I_2(p)$ в первое уравнение, получаем

$$\begin{aligned} u(p) &= I_1(p)r_1 + L_1 p I_1(p) - M p \frac{M p}{r_2 + p L_2} I_1(p) = \\ &= (r_1 + p L_1 - \frac{M^2 p^2}{r_2 + p L_2}) I_1(p) = z_1(p) I_1(p); \end{aligned}$$

откуда

$$I_1(p) = \frac{u(p)}{z_1(p)};$$

где

$$z_1(p) = r_1 + p(L_1 - \frac{p M^2}{r_2 + p L_2}).$$

Последнее выражение можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned}
z_1(p) &= r_1 + p(L_1 - \frac{pM^2}{r_2 + pL_2}) = r_1 + p(L_1 - \frac{pM^2/r_2}{1 + pL_2/r_2}) = r_1 + p(L_1 - \frac{pM^2/r_2}{1 + pT_{20}}) = \\
&= r_1 + pL_1(1 - \frac{pM^2L_2/(r_2L_1L_2)}{1 + pT_{20}}) = r_1 + pL_1(1 - \frac{pT_{20}M^2}{L_1L_2}) = r_1 + pL_1(1 - \frac{pT_{20}k^2}{1 + pT_{20}}) = \\
&= r_1 + pL_1(\frac{1 + pT_{20} - pT_{20}k^2}{1 + pT_{20}}) = r_1 + pL_1(\frac{1 + pT_{20}(1 - k^2)}{1 + pT_{20}}) = r_1 + pL_1(\frac{1 + pT_{20}\sigma}{1 + pT_{20}}) = \\
&= \frac{r_1 + r_1pT_{20} + pL_1 + p^2L_1T_{20}\sigma}{1 + pT_{20}} = \frac{1 + pT_{20} + p(L_1/r_1) + p^2(L_1/r_1)T_{20}\sigma}{1 + pT_{20}}r_1 = \\
&= \frac{1 + pT_{20} + pT_{10} + p^2T_{10}T_{20}\sigma}{1 + pT_{20}}r_1 = \frac{1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2T_{10}T_{20}\sigma}{1 + pT_{20}}r_1.
\end{aligned}$$

Из характеристического уравнения $z_1(p) = 0$, имеем:

$$\frac{1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2T_{10}T_{20}\sigma}{1 + pT_{20}}r_1 = 0;$$

или

$$1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2T_{10}T_{20}\sigma = 0,$$

откуда

$$p_{1,2} = \frac{-(T_{10} + T_{20}) \pm \sqrt{(T_{10} + T_{20})^2 - 4\sigma T_{10}T_{20}}}{2\sigma T_{10}T_{20}} = -\frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10}T_{20}}(1 \pm q);$$

где

$$q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}}. \quad (*)$$

Утверждение 1. Корни уравнения являются действительными и отрицательными.

Доказательство. Для того чтобы корни были действительными достаточно, чтобы подкоренное выражение в последнем выражении было неотрицательным, то есть

$$1 - \frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2} \geq 0;$$

или

$$\begin{aligned}
&(T_{10} + T_{20})^2 - 4\sigma T_{10}T_{20} \geq 0; \\
&T_{10}^2 + T_{20}^2 + 2T_{10}T_{20} - 4\sigma T_{10}T_{20} = T_{10}^2 + T_{20}^2 - 2T_{10}T_{20} + 4T_{10}T_{20} - 4\sigma T_{10}T_{20} = \\
&= (T_{10} - T_{20})^2 + 4T_{10}T_{20}(1 - \sigma) = (T_{10} - T_{20})^2 + 4T_{10}T_{20}k^2 = \\
&= (T_{10} - T_{20})^2 + 4T_{10}T_{20}\frac{M^2}{L_1L_2} > 0,
\end{aligned}$$

так как входящие в последнее выражение параметры являются положительными величинами.

Отрицательность корней следует из того факта, что для положительности одного из корней требуется справедливость соотношения $q > 1$, что невозможно ввиду выражения (*).

Утверждение доказано.

Утверждение 2. Свободный ток каждого из контуров представляет собой сумму двух свободных токов, затухающих с постоянными времени T' и T'' , соответственно. Эти постоянные времени определяются из соотношений

$$T' = \frac{1+q}{2}(T_{10} + T_{20});$$

$$T'' = \frac{1-q}{2}(T_{10} + T_{20}).$$

Доказательство. Из утверждения 1 следует, что корни характеристического уравнения, характеризующего переходный процесс при включении трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой, являются действительными и отрицательными. Тогда из качественной теории дифференциальных уравнений следует, что переходный процесс будет представлять собой суперпозицию двух аperiодических затухающих процессов с постоянными времени:

$$\begin{aligned} T' &= -\frac{1}{p_1} = \frac{2\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})(1-q)} = \frac{2}{(1-q)} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \\ &= \frac{2(1+q)}{(1-q)(1+q)} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{2(1+q)}{(1-q^2)} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})}; \end{aligned}$$

так как

$$1 - q^2 = 1 - \left(\sqrt{1 - \frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}} \right)^2 = 1 - 1 + \frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2} = \frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2};$$

то

$$T' = \frac{2(1+q)}{(1-q^2)} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{2(1+q)}{\frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{1+q}{2}(T_{10} + T_{20});$$

Аналогично

$$\begin{aligned} T'' &= -\frac{1}{p_2} = \frac{2\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})(1+q)} = \frac{2}{(1+q)} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \\ &= \frac{2(1-q)}{(1-q)(1+q)} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{2(1-q)}{(1-q^2)} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \\ &= \frac{2(1-q)}{\frac{4\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}} \frac{\sigma T_{10}T_{20}}{(T_{10} + T_{20})} = \frac{1-q}{2}(T_{10} + T_{20}). \end{aligned}$$

Утверждение доказано.

Из утверждения 2 непосредственно следует

Следствие 1. Для постоянных времени T' и T'' справедливо соотношение:

$$\frac{T'}{T''} = \frac{1+q}{1-q}.$$

Из последнего выражения следует следующие выводы:

1. T' всегда больше T'' ;
2. Различие между T' и T'' возрастает по мере уменьшения рассеяния;
3. При отсутствии рассеяния $T' = (T_{10} + T_{20}); T'' = 0$.

Если источник напряжения вырабатывает постоянный ток

$$u(t) = U = const,$$

то изображение напряжения

$$U(p) = \frac{U}{p};$$

и для изображений токов в первом и втором контурах, имеем:

$$\begin{aligned} I_1(p) &= \frac{u(p)}{z_1(p)} = \frac{U}{pz_1(p)} = \frac{U}{p \frac{1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma}{1 + pT_{20}} r_1} = \\ &= \frac{U}{r_1} \cdot \frac{(1 + pT_{20})}{p(1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma)}, \\ I_2(p) &= -\frac{Mp}{r_2 + L_2 p} I_1(p) = -\frac{U}{r_1} \cdot \frac{Mp}{(r_2 + L_2 p)} \cdot \frac{(1 + pT_{20})}{p(1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma)} = \\ &= -\frac{U}{r_1 r_2} \cdot \frac{Mp}{(1 + T_{20} p)} \cdot \frac{(1 + pT_{20})}{p(1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma)} = -\frac{MU}{r_1 r_2} \cdot \frac{1}{(1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma)}. \end{aligned}$$

При нахождении оригинала $f(t)$ по изображению $F(p)$ большую роль играет **теорема о разложении**:

Если

$$X(p) = \frac{G(p)}{H(p)};$$

и

$$G(p) = \sum_{i=0}^m A_i p^i; H(p) = \sum_{i=0}^n B_i p^i;$$

причем:

- $n > m$;
- корни $G(p)$ не совпадают с корнями $H(p)$;
- $H(p)$ не имеет кратных корней;

тогда

$$X(p) = \frac{G(p)}{H(p)} = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{p - p_i};$$

и

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \frac{G(p_i)}{H'(p_i)} e^{p_i t};$$

где p_i - корни $H(p) = 0$.

Следствие 1. Если $p_1 = 0$, то

$$x(t) = \frac{G(0)}{H'(0)} + \sum_{i=2}^n \frac{G(p_i)}{H'(p_i)} e^{p_i t}.$$

Найдем оригиналы для токов $I_1(p), I_2(p)$. Имеем

$$I_2(p) = -\frac{MU}{r_1 r_2} \cdot \frac{1}{(1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma)} = -\frac{MU}{r_1 r_2} \frac{G_2(p)}{H_2(p)},$$

$$G_2(p) = 1; H_2(p) = 1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma;$$

$$H'_2(p) = (T_{10} + T_{20}) + 2p T_{10} T_{20} \sigma;$$

$$H'_2(p_1) = (T_{10} + T_{20}) - 2T_{10} T_{20} \sigma \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}} (1 + q) = (T_{10} + T_{20}) - (T_{10} + T_{20})(1 + q) = - (T_{10} + T_{20})q;$$

$$H'_2(p_1) = (T_{10} + T_{20}) - 2T_{10} T_{20} \sigma \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}} (1 - q) = (T_{10} + T_{20})q;$$

откуда

$$i_2(t) = -\frac{MU}{r_1 r_2} [-(T_{10} + T_{20})q \cdot e^{p_2 t} + (T_{10} + T_{20})q \cdot e^{p_1 t}] = -\frac{MU}{r_1 r_2} (T_{10} + T_{20})q (e^{-t/T'} - e^{-t/T''}).$$

После несложных преобразований

$$i_2(t) = -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} (e^{-t/T'} - e^{-t/T''}) = i'_2(t) + i''_2(t);$$

При $t = 0$ ток в контуре 2 отсутствует, поэтому:

$$i_2(0) = i'_2(0) + i''_2(0) = 0;$$

$$i'_2(0) = -i''_2(0).$$

Другими словами в начальный момент переходного процесса свободные токи в контуре 2 совпадают по абсолютной величине и различаются по знаку.

При $t \rightarrow \infty$, $i_2(t) \rightarrow 0$. Однако ток $i_2(t)$ имеет локальный максимум в момент t_m , который определяется как

$$\begin{aligned} \frac{di_2}{dt} &= \frac{d}{dt} \left(-\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} (e^{-t/T'} - e^{-t/T''}) \right) = \\ &= -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} \left(-\frac{1}{T'} e^{-t/T'} + \frac{1}{T''} e^{-t/T''} \right) = 0. \end{aligned}$$

Откуда

$$\left(-\frac{1}{T'} e^{-t/T'} + \frac{1}{T''} e^{-t/T''} \right) = 0; \frac{1}{T'} e^{-t/T'} = \frac{1}{T''} e^{-t/T''};$$

$$\frac{e^{-t/T'}}{e^{-t/T''}} = e^{t/T'' - t/T'} = e^{t(\frac{1}{T''} - \frac{1}{T'})} = e^{t \frac{T' - T''}{T' T''}} = \frac{T'}{T''};$$

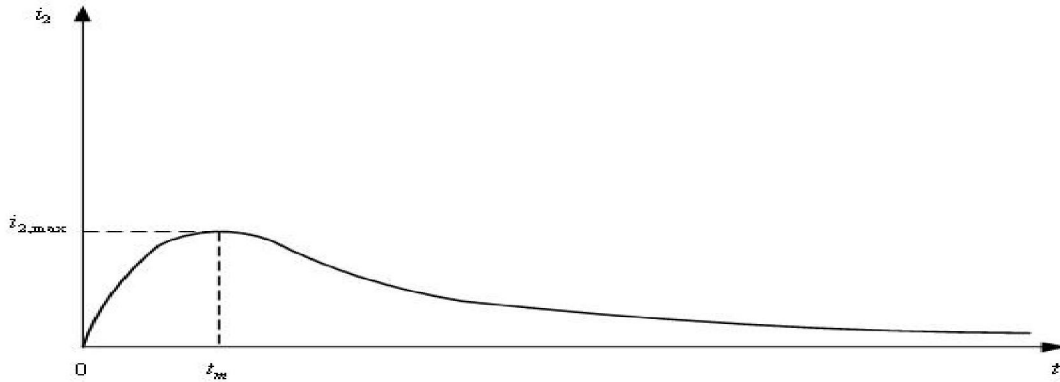
$$t \frac{T' - T''}{T' T''} = \ln \frac{T'}{T''};$$

$$t_m = \frac{T' T''}{T' - T''} \ln \frac{T'}{T''}.$$

при этом максимальное значение тока равно

$$\begin{aligned}
i_2(t) &= -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} (e^{-t_m / T'} - e^{-t_m / T''}) = -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} (e^{-\frac{T'' T''}{T' - T''} \ln \frac{T'}{T''} / T'} - e^{-\frac{T' T''}{T' - T''} \ln \frac{T'}{T''} / T''}) = \\
&= -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} (e^{-\frac{T''}{T' - T''} \ln \frac{T'}{T''}} - e^{-\frac{T'}{T' - T''} \ln \frac{T'}{T''}}) = -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} \left(\left(\frac{T'}{T''} \right)^{-\frac{T''}{T' - T''}} - \left(\frac{T'}{T''} \right)^{-\frac{T'}{T' - T''}} \right) = \\
&= -\frac{MU}{L_1 L_2} \frac{T_{10} T_{20}}{T' - T''} \left(\frac{T''}{T'} \right)^{-\frac{T''}{T' - T''}} \left(1 - \frac{T''}{T'} \right).
\end{aligned}$$

На рисунке представлена динамика тока $i_2(t)$



Для тока $i_1(t)$:

$$\begin{aligned}
I_1(p) &= \frac{U}{r_1} \cdot \frac{(1 + pT_{20})}{p(1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma)} = \frac{U}{r_1} \frac{G(p)}{H(p)}; \\
G(p) &= 1 + pT_{20}; \\
H(p) &= p(1 + p(T_{20} + T_{10}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma); \\
H'(p) &= 1 + 2p(T_{20} + T_{10}) + 3p^2 T_{10} T_{20} \sigma; \\
p_1 &= 0; p_2 = -\frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}}(1 - q); p_3 = -\frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}}(1 + q); \\
G(p_1) &= 1; G(p_2) = 1 - \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10}}(1 - q); G(p_3) = 1 - \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10}}(1 + q);
\end{aligned}$$

$$H'(p_1) = 1;$$

$$\begin{aligned} H'(p_2) &= 1 - 2 \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}} (1-q)(T_{20} + T_{10}) + 3 \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{(2\sigma T_{10} T_{20})^2} (1-q)^2 T_{10} T_{20} \sigma = \\ &= 1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{\sigma T_{10} T_{20}} (1-q) + 3 \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{4\sigma T_{10} T_{20}} (1-q)^2 = \\ &= 1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{\sigma T_{10} T_{20}} (1-q) \left(1 - 3 \frac{(1-q)}{4}\right) = 1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{4\sigma T_{10} T_{20}} (1-q)(1+3q); \\ H'(p_3) &= 1 - 2 \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}} (1+q)(T_{20} + T_{10}) + 3 \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{(2\sigma T_{10} T_{20})^2} (1+q)^2 T_{10} T_{20} \sigma = \\ &= 1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{\sigma T_{10} T_{20}} (1+q) + 3 \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{4\sigma T_{10} T_{20}} (1+q)^2 = \\ &= 1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{\sigma T_{10} T_{20}} (1+q) \left(1 - 3 \frac{(1+q)}{4}\right) = 1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{4\sigma T_{10} T_{20}} (1+q)(1-3q); \end{aligned}$$

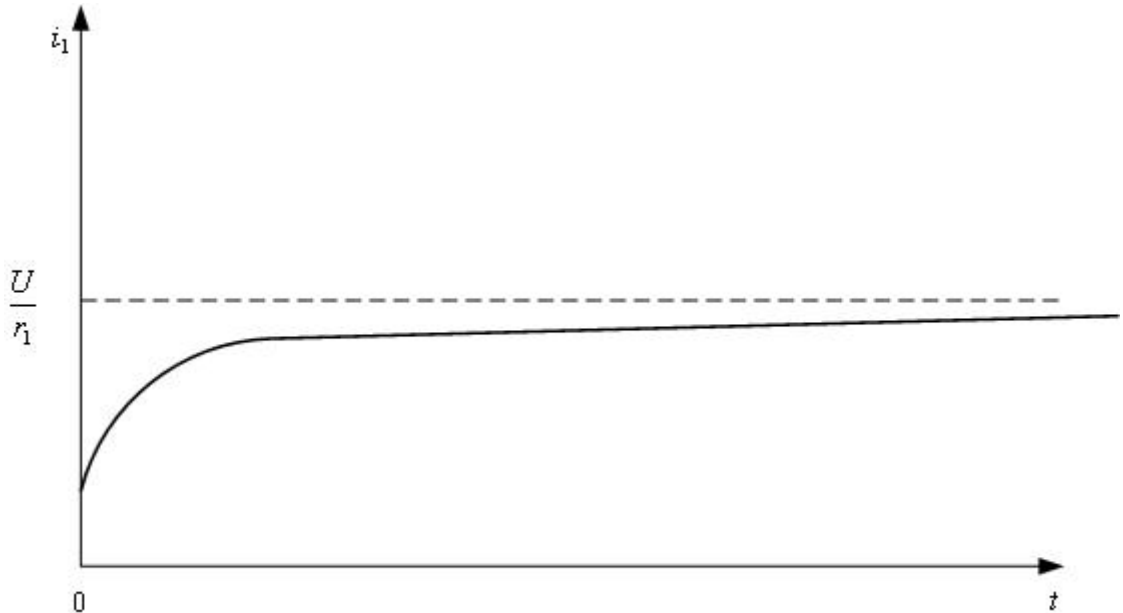
Откуда получаем:

$$i_1(t) = \frac{U}{r_1} \left(1 + \frac{1 - \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10}} (1-q)}{1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{4\sigma T_{10} T_{20}} (1-q)(1+3q)} e^{p_1 t} + \frac{1 - \frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10}} (1+q)}{1 - \frac{(T_{10} + T_{20})^2}{4\sigma T_{10} T_{20}} (1+q)(1-3q)} e^{p_2 t} \right).$$

Применяя несложные, но достаточно длинные преобразования окончательно получаем:

$$i_1(t) = \frac{U}{r_1} - \frac{U}{r_1} \frac{(T_{10} - T'')}{(T' - T'')} e^{-\frac{t}{T'}} - \frac{U}{r_1} \frac{(T_{20} - T'')}{(T' - T'')} e^{-\frac{t}{T''}}.$$

На рисунке представлена динамика тока $i_1(t)$



8.3 Влияние рассеяния на свободные токи

Изучим каким образом магнитная связь оказывает влияние на свободные токи. Для этого запишем теорему Виета для корней p_1, p_2 :

$$p_1 + p_2 = -\left(\frac{1}{T'} + \frac{1}{T''}\right) = -\frac{T_{10} + T_{20}}{\sigma T_{10} T_{20}};$$

$$p_1 p_2 = \left(\frac{1}{T'} \cdot \frac{1}{T''}\right) = \frac{1}{\sigma T_{10} T_{20}};$$

откуда последовательно получаем

$$\sigma = \frac{T' T''}{T_{10} T_{20}}; \quad \frac{T' + T''}{T' T''} = \frac{T_{10} + T_{20}}{\sigma T_{10} T_{20}} = \frac{T_{10} + T_{20}}{\frac{T' T''}{T_{10} T_{20}} T_{10} T_{20}} = \frac{T_{10} + T_{20}}{T' T''};$$

$$T' + T'' = T_{10} + T_{20} = \frac{L_1}{r_1} + \frac{L_2}{r_2}.$$

Таким образом магнитная связь между обмотками и обусловленное ей рассеяние оказывают только влияние на порядок значений постоянных времени T' и T'' , не оказывая никакого влияния на их суммарное значение.

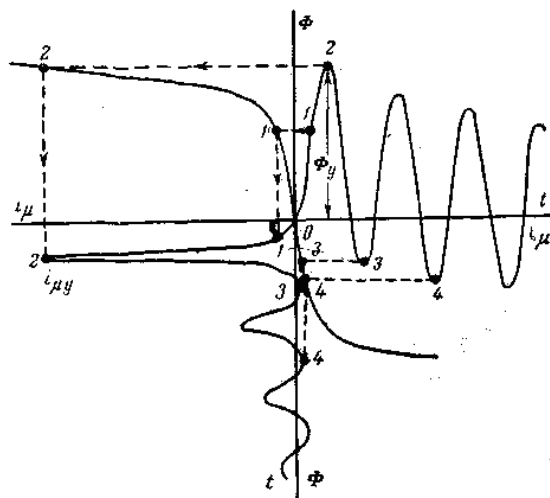
9. Включение холостого трансформатора

Рассмотрим переходный процесс, возникающий при включении холостого трансформатора на синусоидальное напряжение постоянной амплитуды и неизменной частоты. По существу это равноценно включению дросселя с магнитным сердечником, в котором проявляется насыщение.

При замыкании предварительно ненагруженной цепи с L и r наибольшая величина тока возникает при условии, когда подведенное напряжение в момент замыкания проходит через нуль. Из этого условия как наиболее неблагоприятного исходим и в данном случае. Если пренебречь малым активным сопротивлением обмотки трансформатора, то условие равновесия напряжения после включения трансформатора будет:

$$U_m \sin \omega t = w \frac{d\Phi}{dt}$$

где w — число витков подключенной обмотки трансформатора.



Интегрирование полученного выражения с учетом того, что начальный магнитный поток $\Phi_0 = 0$, приводит к очевидной закономерности изменения магнитного потока:

$$\Phi = \Phi_m (1 - \cos \omega t)$$

При учете активного сопротивления обмотки постоянная составляющая в последнем выражении будет затухать с постоянной времени $T_a = \frac{L}{r}$ и это выражение примет вид:

$$\Phi = \Phi_m \left(e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos \omega t \right)$$

Связь между потоком Φ и током намагничивания i_μ выражается магнитной характеристикой. Используя последнюю, можно графическим построением найти кривую изменения тока намагничивания i_μ в переходном процессе включения трансформатора. Как видно, благодаря насыщению магнитной системы бросок тока намагничивания при включении достигает очень больших величин, которые могут превышать даже номинальный ток трансформатора, что при отсутствии специальных средств может вызвать отключение трансформатора.

В действительности трансформатор обладает остаточным магнетизмом, и это обстоятельство приводит к еще большим броскам тока намагничивания при включении, холостого трансформатора.

Кривая изменения $i_\mu = f'(t)$ в своей начальной стадии сильно отличается от синусоиды, что обусловлено нелинейной частью характеристики намагничивания.

10. Уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины

10.1 Исходные уравнения

Принципиальная схема синхронной машины, ротор которой имеет явно выраженные полюсы, представлена на рис.1, где стрелками указаны принятые положительные направления токов и напряжений в обмотках статора и ротора.

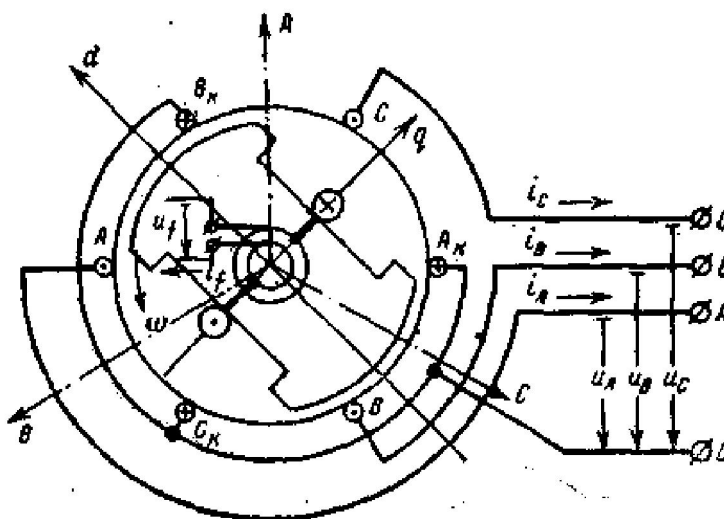


Рис. 1. Принципиальная схема явнополосной синхронной машины.

Соответственно этому, когда ток в обмотке статора или ротора положителен, создаваемый им магнитный поток также считается положительным. Положительные направления магнитных осей фазных обмоток статора (A, B, C) и магнитных осей ротора (d, q) на рис. 1 также отмечены стрелками.

Дифференциальные уравнения равновесия э. д. с. и падений напряжений в каждой из обмоток будут:

$$\begin{aligned} u_{\eta} &= -\frac{d\Psi_{\eta}}{dt} - r i_{\eta}; (\eta = A, B, C) \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f. \end{aligned} \quad (1)$$

где r и r_f — активные сопротивления соответственно контуров каждой фазы и цепи возбуждения; Ψ_{η} и Ψ_f — результирующие потокосцепления соответствующих обмоток (включая их потокосцепления рассеяния).

Раскроем выражения для потокосцеплений, которые при принятых допущениях представляют собой линейные зависимости от тока данного контура и токов магнитно связанных с ним других контуров. Коэффициентами пропорциональности при этом будут индуктивность L рассматриваемого контура и его взаимоиндуктивности M с другими контурами. Введя у L и M индексы соответствующих обмоток, можно написать:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f; \\ \Psi_B &= L_B i_B + M_{BA} i_A + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f; \\ \Psi_C &= L_C i_C + M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + M_{Cf} i_f; \\ \Psi_f &= L_f i_f + M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C. \end{aligned} \quad (2)$$

Число различных значений M в действительности в 2 раза меньше, так как по принципу взаимности $M_{AB} = M_{BA}$; $M_{Bf} = M_{fB}$, и т. д.

Если бы все L и M оставались неизменными, то система (1) состояла бы из линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и решение ее не представляло бы принципиальных трудностей. Однако во вращающейся машине это не имеет места. Только индуктивность L_f можно считать неизменной. Все же остальные L и M зависят от положения ротора относительно обмоток статора и, следовательно, являются функциями времени.

Таким образом, коэффициенты уравнений системы (1) являются переменными, что резко усложняет решение этой системы.

Обратимся к выяснению закономерностей изменения индуктивностей обмоток синхронной машины.

10.2 Индуктивности обмоток синхронной машины

Условимся фиксировать положение ротора углом $\gamma = f(t)$ между магнитной осью фазы A и продольной осью ротора d (рис. 2).

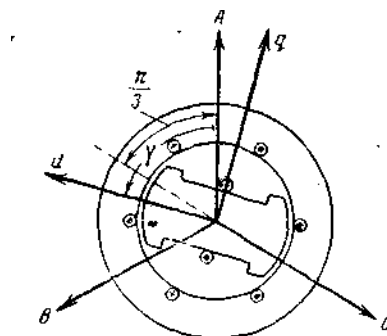


Рис. 2. К определению пространственного положения ротора.

Синусоидальность наводимых в статоре э. д. с. холостого хода уже указывает на закон изменения взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и каждой фазной обмоткой статора. Очевидно, он выражается синусоидальной функцией с периодом 2π (для двухполюсной машины это соответствует одному обороту ротора), максимум которой M_d , наступает при совпадении магнитных осей этих обмоток. Так, например, для фазы A имеем:

$$M_{Af} = M_{fA} = M_d \cos \gamma \quad (3)$$

Изменение индуктивностей фазных обмоток и взаимных индуктивностей между этими обмотками обусловлено вращением явнополюсного ротора, поскольку при этом непрерывно меняется сопротивление магнитным потокам, которые определяют данные индуктивности. Изменение магнитных потоков происходит гармонически с периодом π , т. е. в 2 раза меньшим, так как при повороте ротора на π повторяется предыдущий цикл изменения магнитного сопротивления.

В большинстве практических расчетов ограничиваются приближенными выражениями для этих индуктивностей. Так, индуктивность обмотки фазы A определяют следующим образом:

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma \quad (4)$$

и взаимную индуктивность между обмотками, например, фаз A и B

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2\left(\gamma - \frac{\pi}{3}\right) \quad (5)$$

где l_0 и m_0 — постоянные составляющие соответствующих индуктивностей; l_2 и m_2 — амплитуды вторых гармоник тех же индуктивностей.

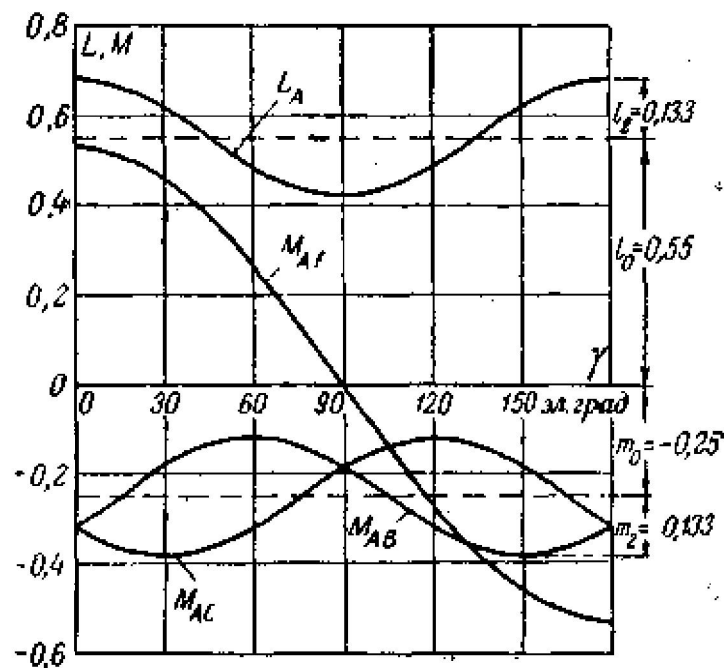


Рис.3. Кривые изменения индуктивностей машины в зависимости от положения ротора.

Выражения (3) — (5) легко распространить на другие фазы, для чего согласно рис. 2 в качестве аргумента в них нужно ввести соответствующие значения угла.

Коэффициенты в (4) и (5) можно выразить через индуктивности, которыми обычно характеризуется синхронная машина

$$l_0 = \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0) \quad (6)$$

$$l_2 = m_2 = \frac{1}{3}(L_d - L_q) \quad (7)$$

$$m_0 = \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right) \quad (8)$$

Напомним, что в Системе Относительных единиц индуктивности и индуктивные сопротивления численно одинаковы, т.е. $L = x$.

Для иллюстрации на рис.3 приведены кривые изменения индуктивностей синхронной машины в зависимости от положений ротора. Они построены для машины, у которой $x_d = 1.0$; $x_q = 0.6$ и $x_0 = 0.05$.

{Систему дифференциальных уравнений (1) с коэффициентами, выражения для которых здесь получены, решить невозможно. Поэтому приходится искать иной путь для ее решения. С этой целью перейдем к выяснению некоторых дополнительных представлений, которыми может характеризоваться трехфазная система.

10.3 Обобщенный вектор трехфазной системы

Вместо обычного представления каких-либо величин трехфазной системы симметричной звездой векторов, проекции которых на ось времени t дают мгновенные значения этих величин в фазах (рис. 4,а), те же мгновенные значения можно получить, проектируя единый вектор на три оси времени, каждая из которых совпадает с магнитной осью соответствующей фазы (рис. 4.б).

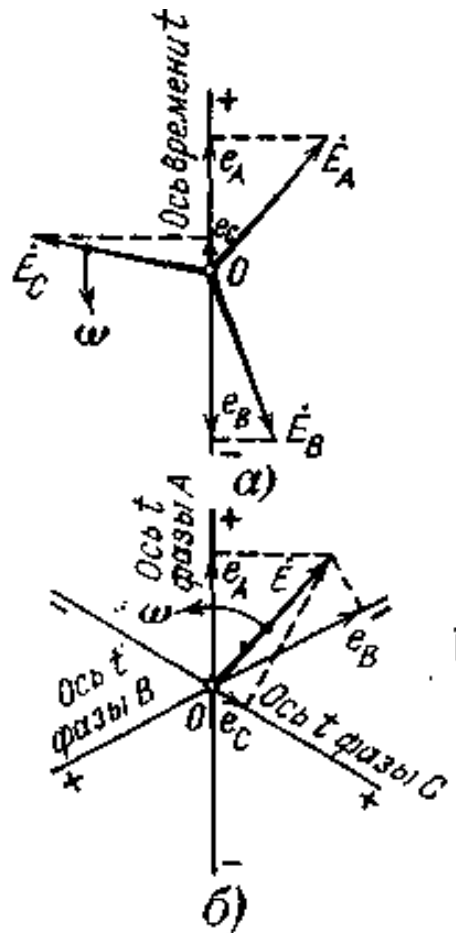


Рис. 4. Определение мгновенных значений э. д. с. в трех фазной системе: а – через векторы э.д.с. каждой фазы; б – через обобщенный вектор э.д.с.

Такой вектор называется обобщенным (или изображающим) вектором трехфазной системы. При его вращении в ту же сторону, что и системы трех векторов, чередование осей времени фаз нужно изменить на противоположное. При симметричном установившемся режиме конец обобщенного вектора описывает с постоянной скоростью окружность, а его величина равна амплитуде рассматриваемой величины.

Представление об обобщенном векторе можно в значительной мере расширить. Таким вектором, оказывается, можно характеризовать любые фазные переменные величины f_A, f_B, f_C изменяющиеся в общем случае по произвольному закону, лишь бы соблюдалось единственное условие, а именно:

$$f_A + f_B + f_C = 0. \quad (9)$$

Величина искомого обобщенного вектора \bar{f} может быть определена, исходя из следующих очевидных равенств (рис.5):

$$\begin{aligned} f_A &= f \cos \alpha; \\ f_B &= f \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right); \\ f_C &= f \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

для чего достаточно возвести их в квадрат и просуммировать:

$$f_A^2 + f_B^2 + f_C^2 = \frac{3}{2} f^2,$$

откуда

$$f = \sqrt{\frac{2}{3} (f_A^2 + f_B^2 + f_C^2)} \quad (11)$$

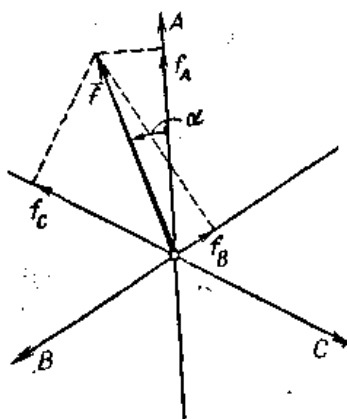


Рис.5. Обобщенный вектор трехфазной системы.

Исходное положение этого вектора относительно любой из фазных осей определяется соответствующим равенством из (10). Так угол сдвига относительно оси фазы A (рис. 5)

$$\alpha = \arccos \frac{f_A}{f} \quad (12)$$

Конец такого вектора описывает в общем случае сложную кривую, и при возникновении качаний синхронной машины скорость вращения его относительно полюса вращения переменна.

Возможность представления векторов обобщенным вектором трехфазной системы существенно упрощает выражение связи между статором и ротором, что в свою очередь позволяет в дифференциальных уравнениях переходного процесса освободиться от переменных коэффициентов. При этом заметим, что ограничение, выраженное равенством (9), как будет показано далее, не влияет на общность решения.

10.4 Замена переменных

При решении сложных математических задач часто используют известный способ замены переменных некоторыми другими, обычно связанными с ними линейными зависимостями.

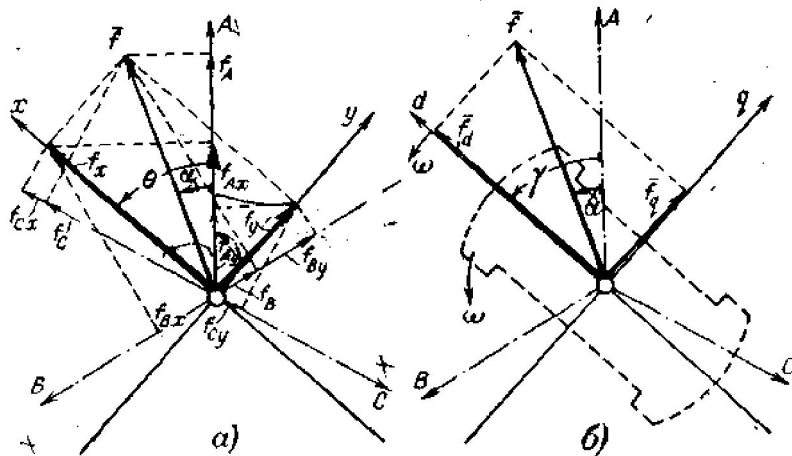


Рис. 6. Преобразование координат.

a — неподвижные в пространстве координаты x, y ; b — координаты d, q , жестко связанные с ротором.

При удачном выборе такой замены решение в новых переменных может быть выполнено проще. Равным образом и обратный переход к исходным переменным не встречает трудностей. Очевидно, именно в этом направлении следует искать более простое решение системы уравнений (1).

На рис. 5 обобщенный вектор \bar{f} определен в трехосной системе координат (фазные оси времени). Тот же вектор можно выразить также в произвольной двухосной системе координат. В качестве последней удобнее всего выбрать декартовы ортогональные координаты, например x, y , как показано на рис. 6, а. Такое преобразование координат с точки зрения математических операций соответствует замене переменных.

Новые переменные, т. е. проекции \bar{f} на оси x, y будут:

$$\begin{aligned} f_x &= f \cos(\theta - \alpha); \\ f_y &= f \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (13)$$

и их связь с фазными переменными определится равенствами:

$$\begin{aligned} f_A &= f_x \cos \theta + f_y \sin \theta; \\ f_B &= f_x \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_y \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right); \\ f_C &= f_x \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + f_y \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Определитель этой системы не равен нулю и вне зависимости от θ остается постоянным и равным — $3/2$, что указывает на однозначность выражения одних переменных через другие.

Решив (14) относительно новых переменных, найдем:

$$f_x = \frac{2}{3} \left[f_A \cos \theta + f_B \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_C \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \quad (15)$$

$$f_y = \frac{2}{3} \left[f_A \sin \theta + f_B \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_C \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \quad (16)$$

До сих пор предполагалось, что трехфазная система удовлетворяет условию (9). Естественно возникает вопрос: возможны ли подобные преобразования, когда это условие не соблюдено?

Если сумма фазных переменных не равна нулю, то ее целесообразно выразить через третье, "новое" переменное f_0 следующим образом:

$$f_A + f_B + f_C = 3f_0,$$

откуда

$$f_0 = \frac{1}{3}(f_A + f_B + f_C). \quad (17)$$

Назовем f_0 нулевой составляющей, которая в известной мере тождественна составляющей нулевой последовательности метода симметричных составляющих, за исключением того, что она представляет мгновенное (а не векторное) значение, определяемое по мгновенным фазным значениям данной физической величины, изменение которой во времени может происходить по любому закону. Поскольку нулевая составляющая f_0 во всех фазах одинакова, естественно, она не влияет ни на обобщенный вектор \vec{f} , ни на его составляющие f_x и f_y независимо от того, как ориентированы оси x, y относительно фазных осей. В этом легко убедиться, подставив в (15) и (16) вместо f_A, f_B, f_C соответственно $(f_A - f_0), (f_B - f_0), (f_C - f_0)$, которые удовлетворяют условию (9).

Таким образом, три переменные в координатах A, B, C можно однозначно заменить другими тремя переменными в координатах $x, y, 0$. При этом в общем случае при переходе к фазным переменным необходимо в каждом из равенств (14) прибавить нулевую составляющую, т. е.

$$f_A = f_x \cos \theta + f_y \sin \theta + f_0;$$

$$f_B = f_x \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_y \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_0; \quad (18)$$

$$f_C = f_x \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + f_y \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + f_0.$$

Переход от трехосной к двухосной системе координат по существу соответствует тому, что трехфазная машина заменена эквивалентной двухфазной. Угол θ (рис. 6,а) определяет пространственное положение магнитных осей обеих обмоток такой машины. В частности, при $\theta = 0$ получается система координат, которую принято называть системой α, β и применение которой вносит известные упрощения при решении некоторых задач.

Хотя применение новой, но все же неподвижной системы координат и сокращает число коэффициентов в уравнениях вида (1), тем не менее главные трудности решения при этом все еще остаются, так как указанные уравнения по-прежнему содержат переменные коэффициенты. Значительного упрощения можно достичь, используя преобразование,

впервые предложенное Блонделем для установившегося режима явнополусной синхронной машины и впоследствии развитое Р. Х. Парком и А. А. Горевым для условий переходного процесса.

Сущность такого преобразования состоит в том, что двухосная система координат предполагается жёстко связанной с ротором. При этом, чтобы ротор был расположен симметрично относительно обмоток этих двух фаз, их оси совмещают соответственно с продольной и поперечной осями ротора. Эту систему координат сокращенно называют и обозначают d, q (рис. 6, б). Здесь угол $\gamma = \omega t + \gamma_0$ является функцией времени и отражает вращение ротора с угловой скоростью ω , которая в общем случае может быть переменной: Когда условие (9) не соблюдено, к координатам d, q должна быть добавлена третья координата 0, которая определяет нулевую составляющую переменных величин.

Поскольку фазные обмотки, расположенные в осях d и q , неподвижны относительно ротора, все индуктивности такой машины постоянны. Именно по этой причине выгодно перейти от переменных в координатах A, B, C к переменным в координатах $d, q, 0$. Это позволяет уравнения (1) преобразовать в соответствующие уравнения с постоянными коэффициентами. Все соотношения между исходными и новыми переменными определяются выражениями (14) — (17), в которых для рассматриваемого преобразования нужно только заменить индексы x и y соответственно индексами d и q , а угол θ — углом $\gamma = \omega t + \gamma_0$.

Пример.

В координатах A, B, C фазные переменные величины заданы:

а) синусоидальными функциями

$$f_A = f_m \cos(\omega t + \alpha_0); f_B = f_m \cos\left(\omega t + \alpha_0 - \frac{2\pi}{3}\right); f_C = f_m \cos\left(\omega t + \alpha_0 + \frac{2\pi}{3}\right);$$

б) неизменными значениями

$$f_A = f; f_B = f_C = -0.5f.$$

Для обоих случаев определим закономерности изменения соответствующих им переменных величин в координатах d, q .

Подставив в (15) и (16) заданные синусоидальные функции, после ряда тригонометрических преобразований найдем:

$$f_d = f_m \cos(\gamma_0 - \alpha_0); f_q = f_m \sin(\gamma_0 - \alpha_0)$$

т. е. синусоидально изменяющиеся в координатах A, B, C величины при переходе к вращающимся координатам d, q становятся соответствующими постоянными величинами.

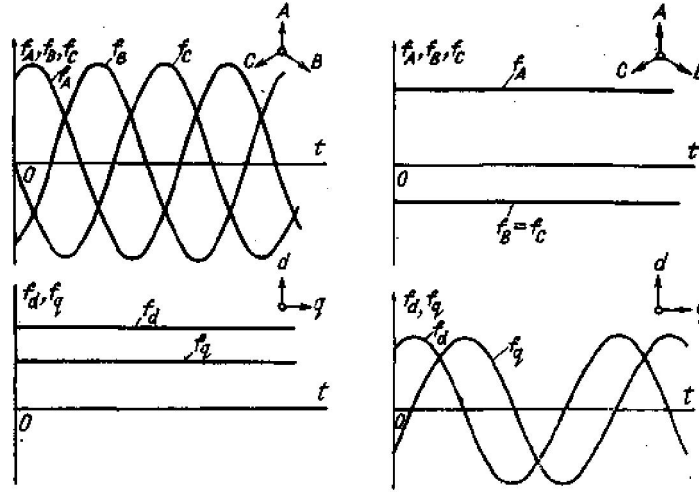


Рис. 7. Преобразование синусоидально изменяющихся и постоянных величин в координатах A, B, C эквивалентным величинам в координатах d, q .

Аналогично после подстановки в (15) и (16) заданных неизменных величин получим:

$$f_d = f \cos \gamma = f \cos(\omega t + \gamma_0); f_q = f \sin \gamma = f \sin(\omega t + \gamma_0).$$

т. е. неизменные в координатах A, B, C величины при переходе к координатам d, q превращаются в соответствующие синусоидально изменяющиеся величины. Произведенное преобразование иллюстрируют кривые рис. 7.

11. Уравнения Парка-Горева

11.1 Дифференциальная форма

Произведем теперь преобразование дифференциальных уравнений переходного процесса синхронной машины путем замены фазных переменных их составляющими в координатах $d, q, 0$.

Для этого выразим ток, напряжение и потокосцепление фазы А через новые переменные:

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0;$$

$$u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_0;$$

$$\Psi_A = \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0.$$

Подставив их в первое уравнение переходного процесса синхронной машины и имея в виду при дифференцировании, что Ψ_d, Ψ_q и γ являются функциями времени t , получим:

$$\begin{aligned} u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_0 &= -\frac{d}{dt}(\Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0) - r(i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0) = \\ &= -\frac{d\Psi_d}{dt} \cos \gamma + \Psi_d \sin \gamma \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_q}{dt} \sin \gamma - \Psi_q \cos \gamma \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_0}{dt} - ri_d \cos \gamma - ri_q \sin \gamma - ri_0 \end{aligned}$$

После перегруппировки слагаемых это выражение можно представить в виде

$$\left(u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + ri_d\right) \cos \gamma + \left(u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + ri_q\right) \sin \gamma + \left(u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + ri_0\right) = 0$$

Это уравнение должно быть удовлетворено при любом значении γ , что возможно только при условии, что каждое из выражений, заключенных в скобки, тождественно равно нулю. Таким образом, данное уравнение распадается на три уравнения:

$$\begin{aligned} u_d &= -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} - ri_d; \\ u_q &= -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - ri_q; \\ u_0 &= -\frac{d\Psi_0}{dt} - ri_0. \end{aligned}$$

Разумеется, результат преобразования не изменится, если вместо фазы A рассматривать иную фазу.

Уравнение для обмотки возбуждения сохраняется таким же, что и в исходных уравнениях переходного процесса синхронной машины; поэтому оно здесь повторно не приведено.

В полученных уравнениях при выражении величин в относительных единицах потокосцепления равны:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= M_d i_f + L_d i_d = x_{ad} i_f + x_d i_d; \\ \Psi_q &= L_q i_q = x_q i_q; \\ \Psi_0 &= L_0 i_0 = x_0 i_0. \end{aligned}$$

где L_0 и x_0 — индуктивность и индуктивное сопротивление нулевой последовательности машины.

Подчеркнем еще раз, что в полученных уравнениях токи i_d и i_q представляют собой соответствующие проекции обобщенного вектора тока статора i , изменение которого может иметь произвольный характер.

Таким образом, переход к новым переменным в координатах $d, q, 0$ позволил преобразовать систему дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами в уравнения, в которых все коэффициенты постоянны.

Полученные уравнения выражают основу теории двух реакций синхронной машины при электромагнитном переходном процессе; их называют уравнениями Парка — Горева.

Если изменение угла γ , характеризующее движение ротора, выразить соответствующим уравнением, то вместе с ранее составленными уравнениями для цепей статора и ротора получим систему уравнений, которая отражает уже одновременное протекание электромагнитного и электромеханического процессов с учетом их взаимного влияния. Решение и анализ такой системы уравнений является одной из задач проблемы устойчивости параллельной работы электрической системы и отдельных ее звеньев.

В соответствии с принятым допущением в дальнейшем считаем:

$$\gamma = \omega_c t + \gamma_0,$$

где ω_c — синхронная угловая скорость; γ_0 — начальный угол,

Следовательно,

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

и в относительных единицах при $\omega_o = \omega_c$

$$\frac{d\gamma}{dt} = 1.$$

В уравнениях Парка - Горева первые слагаемые представляют э. д. с. трансформации, поскольку они вызываются изменением величин соответствующих потокоцеплений, а вторые слагаемые - э. д. с. вращения. В стационарном режиме трансформаторные э. д. с., естественно отсутствуют.

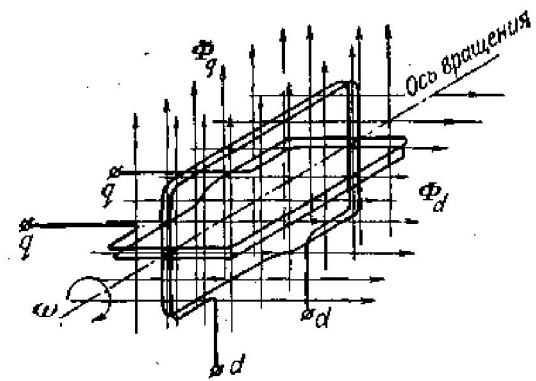


Рис.1. Принципиальная модель преобразованной синхронной машины.

Для наглядного представления обратимся к условной модели преобразованной машины, которая изображена на рис. 1. Здесь две обмотки $d-d$ и $q-q$, сдвинутые относительно друг друга на 90° , жестко связаны между собой и имеют общую с ротором ось вращения. Каждая из этих обмоток пронизывается своим магнитным потоком, т. е. соответственно Φ_d и Φ_q . При изменении величин этих потоков, что имеет место в переходном процессе в обмотках наводятся э. д. с. трансформации, причем изменение Φ_d вызывает э. д. с. трансформаций только в обмотке $d-d$, а изменение Φ_q - только в обмотке $q-q$.

Что касается э.д.с. вращения то на такой модели ее можно показать лишь частично. Дело в том, что при синхронном вращении обмоток и магнитных потоков, очевидно, никаких э. д. с. вращения в этих обмотках нет. Только при перемещении обмоток относительно вращающихся магнитных потоков, что в общем случае также имеет место при переходном процессе, в обмотках наводятся дополнительные э. д. с. вращения (или, точнее, э. д. с. скольжения): в обмотке $d-d$ - $\Psi_q \frac{d\gamma}{dt}$ и в обмотке $q-q$ - $\Psi_d \frac{d\gamma}{dt}$. Полностью э. д. с. вращения можно отразить на модели, построенной по принципу коллекторной машины.

11.2 Операторная форма

Полученные в предыдущем параграфе уравнения выразим в операторной форме, используя преобразование Лапласа. При этом для упрощения записи операторных уравнений примем, что начальные условия являются нулевыми. Такие условия всегда возможны, так как по принципу наложения решение задачи можно свести к

суммированию величин известного предшествующего режима с их приращениями, которые возникают от рассматриваемого возмущающего фактора, как-то: снижения или повышения напряжения, броска тока и т. п.; соответственно этому при записи в операторной форме в уравнения входят не полные величины, а только их приращения, предшествующие значения которых равны нулю.

Обозначая приращение знаком Δ перед соответствующей величиной, получаем уравнения электромагнитного переходного процесса в области изображения в виде :

$$\Delta u_d(p) = -p\Delta\Psi_d(p) - \Delta\Psi_q(p) - r\Delta i_d(p);$$

$$\Delta u_q(p) = -p\Delta\Psi_q(p) + \Delta\Psi_d(p) - r\Delta i_q(p);$$

$$\Delta u_0(p) = -p\Delta\Psi_0(p) - r\Delta i_0(p);$$

$$\Delta u_f(p) = p\Delta\Psi_f(p) + r_f\Delta i_f(p),$$

где приращения потокосцеплений:

$$\Delta\Psi_d(p) = x_{ad}\Delta i_f(p) + x_d\Delta i_d(p);$$

$$\Delta\Psi_q(p) = x_q\Delta i_q(p);$$

$$\Delta\Psi_0(p) = x_0\Delta i_0(p);$$

$$\Delta\Psi_f(p) = x_{ad}\Delta i_d(p) + x_f\Delta i_f(p).$$

Как видно, при нулевых начальных условиях операторные уравнения сохраняют тот же вид, что и соответствующие дифференциальные; лишь знак производной d/dt заменен на p , как это делается при обычной алгебраизации дифференциальных уравнений.

Выражения для приращений потокосцеплений позволяют найти в операторной форме реактивности машины.

Поскольку по оси q расположена только одна обмотка статора, то

$$x_q(p) = x_q.$$

Равным образом, коль скоро поток от i_0 не связан с ротором, то

$$x_0(p) = x_0.$$

Иное положение имеет место в продольной оси, где расположены две обмотки:

$$\Delta u_f(p) = p\Delta\Psi_f(p) + r_f\Delta i_f(p) = p[x_f\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_d(p)] + r_f\Delta i_f(p);$$

откуда

$$\Delta i_f(p) = -\frac{\Delta u_f(p) - px_{ad}\Delta i_d(p)}{r_f + x_f p}$$

Далее,

$$\Delta\Psi_d(p) = A(p)\Delta u_f(p) + x_d(p)\Delta i_d(p);$$

где

$$A(p) = \frac{x_{ad}}{r_f(1 + T_{f0}p)}$$

и продольная операторная реактивность

$$x_d(p) = x_d - \frac{x_{ad}^2 p}{r_f + x_f p} = \frac{x_d + \frac{x_f}{r_f} \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right) p}{1 + T_{f0} p} = \frac{x_d + T_{f0} x'_d p}{1 + T_{f0} p}$$

где x_d и x'_d — известные продольные синхронная и переходная реактивности машины; T_{f0} — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутом статоре, определяемая как

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

Если цепь статора замкнута через внешнюю реактивность x_{BH} , то во всех предыдущих выражениях под x_d, x_q, x'_d следует понимать сумму соответствующей реактивности машины и внешней реактивности x_{BH} .

В соответствии с преобразованием Лапласа $t \doteq 1/p^2$. Следовательно, предельные значения $x_d(p)$ будут:

при $p = \infty$, т. е. $t = 0$ реактивность $x_d(p) = x'_d$;

при $p = 0$, т. е. $t = \infty$ реактивность $x_d(0) = x_d$.

Такие же пределы $x_d(p)$ будут:

при $T_{f0} = \infty$ (обмотка возбуждения без потерь) $x_d(p) = x'_d$;

при $T_{f0} = 0$ (обмотка возбуждения разомкнута) $x_d(0) = x_d$.

Для машины с демпферными обмотками операторные реактивности также можно получить из схем замещения. Для большинства явнополюсных машин $r_{1d} \gg r_f$. При этом можно практически принять $r_f = 0$, после чего выражение для $x_d(p)$ приобретает вид:

$$x_d(p) = \frac{x'_d + T_{1d} x''_d p}{1 + T_{1d} p},$$

где

$$T_{1d} = T_{1d0} \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_{1d} x_f} \right).$$

— постоянная времени продольной демпферной обмотки при разомкнутом статоре, но замкнутой обмотке возбуждения, которая в данном случае рассматривается как сверхпроводник ($r_f = 0$); T_{1d0} — то же при всех разомкнутых цепях, с которыми продольная демпферная обмотка имеет магнитную связь.

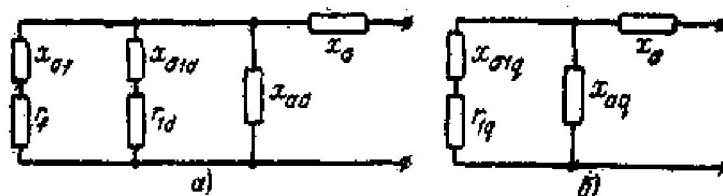


Рис. 2. Схемы замещения, определяющие операторные реактивности машины с демпферными обмотками. а — в продольной оси ротора; б — в поперечной оси ротора.

Приведем еще выражение для постоянной времени продольной демпферной обмотки при замкнутом статоре и разомкнутой обмотке возбуждения:

$$T'_{1d} = T_{1d0} \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_{1d} x_d} \right).$$

12 Синхронный генератор в установившемся режиме и в начальный момент короткого замыкания

12.1 Исходные положения рассмотрения переходного процесса в синхронной машине.

Переходный процесс в синхронной машине происходит при переходе от одного установившегося состояния работы машины к другому вследствие изменения энергии магнитного поля.

При внезапном коротком замыкании в цепи статора переходный процесс проявляется особенно отчетливо: токи короткого замыкания статора и ротора в несколько раз превосходят токи номинального режима.

Кроме того переходный процесс обуславливается магнитной связью между обмотками статора и обмотками ротора, так как обмотку статора можно рассматривать как первичный контур трансформатора, а обмотку ротора – как его вторичный контур.

В отличие от трансформатора обмотки электрической машины подвижны относительно друг друга, а поэтому их взаимоиндукция является переменной величиной.

Учет всех аспектов подвижности обмоток является очень сложной задачей, а поэтому делают ряд допущений, позволяющих, не смотря на искажение действительной картины явления, понять физическую сущность происходящих явлений и получить формулы, приемлемые для практических приложений.

Допущения.

1. не учитывается насыщение магнитной цепи машины; - это позволяет применить принцип наложения;
2. скорость вращения машины считается постоянной;
3. у турбогенераторов синхронная реактивность X_{ad} продольной реакции статора принимается равной синхронной реактивности X_{aq} поперечной реакции, причем эти реактивности предполагаются постоянными; (для гидрогенераторов это неверно $X_{ad} \neq X_{aq}$);
4. в начальный момент переходного процесса в синхронной машины предполагается, что ее схема замещения содержит только индуктивные сопротивления — это позволяет использовать принцип постоянства потокосцеплений обмоток машин; активные сопротивления учитываются только при вычислении постоянной времени затухания переходных процессов.

Принцип постоянства потокосцеплений обмоток машин позволяет ввиду магнитной связи между обмотками машины сформулировать следующий аналог закона Ленца для синхронной машины:

всякое внезапное изменение тока в одной из обмоток в синхронной машине порождает возникновение тока в других обмотках, который стремится поддержать неизменность магнитного потока в машине.

В начальный момент КЗ действие АРВ, ввиду ее инерциальности, не учитывается, поэтому начальный ток КЗ в цепи, питаемой одним генератором может быть вычислен по формуле

$$I_{K3}(0) = \frac{E_G(0)}{X_G(0) + X_{BH}};$$

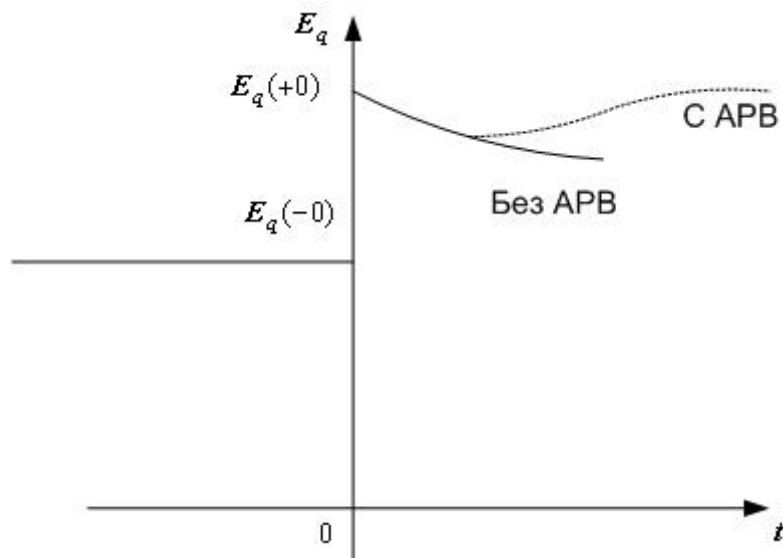
где $E_G(0)$ – ЭДС синхронной машины в начальный момент КЗ, $X_G(0)$ – сопротивление синхронной машины в начальный момент КЗ; X_{BH} – суммарное сопротивление цепи от места КЗ до выводов генератора. Для расчетов необходимо выбрать именно те $E_G(0)$ – и $X_G(0)$, которые остаются неизменными в начальный момент КЗ.

12.2 Переходные ЭДС и индуктивные сопротивления синхронной машины без демпферной обмотки.

При КЗ в цепи статора появляются периодическая и аperiodическая составляющие тока КЗ. При определении ЭДС машины аperiodическую составляющую можно не учитывать, так как связанный с ней магнитный поток неподвижен относительно статора, а поэтому на наводимую в машине ЭДС влияния не оказывает, а только слегка искажает общую картину магнитного поля машины.

Периодическая составляющая тока статора вызывает вращающийся поток, который перемещается относительно статора в нормальном направлении с синхронной скоростью, то есть этот поток неподвижен относительно ротора. При своем внезапном появлении он вызывает появление дополнительно постоянного тока в обмотке возбуждения, причем направление и значение этого тока таковы, что происходит компенсация изменения потокосцепления этой обмотки в начальный момент КЗ.

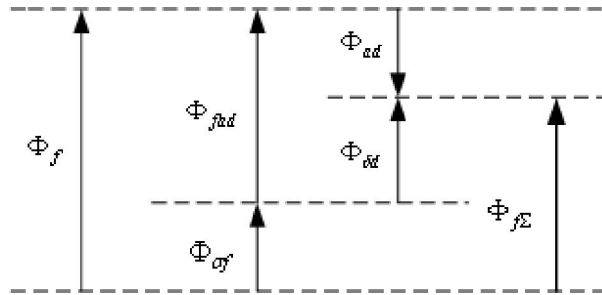
Этот дополнительный ток ΔI_f вызывает скачок магнитного потока, потокосцепления и пропорциональной им ЭДС холостого хода $E_q(-0)$ до $E_q(+0)$.



В нормальном режиме работы синхронной машины без демпферных контуров ток обмотки возбуждения I_f обуславливает полный магнитный поток обмотки возбуждения Φ_f , который при холостом ходе машины состоит из полезного потока Φ_{fad} и потока рассеяния обмотки возбуждения Φ_{of} .

При нагруженной машине полезный поток Φ_{fad} равен геометрической разности продольного потока в воздушном зазоре $\Phi_{\delta l}$ и потока продольной реакции статора Φ_{ad} .

Результирующий магнитный поток $\Phi_{f\Sigma}$, сцепленный с обмоткой возбуждения, равен сумме потоков $\Phi_{f\sigma}$ и потока рассеяния $\Phi_{\sigma f}$.



При КЗ происходит изменение периодической составляющей тока статора, что в свою очередь влечет за собой увеличение потока реакции статора на величину $\Delta\Phi_{ad}$. Этот поток направлен против основного потока возбуждения Φ_f и стремится изменить его в сторону уменьшения. Однако в начальный момент КЗ результирующий магнитный поток $\Phi_{f\Sigma}$ не изменится, так как согласно аналогу закона Ленца, одновременно с изменением Φ_{ad} в обмотке возбуждения появится дополнительный ток, вызывающий ответный поток реакции возбуждения $\Delta\Phi_f$ и компенсирующий $\Delta\Phi_{ad}$.

Из рисунка

$$\Phi_{f\Sigma} = \Phi_f - \Phi_{ad};$$

новые значения потоков при внезапном изменении режима:

$$\Phi'_f = \Phi_f + \Delta\Phi_f;$$

$$\Phi'_{ad} = \Phi_{ad} + \Delta\Phi_{ad};$$

тогда

$$\Phi'_{f\Sigma} = \Phi'_f - \Phi'_{ad} = \Phi_f + \Delta\Phi_f - (\Phi_{ad} + \Delta\Phi_{ad}) = \Phi_f - \Phi_{ad} = \Phi_{f\Sigma},$$

так как

$$\Delta\Phi_f = \Delta\Phi_{ad};$$

Из последнего соотношения

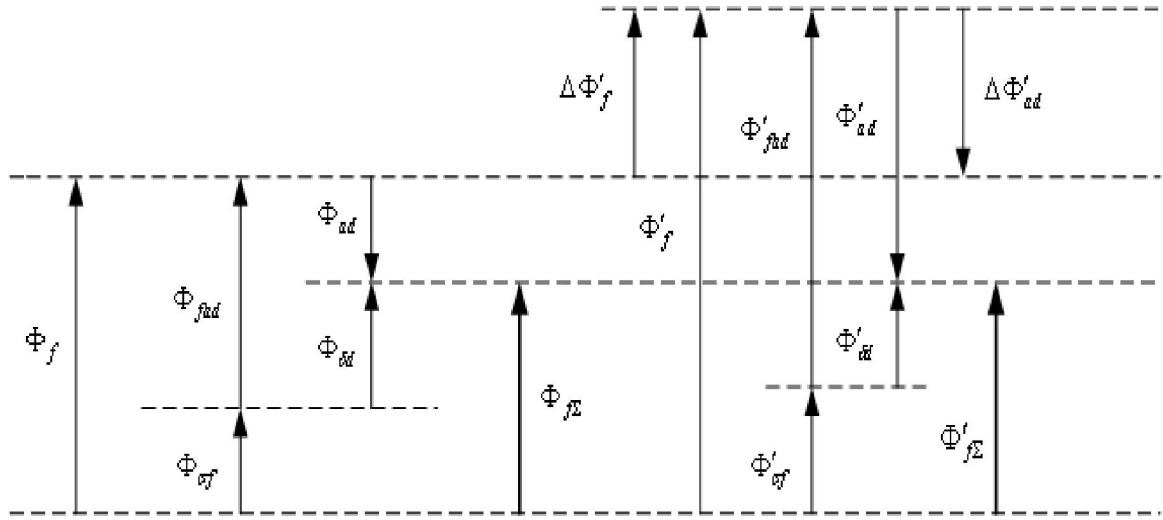
$$\Delta\Psi_{ad} + \Delta\Psi_f = 0;$$

или

$$\Delta I_d X_{ad} + \Delta I_f (X_{\sigma f} + X_{ad}) = 0;$$

где $\Delta I_d, \Delta I_f$ - приращения токов ротора и обмотки возбуждения.

Рост Φ_f до Φ'_f приводит к пропорциональному увеличению потока рассеяния $\Phi_{\sigma f}$ до $\Phi'_{\sigma f}$ и соответственно уменьшению потока в воздушном зазоре от $\Phi_{\delta l}$ до $\Phi'_{\delta l}$, поэтому ЭДС, пропорциональную $\Phi_{\delta l}$, использовать для вычисления тока КЗ нельзя.



Как следует из рассмотренных выше соотношений неизменным в начальный момент КЗ магнитный поток является $\Phi_{f\Sigma}$, которому соответствует потокосцепление $\Psi_{f\Sigma}$.

ЭДС статора, соответствующую этому потокосцеплению называют поперечной переходной ЭДС и обозначают через E'_q . Для нее характерно следующее соотношение

$$E'_q(-0) = E'_q(+0).$$

При нахождении значения ЭДС E'_q следует помнить, что она обусловлена только той частью результирующего потока (потокосцепления), который связан со статором, то есть

$$\Psi'_d = (1 - \sigma_f) \Psi_{f\Sigma};$$

так как поток рассеяния обмотки возбуждения $\Phi_{\sigma f}$ никак не связан с обмоткой статора.

В ненасыщенной машине

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

где $x_{\sigma f}$, x_{ad} , x_f - индуктивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения, реакции статора, обмотки возбуждения.

Тогда

$$\begin{aligned} \Psi'_d &= (1 - \sigma_f) \Psi_{f\Sigma} = (1 - \sigma_f) (\Psi_f + \Psi_{ad}) = \left(1 - \frac{x_{\sigma f}}{x_{ad} + x_{\sigma f}}\right) (I_f (x_{ad} + x_{\sigma f}) - I_d x_{ad}) = \\ &= \frac{x_{ad}}{x_{ad} + x_{\sigma f}} (I_f (x_{ad} + x_{\sigma f}) - I_d x_{ad}) = I_f x_{ad} - I_d \frac{x_{ad}^2}{x_f}; \end{aligned}$$

знак минус взят из-за разнонаправленности Φ_f и Φ_{ad} .

Переходя к ЭДС, можно записать

$$\begin{aligned} E'_q &= I_f x_{ad} - j I_d \frac{x_{ad}^2}{x_f} = E_q - j I_d \frac{x_{ad}^2}{x_f} = \{E_q = U_q + j I_d x_d\} = U_q + j I_d x_d - j I_d \frac{x_{ad}^2}{x_f} = \\ &= U_q + j I_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}\right) = U_q + j I_d x'_d \end{aligned}$$

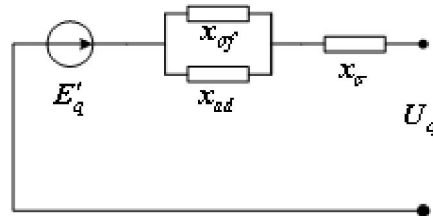
где

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

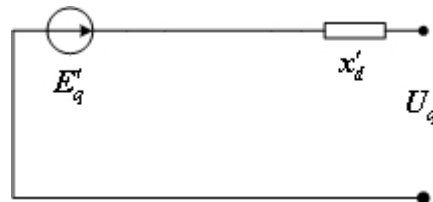
$$= x_{\sigma} + \frac{x_{\sigma f} x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}}$$

называется продольным переходным индуктивным сопротивлением.

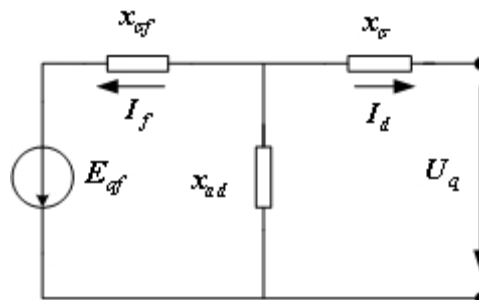
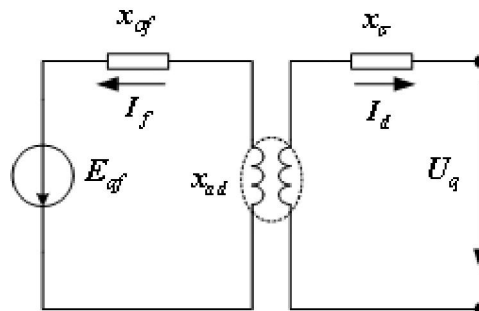
Полученные выражения позволяют представить схему замещения синхронной машины



или



Похожую схему замещения можно получить, рассматривая машину как двухобмоточный трансформатор и строя его схему замещения:



Так как по поперечной оси ротора нет обмоток, то $E'_d = 0$, а $x'_q = x_q$.

Таким образом для машин, у которых отсутствуют демпферные обмотки, ток КЗ или любой другой начальный переходный периодический ток могут быть найдены по формуле:

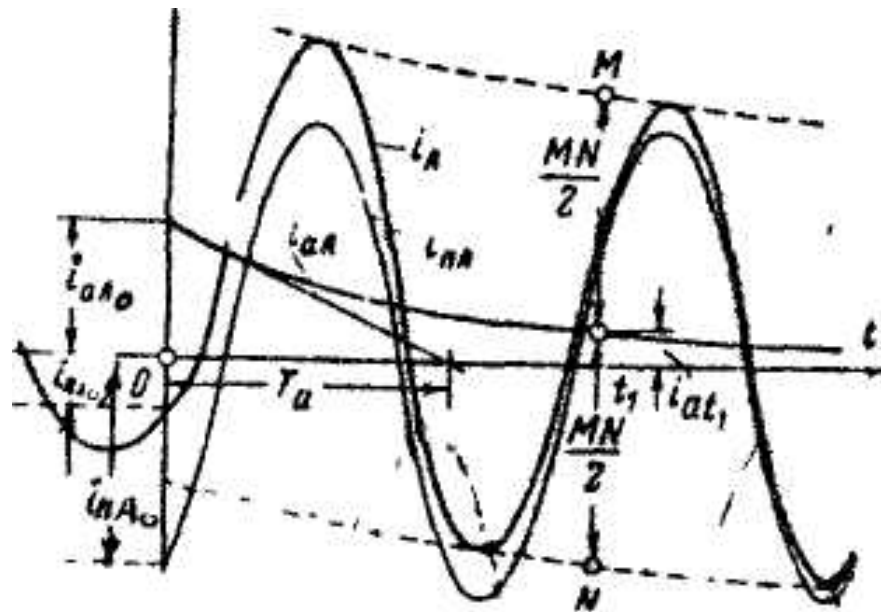
$$I_{K3}(0) = \frac{E'_q}{x'_d + X_{BH}}.$$

13 Электродвигатели и нагрузки в начальный момент короткого замыкания

13.1 Ударный ток короткого замыкания

При КЗ происходит уменьшение сопротивления короткозамкнутой цепи по сравнению с ее сопротивлением в нормальном режиме. Рассмотрим осциллограмму токов в фазе А, где периодический ток до КЗ соответствует значению $i_{nA(0)}$. Новому сопротивлению цепи при КЗ соответствует уже периодический ток i_{nA0} . Переход электрической цепи из одного состояния в другое сопровождается появлением апериодического (свободного) тока i_{aA} . Общий ток КЗ в фазе А составляет сумму периодического i_{nA} и апериодического i_{aA} токов

$$i_A = i_{nA} + i_{aA}$$



13.2 Изменение тока КЗ и его составляющих в фазе А при отсутствии АРВ.

Так как в момент нарушения режима начальный мгновенный ток в цепи $i_{nA(0)}$ остается неизменным, то, следовательно, начальное значение апериодического тока в фазе А будет равно

$$i_{aA0} = i_{nA(0)} - i_{nA0} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k);$$

где I_m и I_{nm} - амплитудные значения периодического тока в нормальном режиме и при КЗ; φ и φ_k - угол сдвига тока в цепи в нормальном режиме и при КЗ (в большинстве случаев принимают $\varphi_k = 90^\circ$); α - фаза включения (зависит от мгновенного значения напряжения в момент КЗ}.

В переходном процессе нет причин поддержания аperiodического тока и он, как всякий свободный ток, затухает по экспоненциальному закону с постоянной времени T_a , зависящей от параметров x_k и r_k короткозамкнутой цепи

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}.$$

Следовательно, в любой момент переходного процесса мгновенное значение полного тока КЗ фазы А равно

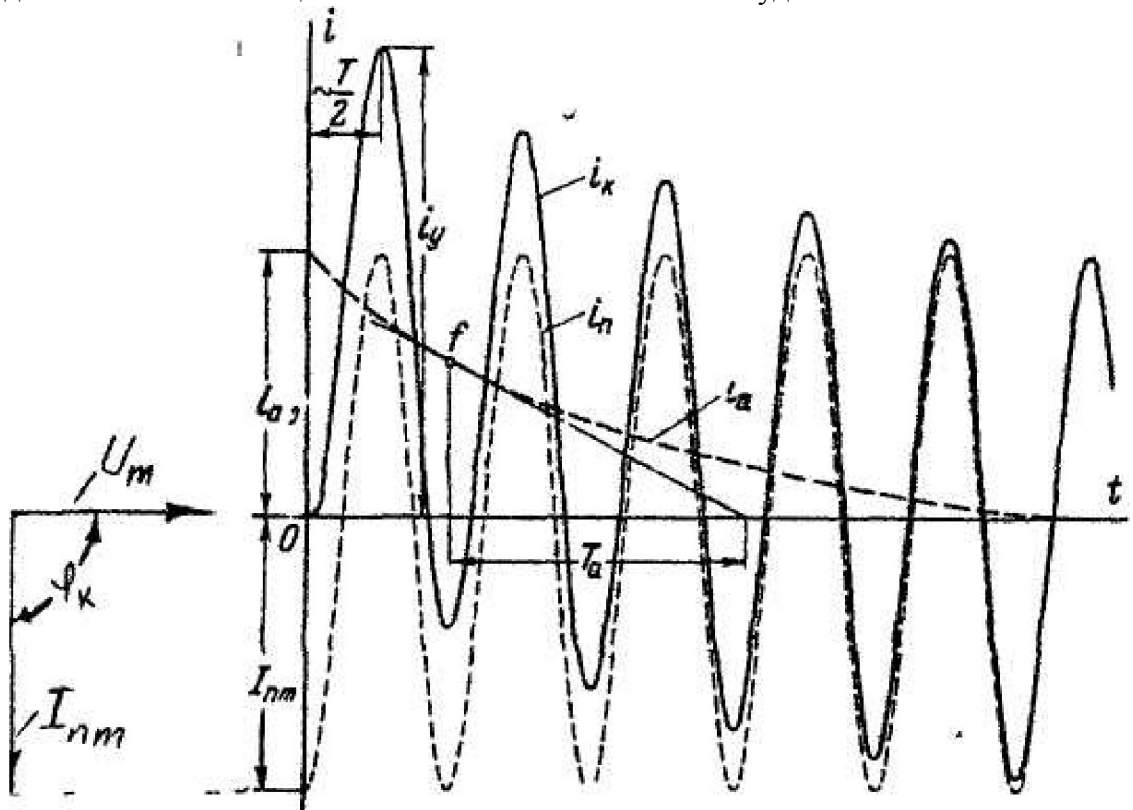
$$i_A(t) = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + i_{aA0} e^{-\frac{t}{T_a}};$$

где U_m - напряжение источника питания (принимается постоянным по амплитуде); Z_k - полное сопротивление цепи КЗ. При этом периодическая (принужденная) составляющая тока будет с постоянной амплитудой

$$I_{nm} = \frac{U_m}{Z_k}.$$

Аналогичная картина будет и в других фазах трехфазной цепи, только начальные значения периодического и аperiodического тока будут другие (в одной из фаз аperiodический ток может быть равен даже нулю).

Наибольшую опасность представляет наибольшее мгновенное значение полного тока КЗ. Его называют ударным током i_y . Очевидно, он возникнет в случае, если аperiodическая составляющая тока КЗ в начальный момент будет наибольшая.



К определению ударного тока КЗ (осциллограмма ТКЗ при наибольшей апериодической составляющей)

Обычно начальное значение апериодического тока зависит от фазы включения цепи на КЗ. Максимальное значение апериодического тока в начальный момент КЗ уже будет зависеть как от фазы включения, так и от предшествующего тока в рассматриваемой цепи $i_{n(0)}$.

Анализируя выражение для тока i_{aA0} , получаем

$$i_{aA0\max} = i_{nA(0)} - i_{nA0} = 0 - I_{nA0\max} = -\sqrt{2}I_n;$$

т.е. максимальное значение тока $i_{aA0\max}$ будет при коротком замыкании в ненагруженной цепи ($i_{nA(0)} = 0$) при нулевой фазе включения (мгновенное значения напряжения проходит через нулевое значение). Следовательно, значение $i_{aA0\max}$ равно амплитуде периодической составляющей

$$i_{nA0\max} = I_{nm} = \sqrt{2}I_n.$$

Рассмотренная ситуация может произойти только в одной фазе (в нашем случае в фазе А), так как в этом случае мгновенные значения начального периодического (следовательно и апериодического) тока других фаз будут меньше.

Из осциллограммы видно, что ударный ток наступает через полпериода, т.е. при частоте 50 Гц примерно через 0,01с.

$$i_y = i_n(t = 0.01) + i_a(t = 0.01) = \sqrt{2}I_n + \sqrt{2}I_n e^{-\frac{0.01}{T_a}} = \sqrt{2}I_n(1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}) = \sqrt{2}I_n k_y.$$

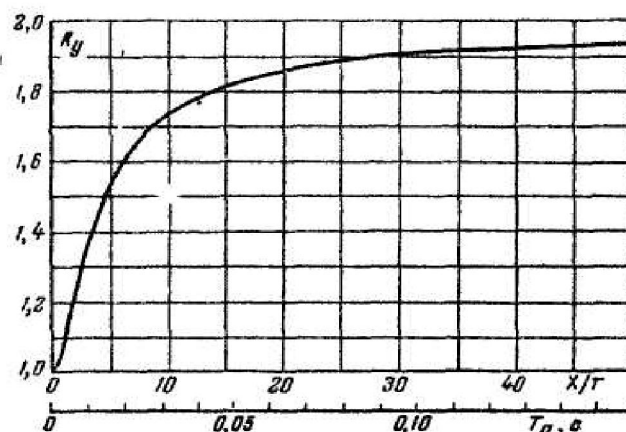
В практических расчетах считают, что начальный сверхпереходный ток I'' к моменту времени $t = 0.01$ с. по амплитуде также остается неизменным, т.е. $I_n = I''$. Тогда ударный ток КЗ равен

$$i_y = \sqrt{2}I'' k_y;$$

а ударный коэффициент

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}} = i_y / \sqrt{2}I_n.$$

Зависимость ударного коэффициента от постоянной времени короткозамкнутой цепи T_a представлена на следующем рисунке.



Из анализа выражения для k_y можно определять пределы изменения значения ударного коэффициента. При очень значительном, превышении активного сопротивления над индуктивным $x/r \rightarrow 0$, а $k_y \rightarrow 1$ (наблюдается в сетях напряжением ниже 1 кВ), наоборот, в практически чисто индуктивных цепях (КЗ на выводах крупных генераторов) $x/r \rightarrow \infty$, а $k_y \rightarrow 2$. Следовательно, значения ударного коэффициента находится в пределах

$$1 < k_y < 2.$$

Кроме того ударный коэффициент указывает превышение ударного тока (максимального значения полного тока КЗ) над амплитудой периодической составляющей ТКЗ.

Для точного определения k_y преобразование схемы замещения следует вести в комплексной форме до получения результирующего сопротивления цепи короткого замыкания (наиболее просто это делается с использованием ПЭВМ)

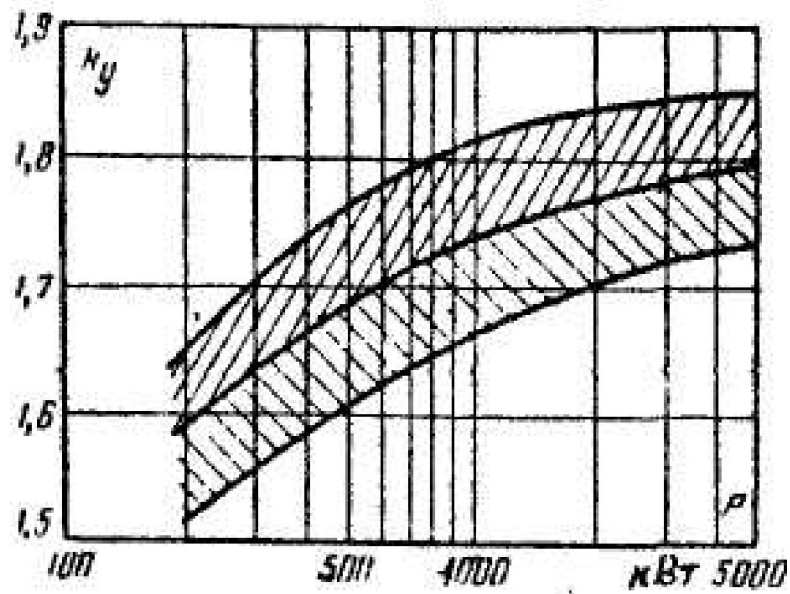
$$Z_k = r_k + jx_k.$$

При КЗ на выводах крупных генераторов часто принимает $k_y = 1,9$ (для тока от генератора). По мере увеличения удаленности КЗ от источника питания его значение уменьшается (особенно при значительной доле воздушных линий). При практических расчетах КЗ в высоковольтных воздушных сетях принимают $k_y = 1,8$. Более целесообразно использовать рекомендации, данные в таблице

Наименование ветви или место КЗ	x/r	k_y	T_a, c
Ветвь генератор-трансформатор	30-50	1,9 - 1,95	0,1 - 0,2
Ветвь асинхронного двигателя	6,3	1,6	0,02
КЗ за линейным реактором на электростанции	30	1,9	0,1
КЗ за линейным реактором m_i подстанции	18-20	1,85	0,06
КЗ за кабельной линией 6-Ю хВ	3	1,4	0,01
КЗ за трансформатором мощностью 1000 кВ«А	6,3	1,6	0,02
КЗ на присоединении РУ повышенного напряжения подстанции	15	1,8	0,05
КЗ на присоединении вторичного			

напряжения подстанция	20	1.85	0,06
-----------------------	----	------	------

Асинхронные двигатели к другая нагрузка в месте КЗ учитывается в виде дополнительных источников питания. При этом следует учитывать, что одновременно с затуханием апериодического тока происходит интенсивное затухание периодического тока (в установившемся режиме он также станет равным нулю). Следовательно ударный коэффициент будет учитывать одновременное затухание обеих слагающих тока и будет ниже, чем у крупных генераторов. Для крупных асинхронных двигателей значения k_y приведены на рисунке



Полный ударный ток в месте КЗ будет равен

$$i_y = \sqrt{2}k_y I'' + \sqrt{2}k_{y,d} I''_d;$$

где $I''_d, k_{y,d}$ - начальный сверхпереходный ток и ударный коэффициент асинхронного двигателя.

У мелких двигателей затухание токов происходит более интенсивно. Поэтому для них и для обобщенной нагрузки принимают $k_y = 1$. Это означает, что если принять для них $E'' = 0.9, x'' = 0.2$, то ударный ток от нагрузки

$$i_{y.H.} = \sqrt{2}k_y I''_H = \sqrt{2} * 1 * \frac{0.9}{0.2} I_{H.d} = 6.5 I_{H.d};$$

поэтому ударный ток при наличии обобщенной нагрузки в месте КЗ составит

$$i_y = \sqrt{2}k_y I'' + 6.5 I_{H.d};$$

где $I_{H.d}$ - номинальный ток обобщенной нагрузки или двигателей, приведенный к ступени КЗ.

Для синхронных двигателей величина ударного коэффициента может быть принята такой же, как у генераторов примерно той же мощности.

Если точка КЗ делит схему на радиальные не зависящие друг от друга ветви, то ударный ток следует определять как сумму ударных токов отдельных ветвей

$$i_y = \sum_{k=1}^m \sqrt{2} I_k'' (1 + e^{-\frac{0.01}{T_{a,k}}})$$

где I_k'' , $T_{a,k}$ - начальный сверхпереходный ток и постоянная времени k -й ветви.

В сложных разветвленных электрических схемах, содержащих кабельные сети, протяженные воздушные сети, ударный ток следует рассчитывать путем решения системы уравнений контурных токов или узловых напряжений (при нулевых начальных условиях), составленных с учетом как индуктивных, так и активных сопротивлений всех элементов расчетной схемы.

Однако в приближенных расчетах ударного тока КЗ в любой сложной схеме стандарт на определение ТКЗ допускает использование форм

$$i_y = \sqrt{2} I'' k_y;$$

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}} = i_y / \sqrt{2} I_n.$$

При этом постоянная времени T_a определяется или исходя из результирующего комплексного сопротивления $Z_k = r_k + jx_k$.

$$T_a = \frac{\text{Im } Z_k}{\omega \text{Re } Z_k}$$

или по приближенной методике

$$T_a = \frac{X_\Sigma(r=0)}{R_\Sigma(x=0)},$$

где $X_\Sigma(r=0)$ и $R_\Sigma(x=0)$ - результирующие индуктивные и активные сопротивления, определяемые в схемах, в которые все элементы введены соответственно только индуктивными и только активными сопротивлениями.

Следует указать, что в некоторых, частных случаях, например, при КЗ в электрических сетях со значительным активным сопротивлением ($x/r < 3$), или при КЗ в линиях с установками продольной емкостной компенсации, момент возникновения ударного тока КЗ не равен 0,01 с. и его следует определить дополнительно.

В первом случае этот момент (t_y) в секундах к ударный ток КЗ в килоамперах допускается определять по формулам

$$t_y = 0.01 \frac{\frac{\pi}{2} + \varphi_k}{\pi}$$

и

$$i_y = \sqrt{2}I''(1 + \sin \varphi_k e^{-\frac{t_y}{T_a}}),$$

где φ_k - угол сдвига фаз ЭДС источника и периодической составляющей тока КЗ, рад.

Во втором случае при определении i_y и момента его возникновения необходимо дополнительно учитывать свободную периодическую составляющую, имеющую подсинхронную частоту. Это будет учтено при рассмотрении КЗ в длинных линиях передачи переменного тока.

14 Переходные электромагнитные процессы в синхронной машине

Анализ электромагнитного переходного процесса при внезапном коротком замыкании, рассматриваемый в настоящей главе, ограничен условием, что синхронная машина работает отдельно от других источников питания. Внешняя цепь ее статора при возникшем коротком замыкании характеризуется некоторым постоянным сопротивлением, преимущественно индуктивным.

Чтобы иметь некоторое представление о взаимном влиянии машин на характер протекания электромагнитного переходного процесса (при неизменной скорости их вращения), в конце главы данный вопрос кратко освещен для простейших условий, когда в схеме имеются две машины, связанные между собой через произвольные реактивности.

Вначале рассматривается переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток и при отключенном устройстве автоматического регулирования возбуждения. В дальнейшем введен учет такого регулирования, используя материал предыдущей главы. Влияние и учет демпферных обмоток изложен без строгих математических выкладок; при этом основное внимание обращено на вскрытие физической сущности явления и возможности упрощенной оценки этого влияния.

Практический интерес представляет протекание процесса при каскадном (или ступенчатом) отключении короткого замыкания и его повторном включении. В общем виде данный вопрос очень сложен. Поэтому здесь он рассмотрен применительно к условиям, когда в схеме имеется лишь одна машина.

14.1 Внезапное короткое замыкание синхронной машины без демпферных обмоток

При металлическом трехфазном коротком замыкании напряжение каждой фазы в месте короткого замыкания $U = 0$. Следовательно, приращение напряжения в этой точке при возникновении такого повреждения будет $\Delta U = -U_0$ или в операторной форме $\Delta U(p) = -U_0 / p$.

Аналогично приращения составляющих этого напряжения будут:

$$\Delta u_d = -u_{d_0} + \Delta u_d(p) = -u_{d_0} / p; \quad (1)$$

$$\Delta u_q = -u_{q_0} + \Delta u_q(p) = -u_{q_0} / p. \quad (2)$$

При отсутствии АРВ $\Delta i_f = 0$. Тогда имеем:

$$\Delta i_f(p) = \frac{-px_{ad}\Delta i_d(p)}{r_f + px_f} = -\frac{x_{ad}\Delta i_d(p)p}{r_f(1 + pT_{f0})}; \quad (3)$$

и

$$\Delta \Psi_d = x_d(p)\Delta i_d(p). \quad (4)$$

Для рассматриваемого переходного процесса ранее полученные уравнения после соответствующей группировки слагаемых можно представить в виде

$$\Delta u_d(p) = -\frac{u_{d0}}{p} = -(r + px_d(p))\Delta i_d(p) - x_q\Delta i_q(p); \quad (5)$$

$$\Delta u_q(p) = -\frac{u_{q0}}{p} = x_d\Delta i_d(p) - (r + px_q)\Delta i_q(p); \quad (6)$$

откуда приращения токов:

$$\Delta i_d(p) = \frac{u_{d0}(r + px_q) - u_{q0}x_q}{pD(p)}; \quad (7)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{u_{q0}(r + px_d(p)) + u_{d0}x_d(p)}{pD(p)}; \quad (8)$$

где определитель

$$D(p) = (r + px_d(p))(r + px_q) + x_d(p)x_q. \quad (9)$$

Приравняв определитель нулю, получим характеристическое уравнение, которое после подстановки вместо $x_d(p)$ выражения $x_d(p) = \frac{x_d + T_{f0}x'_d p}{1 + T_{f0}p}$ и проведения ряда преобразований приобретает вид:

$$x'_d x_q p^3 + \left[x'_d r + x_q \left(\frac{x_d}{T_{f0}} + r \right) \right] p^2 + \left[x'_d x_q + r \left(\frac{x_d + x_q}{T_{f0}} + r \right) \right] p + \frac{x_d x_q + r^2}{T_{f0}} = 0. \quad (10)$$

Как видно, оно является полным кубическим уравнением относительно оператора p . Это указывает на то, что каждое из приращений токов $(\Delta i_d, \Delta i_q)$ содержит в себе три свободные составляющие. Таким образом, уже для самых элементарных условий требуется решить уравнение третьей степени, что достаточно просто лишь в числовых значениях.

Анализ характеристического уравнения (10) приводит к выводу, что при относительно малых значениях активных сопротивлений цепей, как это обычно имеет место в условиях короткого замыкания, корни этого уравнения с достаточной для практики точностью можно определять, принимая поочередно $r_f = 0$ и $r = 0$.

Так, при $r_f = 0$ (или $T_{f0} = \infty$) характеристическое уравнение приобретает более простой вид:

$$\left[x'_d x_q p^2 + r(x'_d + x_q)p + (x'_d x_q + r^2) \right] p = 0. \quad (11)$$

Его корни соответственно равны:

$$p_{1,2} = -\frac{r(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \pm j \sqrt{1 - \left[\frac{(x_q - x'_d)r}{2x'_d x_q} \right]^2}, \quad (12)$$

и $p_3 = 0$.

Два первых корня, как видно, выражаются сопряженными комплексами. Их действительная часть отрицательна, что указывает на затухание соответствующих им свободных токов с постоянной времени

$$T_a = \frac{2x'_d x_q}{r(x'_d + x_q)} = \frac{x_2}{r}, \quad (13)$$

где

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{(x'_d + x_q)}, \quad (14)$$

представляет собой реактивность обратной последовательности машины. Значения мнимых частей этих корней

$$\pm j \sqrt{1 - \left[\frac{(x_q - x'_d)r}{2x'_d x_q} \right]^2}, = \pm j \omega_{1,2}; \quad (15)$$

представляют относительные угловые частоты изменения соответствующих свободных токов, выраженных в координатах d, q .

Вычитаемое под корнем в (15) обычно ничтожно мало по сравнению с единицей, что позволяет практически им пренебречь. Тогда вместо (12) получим упрощенно:

$$p_{1,2} \approx -\frac{1}{T_a} \pm j. \quad (12a)$$

В то время как найденные при $r_f = 0$ значения корней p_1 и p_2 достаточно близки к действительности, значение третьего корня p_3 при том же допущении не отражает истинного характера изменения соответствующей ему свободной составляющей тока. В самом деле, $p_3 = 0$ указывает на то, что эта составляющая тока остается неизменной, но это противоречит физической сущности рассматриваемого процесса.

Близкое к действительности значение корня p_3 можно получить, полагая $r = 0$, но $r_f \neq 0$. При этом (10) переходит в простое уравнение

$$(p^2 + 1) \left(x'_d p + \frac{x_d}{T_{f_0}} \right) = 0 \quad (16)$$

первые два корня которого получаются чисто мнимыми сопряженными:

$$p_{1,2} = \pm j$$

а третий корень

$$p_3 = -\frac{x_d}{T_{f_0} x'_d} \quad (17)$$

являясь вещественной отрицательной величиной, указывает на то, что отвечающий ему свободный ток затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T'_d = -\frac{1}{p_3} = T_{f_0} \frac{x'_d}{x_d}. \quad (18)$$

При необходимости значение T'_d можно несколько уточнить, введя приближенный учет активного сопротивления цепи статора r . При этом выражение для T'_d приобретает вид:

$$T'_d = T_{f_0} \frac{x'_d x_q + r^2}{x_d x_q + r}. \quad (19)$$

Поскольку корни характеристического уравнения определены, то переход от изображений (7) и (8) к их оригиналам (т. е. временным функциям) уже не представляет принципиальных трудностей. Для каждого слагаемого этих выражений можно применить известную формулу разложения. Однако и здесь для упрощения решения можно без заметной погрешности использовать еще дополнительное допущение. Сущность последнего состоит в следующем: поскольку r_f и r относительно малы, при определении принужденных токов и начальных значений свободных токов практически можно пренебречь всеми активными сопротивлениями одновременно, а не поочередно, как это делалось при определении корней характеристического уравнения. В этом случае, очевидно, учет активных сопротивлений находит отражение только в значениях соответствующих постоянных времени затухания свободных токов.

При $r = 0$ и $r_f = 0$ определитель вместо (9) будет:

$$D(p) = (1 + p^2) x'_d x_q \quad (20)$$

и выражения (7) и (8) становятся совсем простыми:

$$\Delta i_d(p) = \frac{u_{d_0}}{(1 + p^2) x'_d} - \frac{u_{q_0}}{p(1 + p^2) x'_d}; \quad (21)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{u_{q_0}}{(1 + p^2) x_q} + \frac{u_{d_0}}{p(1 + p^2) x_q}. \quad (22)$$

Непосредственно из таблиц преобразования функций по Лапласу имеем:

$$\frac{1}{1 + p^2} \doteq \sin t$$

и

$$\frac{1}{p(1 + p^2)} \doteq 1 - \cos t;$$

поэтому оригиналами выражений (21) и (22) будут:

$$\Delta i_d = \frac{u_{d_0}}{x'_d} \sin t - \frac{u_{q_0}}{x'_d} (1 - \cos t); \quad (23)$$

$$\Delta i_q = \frac{u_{q_0}}{x_q} \sin t + \frac{u_{d_0}}{x_q} (1 - \cos t). \quad (24)$$

Прибавив к полученным приращениям токов предшествующие значения i_{d_0} и i_{q_0} и приняв во внимание, что в соответствии с принятыми положительными направлениями осей d и q

$$E'_{q_0} = u_{q_0} - x'_d i_{d_0}, \quad u_{d_0} = -x_q i_{q_0},$$

получим:

$$i_d = -\frac{E'_{q_0}}{x'_d} + \frac{u_{d_0}}{x'_d} \sin t + \frac{u_{q_0}}{x'_d} \cos t; \quad (25)$$

$$i_q = \frac{u_{q_0}}{x_q} \sin t - \frac{u_{d_0}}{x_q} \cos t. \quad (26)$$

Далее можно перейти от переменных в осях d, q к переменным в фазных осях A, B, C . Так, например, для фазы A после ряда преобразований имеем:

$$\begin{aligned} i_A = & \frac{E'_{q_0}}{x'_d} \cos(t + \gamma_0) - \frac{u_{q_0}(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \cos \gamma_0 - \frac{u_{d_0}(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \sin \gamma_0 - \\ & - \frac{u_{q_0}(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} \cos(2t + \gamma_0) + \frac{u_{d_0}(x_q - x'_d)}{2x'_d x_q} \sin(2t + \gamma_0). \end{aligned} \quad (27)$$

Здесь, как видно, пока еще не учтено затухание свободных токов. В частности, первый член этого выражения представляет собой периодическую слагающую основной частоты, амплитуда которой при $r_f = 0$ остается постоянной и равной начальному переходному току. Эта слагающая вызвана э.д.с. вращения, и ее изменение легко выявить, рассматривая отдельно действие этой э.д.с. при представлении машины операторной реактивностью $x_d(p)$. Другими словами, для приращения этой слагающей $\Delta i_{d\Pi}$ в операторной форме имеем:

$$\Delta i_{d\Pi} = -\frac{u_{q_0}}{px_d(p)} = -\frac{u_{q_0}(1 + pT_{f_0})}{p(x_d + T_{f_0}x'_d p)}; \quad (28)$$

которое после перехода к оригиналу при значении p_3 , определяемом из (17), дает:

$$\Delta i_{d\Pi} = -\frac{u_{q_0}}{x_d} - \left(\frac{u_{q_0}}{x'_d} - \frac{u_{q_0}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}}. \quad (29)$$

Прибавив предшествующий ток i_{d_0} и сделав небольшие преобразования, получим:

$$i_{d\Pi} = \Delta i_{d\Pi} + i_{d_0} = -\frac{E_{q_0}}{x_d} - \left(\frac{E_{q_0}}{x'_d} - \frac{E_{q_0}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \quad (30)$$

Полученная закономерность изменения тока $i_{d\Pi}$ в координатах d, q в то же время характеризует изменение огибающей кривой периодической слагающей основной частоты тока статора. Эта слагающая в рассматриваемых условиях (пренебрежение активными сопротивлениями цепи статора и отсутствие замкнутого контура в поперечной оси ротора) является только продольной. Ее действующее значение в произвольный момент определяется аналогичным выражением, т. е.

$$I_{\Pi} = \frac{E_{q_0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q_0}}{x'_d} - \frac{E_{q_0}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} = I + (I'_{|0|} - I) e^{-\frac{t}{T'_d}} = I + I'_{ce|0|} e^{-\frac{t}{T'_d}}, \quad (30a)$$

где I — установившийся ток короткого замыкания; $(I'_{|0|} - I) = I'_{ce|0|}$ — начальный свободный переходный ток. Для мгновенного значения периодической слагающей тока основной частоты фазы A имеем:

$$I_{\Pi A} = \left[\frac{E_{q_0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q_0}}{x'_d} - \frac{E_{q_0}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] \cos(t + \gamma_0). \quad (31)$$

Остальные члены в (27) обусловлены действием трансформаторной э.д.с. и их затухание происходит с постоянной времени T_a , определяемой (13).

Таким образом, полное выражение для мгновенного значения тока фазы A с учетом затухания свободных слагающих будет:

$$i_A = \left[\frac{E_{q_0}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q_0}}{x'_d} - \frac{E_{q_0}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] \cos(t + \gamma_0) - \left[u_{q_0} \cos \gamma_0 + u_{d_0} \sin \gamma_0 \right] \frac{(x_q + x'_d)}{2x_q x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} - \\ - \left[u_{q_0} \cos(2t + \gamma_0) - u_{d_0} \sin(2t + \gamma_0) \right] \frac{(x_q - x'_d)}{2x_q x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (32)$$

Здесь первые два члена образуют периодическую слагающую тока основной частоты, третий и четвертый члены — аperiodическую слагающую и два последних члена — вторую гармонику тока. Из структуры (32) видно, что вторая гармоника обусловлена несимметрией ротора ($x_q \neq x'_d$). Ее возникновение вызвано аperiodической слагающей тока статора, что непосредственно следует из простых физических представлений. В самом деле, поскольку магнитный поток от аperiodической слагающей токов трех фаз статора практически неподвижен в пространстве, в обмотке возбуждения он наводит э.д.с. синхронной частоты, которая создает в этой обмотке переменный ток той же частоты. В результате возникает пульсирующий магнитный поток, неподвижный относительно ротора. Чтобы проще представить влияние этого потока на статор, разложим его на два вращающихся в противоположные стороны. Один из них, очевидно, неподвижен относительно статора и частично компенсирует вызвавший его поток, а другой вращается относительно статора с двойной синхронной скоростью и вызывает в нем вторую гармонику тока

Все полученные выражения справедливы при коротком замыкании как на выводах машины, так и в произвольной точке присоединенной к машине сети. В последнем случае под u_{d_0} и u_{q_0} нужно понимать составляющие предшествующего напряжения в рассматриваемой точке короткого замыкания, а к каждой из реактивностей машины должна быть прибавлена внешняя реактивность до места короткого замыкания. Аналогично в (13), а так же в (19) величина r должна включать в себя активное сопротивление внешней цепи до точки короткого замыкания. Из выражения для второй гармоники следует, что с увеличением удаленности короткого замыкания величина этой гармоники падает.

Обратимся теперь к обмотке возбуждения. Выражение для тока в ней можно получить, используя соотношение (3). Однако при ранее принятых допущениях его можно установить проще.

Для компенсации магнитного потока, созданного током $\Delta i_{d\Pi|0|}$ с целью сохранения в начальный момент предшествующего потокосцепления обмотки возбуждения в последней возникнет свободный ток i_{fa} , начальное значение которого (приведенное к статору) определяется из равенства:

$$i_{fa|0|}x_f = -\Delta i_{d\Pi|0|}x_{ad} = \frac{u_{q_0}}{x'_d}x_{ad},$$

откуда

$$i_{fa|0|} = \frac{u_{q_0}}{x'_d} \frac{x_{ad}}{x_f},$$

или

$$i_{fa|0|} = \frac{u_{q_0}}{x'_d} \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \quad (33)$$

Этот ток обмотки возбуждения, очевидно, затухает с постоянной времени T'_d . С другой стороны, как отмечалось выше, от апериодической слагающей тока статора в обмотке возбуждения наводится переменный ток практически синхронной частоты, затухающий с постоянной времени T_a . Начальное, значение этого тока должно быть равно $i_{fa|0|}$, но противоположно ему, чтобы в момент короткого замыкания в обмотке возбуждения сохранился предшествующий ток i_{f0} . Следовательно, выражение для тока в обмотке возбуждения при внезапном коротком замыкании в цепи статора будет:

$$i_f = i_{f0} + \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \frac{u_{q_0}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \frac{u_{q_0}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos t. \quad (34)$$

Следует заметить, что, в то время как ток в фазах статора при коротком замыкании зависит от значения начального угла γ_0 , ток в обмотке возбуждения не зависит от него. Это объясняется тем, что свободные токи обмотки возбуждения связаны с результирующими магнитными потоками, образуемыми соответствующими свободными токами фазных обмоток статора, и величины этих потоков не зависят от положения ротора в момент возникновения короткого замыкания.

На рис. 1 приведены кривые изменения токов статора и ротора при внезапном коротком замыкании синхронного генератора, предварительно работавшего на холостом ходу. Для большей наглядности кривых основная частота тока резко сокращена. Периодическая слагающая тока статора i_{Π} соответствует апериодической слагающей тока обмотки возбуждения i_{fa} ; в то же время апериодическая слагающая тока статора i_a обуславливает периодическую слагающую тока обмотки возбуждения $i_{f\Pi}$, а последняя

вследствие несимметрии ротора — вторую гармонику тока статора $i_{2\omega}$. Постоянная времени T'_d , как правило, значительно больше T_a .

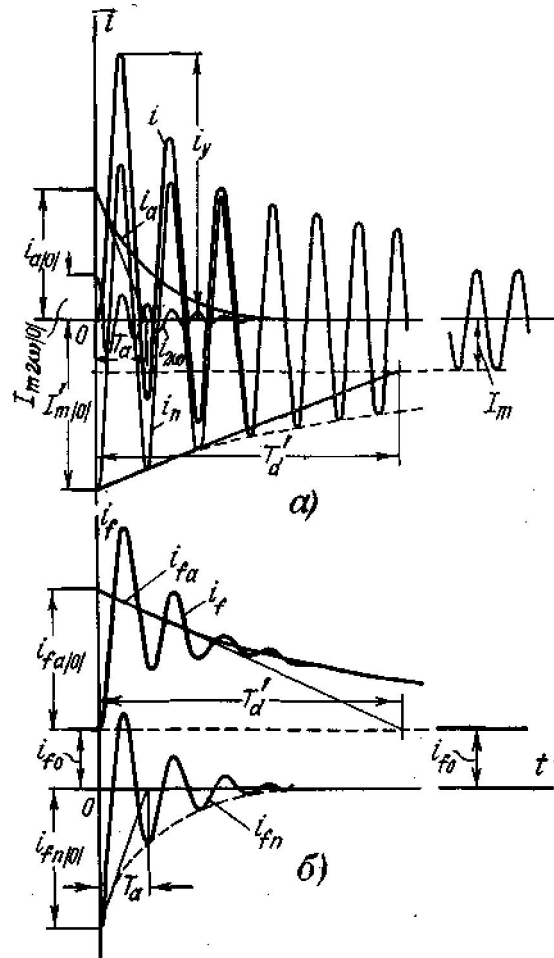


Рис. 1. Кривые изменения токов при внезапном коротком замыкании синхронной машины без демпферных обмоток, а — обмотка статора; б — обмотка возбуждения.

Пример 1. Для генератора известны следующие параметры 67 Мва; 10,5Кв; 3,68 кА; $x_d = 1.0$; $x_q = 0.6$; $x_\sigma = 0.15$; $x'_d = 0.3$; $r = 0.83 \cdot 10^{-2}$ ом; $T_{f0} = 5$ сек, ток возбуждения холостого хода 450 А. Генератор работает на холостом ходу с номинальным напряжением; его АРВ отключено.

Для случая внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах генератора требуется построить кривые изменения мгновенных значений токов статора и обмотки возбуждения, а также кривые изменения действующего значения полного тока статора в начальной стадии процесса короткого замыкания. Определить также максимальное мгновенное значение напряжения на кольцах ротора.

Решение.

Расчет проведем в относительных единицах при номинальных условиях генератора и лишь некоторые конечные результаты выразим в именованных единицах.

Согласно заданному условию $E'_{q0} = E_{q0} = U_0 = 1$. При этом будем иметь:

$$I'_{|0|} = \frac{1}{0.3} = 3.33; I = \frac{1}{1} = 1;$$

начальное значение апериодической слагающей тока статора (при $\gamma_0 = 0$), с учетом того, что $u_{q0} = U_{q0}$, будет:

$$i_{a|0|} = \frac{U_{q0}(x_q + x'_d)}{2x_q x'_d} = \frac{1(0.6 + 0.3)}{2 \cdot 0.6 \cdot 0.3} = 2.5;$$

начальная амплитуда второй гармоники тока статора

$$I_{m2\omega} = \frac{U_{q0}(x_q - x'_d)}{2x_q x'_d} = \frac{1(0.6 - 0.3)}{2 \cdot 0.6 \cdot 0.3} = 0.83.$$

Величина реактивности

$$x_2 = \frac{2x_q x'_d}{x_q + x'_d} = \frac{2 \cdot 0.3 \cdot 0.6}{0.3 + 0.6} = 0.4;$$

относительная величина активного сопротивления статора

$$r = 0.83 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{67}{10.5^2} = 0.005.$$

Значения постоянных времени:

$$T_a = \frac{x_2}{\omega r} = \frac{0.4}{314 \cdot 0.005} = 0.255 \text{ сек}$$

и

$$T'_d = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d} = 5 \cdot \frac{0.3}{1} = 1.5 \text{ сек.}$$

Выражение для мгновенного значения тока фазы A (при $\gamma_0 = 0$) будет:

$$i_A = \left(2.33e^{-\frac{t}{1.5}} + 1 \right) \cos \omega t - (2.5 + 0.83 \cos 2\omega t) e^{-\frac{t}{0.255}},$$

где начальный свободный переходный ток

$$I'_{c\phi|0|} = I'_{|0|} - I = 3.33 - 1 = 2.33.$$

Относительный ток возбуждения, приведенный к статору, будет:

$$\overset{\circ}{I}_{f0} = \frac{I_{f0}}{x_{ad}} = \frac{1}{1.0 - 0.15} = \frac{1}{0.85} = 1.18.$$

Для мгновенного значения тока в обмотке возбуждения имеем:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{i}_f &= \overset{\circ}{I}_f + \frac{(x_d - x'_d)}{x_{ad}} \cdot \frac{U_{q0}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{(x_d - x'_d)}{x_{ad}} \cdot \frac{U_{q0}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t = \\ &= 1.18 + \frac{1 - 0.3}{0.85} \cdot \frac{1}{0.3} e^{-\frac{t}{1.5}} - \frac{1 - 0.3}{0.85} \cdot \frac{1}{0.3} e^{-\frac{t}{0.225}} \cos \omega t = 1.18 + 2.74e^{-\frac{t}{1.5}} - 2.74e^{-\frac{t}{0.225}} \cos \omega t \end{aligned}$$

По этим выражениям построены кривые, представленные на рис. 2,а и ,а. Для статора они даны только для первых нескольких периодов, а для обмотки возбуждения — до 3 сек, причем для большей наглядности период слагающей $i_{f\text{п}}$ резко увеличен, хотя огибающая по ее максимальным мгновенным значениям сохранена в правильном масштабе.

Для ударного тока короткого замыкания имеем:

$$i_y = 2.33e^{-\frac{0.01}{1.5}} + 1 + (2.5 + 0.83)e^{-\frac{0.01}{0.255}} = 6.52,$$

или

$$i_a = \sqrt{2} \cdot 3.68 \cdot 6.52 = 34 \text{ кА}$$

Ударный коэффициент составляет:

$$k_y = 6.52 / 3.33 = 1.90.$$

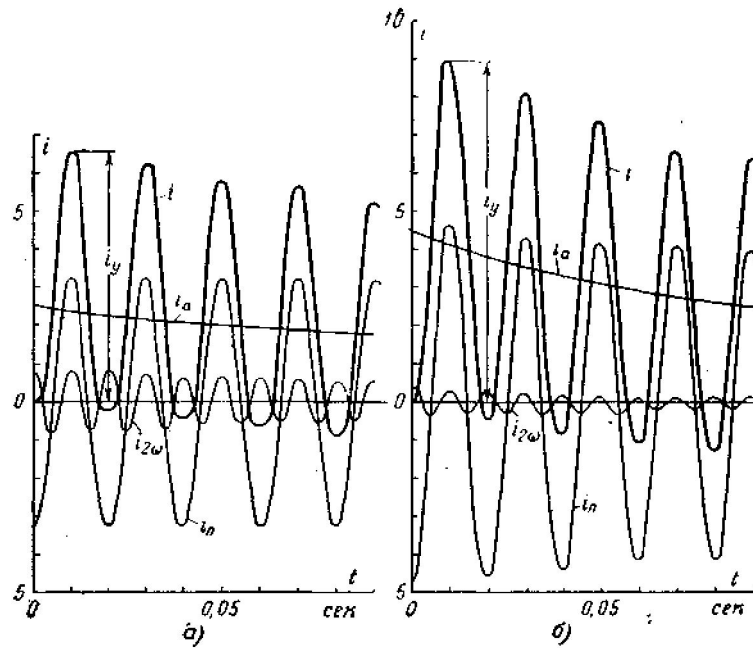


Рис. 2. К примерам 1 и 2. Кривые изменения тока статора синхронной машины при внезапном коротком замыкании, а— при отсутствии демпферных обмоток; б— при наличии демпферных обмоток.

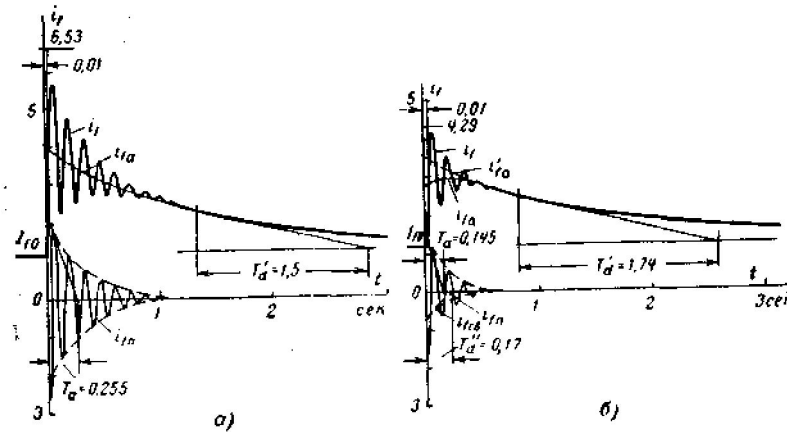


Рис. 3. К примерам 1 и 2. Кривые изменения тока возбуждения синхронной машины при внезапном коротком замыкании, а - при отсутствии демпферных обмоток; б — при наличии демпферных обмоток.

Для действующего значения полного тока статора (в относительных единицах):

$$I_t = \sqrt{\left(I'_{ce|0|} e^{-\frac{t}{T_d'}} + I \right)^2 + \left(I_{2\omega} e^{-\frac{t}{T_a}} \right)^2 + 2 \left(I_{a|0|} e^{-\frac{t}{T_a}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(2.33 e^{-\frac{t}{1.5}} + 1 \right)^2 + (0.83^2 + 2 \cdot 2.5^2) e^{-\frac{2t}{0.255}}} = \sqrt{1 + 4.66 e^{-0.67t} + 5.4 e^{-1.34t} + 13.2 e^{-7.35t}}.$$

Если не выделять вторую гармонику, а считать, что только одна аperiodическая слагающая полностью уравнивает начальную амплитуду периодической слагающей (т. е. $I'_a = 3.33$), то третьего слагаемого под радикалом не будет, а коэффициент перед последним слагаемым будет 22 (вместо 13,2), что приводит к завышению определяемой величины тока.

По вычисленным для нескольких моментов времени величинам действующих значений токов статора построены кривые 1, 2 и 3, представленные на рис. 4.

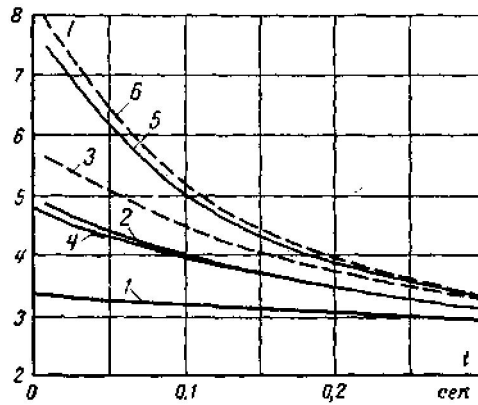


Рис. 4. К примерам 1 и 2. Кривые изменения действующего значения тока статора.

1 — периодической слагающей тока; 2 — полного тока с учетом второй гармоники; 3 — то же, но без учета второй гармоники с соответствующим увеличением аperiodической слагающей тока при отсутствии демпферных обмоток; 4, 5 и 6 — то же, но при наличии демпферных обмоток.

Для определения напряжения на кольцах ротора предварительно найдем активное сопротивление обмотки возбуждения. Из выражения для T_{f0} для относительной величины этого сопротивления, приведенного к статору, имеем:

$$r_f = \frac{x_f}{\omega T_{f0}} = \frac{1.03}{314 \cdot 5} = 0.655 \cdot 10^{-3},$$

где реактивность обмотки возбуждения

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d} = \frac{0.85^2}{1.0 - 0.3} = 1.03.$$

Во взаимной системе относительных единиц базисный ток в цепи возбуждения должен быть

$$I_{f\sigma} = I_{fx} x_{ad} = 450 \cdot 0.85 = 380 A;$$

а

$$S_{f\sigma} = S_{\sigma} = 67 MVA$$

следовательно,

$$U_{f\sigma} = \frac{67}{0.38} = 175 kV$$

Действительная величина активного сопротивления обмотки возбуждения в именованных единицах составляет:

$$r_f = 0.655 \cdot 10^{-2} \cdot 176^2 / 67 = 0.304 \Omega.$$

Максимальное мгновенное значение тока в обмотке возбуждения, выраженное в относительных единицах, при которых задается характеристика холостого хода, будет:

$$I_f = I_f^{\circ} x_{ad} = 6.52 \cdot 0.85 = 5.55$$

Или

$$I_f = 5.55 \cdot 450 = 2500 A$$

Напряжение на кольцах ротора при холостом ходе $U_{fx.x} = 0.304 \cdot 450 = 137 B$; искомое максимальное мгновенное значение при коротком замыкании $U_{f.max} = 0.304 \cdot 2500 = 760 B$.

14.2 Влияние систем возбуждения и гашения магнитного поля на характер переходного процесса в синхронной машине

При повреждениях внутри электрической машины или на участке от ее выводов до ближайшего отключающего аппарата единственным средством прекращения тока в этой машине является ее развозбуждение или, иными словами, **гашение ее магнитного поля**. Обмотка возбуждения крупной синхронной машины обладает большим запасом электромагнитной энергии, и быстрое поглощение последней представляет сложную задачу.

Обычный **полный разрыв цепи возбуждения опасен**, так как вследствие большой индуктивности обмотки возбуждения на ее выводах возникает **перенапряжение**, способное вызвать пробой изоляции данной обмотки. Поэтому гашение поля осуществляют путем переключения обмотки возбуждения на так называемое **разрядное сопротивление** или **на встречно направленную э. д. с.** Аппарат, производящий такие функции, называют **автоматом гашения поля (АГП)**.

Устройство гашения поля должно удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) время гашения поля $t_{\text{гаш}}$ должно быть возможно меньшим;
- 2) напряжение на выводах обмотки возбуждения при гашении поля не должно превышать того напряжения, которое является допустимым для изоляции этой обмотки.

Под **временем гашения поля** понимают **время с начала гашения поля до момента, когда э. д. с. статора спадает до величины, при которой происходит естественное погасание дуги переменного тока**. Эта величина составляет примерно $500/\sqrt{2} = 350$ в. Принимая в среднем наводимую за счет остаточного магнетизма ротора э. д. с. равной 200 в, можно считать, что гашение поля практически закончено, когда наводимая током ротора э. д. с. спадет приблизительно до $350 - 200 = 150$ в.

Для обеспечения известной надежности величину допустимого напряжения принимают:

$$U_{\text{дон}} \leq 0,7 U_{\text{исп}} \quad (1)$$

где $U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение для данного класса изоляции обмотки возбуждения; оно находится в пределах 1 500—5 000 в.

В настоящее время существует много различных способов гашения поля. Однако ниже остановимся лишь на двух из них, которые получили наибольшее распространение в союзной практике.

Первый состоит в разряде обмотки возбуждения на постоянное активное сопротивление. **Автомат гашения поля**, схема включения которого показана в верхней части рис. 5, имеет контакты 2, которые в нормальных условиях замкнуты, и контакты 1 — разомкнуты. При действии автомата вначале замыкаются контакты 1 и лишь затем (во избежание больших перенапряжений) происходит размыкание контактов 2. При отсутствии демпферных обмоток и разомкнутом статоре ток в обмотке возбуждения будет затухать от своего предшествующего значения i_{f0} по известной закономерности

$$i_f = i_{f0} e^{-\frac{t}{T_{\text{гаш}}}} \quad (2)$$

где постоянная времени гашения

$$T_{\text{гаш}} = \frac{L_f}{r_f + r} = T_{f0} \frac{1}{1+k}, \quad (3)$$

здесь $k = \frac{r}{r_f}$.

Хотя $T_{\text{гаш}} < T_{f0}$, тем не менее влияние трансформаторной э. д. с, возникающей вследствие затухания тока, весьма мало и с этой э. д. с. можно практически не считаться.

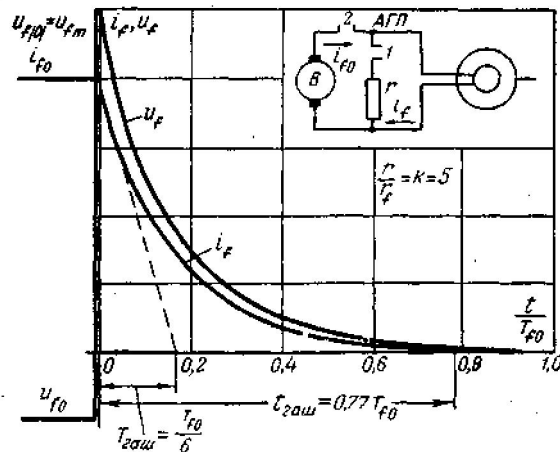


Рис. 5. Гашение поля переключением обмотки возбуждения на постоянное разрядное сопротивление.

Напряжение на обмотке возбуждения u_f пропорционально току i_f . Считая действие контактов 1 и 2 одновременным, его наибольшая величина u_{fm} наступает в момент включения ($t = 0$) разрядного сопротивления и связана с предшествующим значением этого напряжения простым соотношением:

$$u_{fm} = u_{f(0)} = \frac{r}{r_f} u_{f0} = k u_{f0} \quad (4)$$

Чтобы ускорить гашение поля, нужно увеличить разрядное сопротивление, однако по условию допустимого повышения напряжения это сопротивление не должно выходить за пределы $r = (3 \div 5) r_f$.

Для ненасыщенной машины имеем:

$$\frac{\Phi_{d0}}{\Phi_{\text{гаш}}} = \frac{E_{q0}}{E_{\text{гаш}}} = \frac{i_{f0}}{i_{\text{гаш}}} = N \quad (5)$$

где $i_{\text{гаш}}$ — ток возбуждения, создающий $E_{\text{гаш}} = 150 \text{ В}$, при которой гаснет дуга переменного тока. Из (5) и (2) с учетом (3) находим выражение для времени гашения:

$$t_{\text{гаш}} = T_{f0} \frac{1}{1+k} \ln N \quad (6)$$

Так, например, для генератора, работающего с напряжением 15 кВ, кратность уменьшения $N = 15/0,15 = 100$ и время гашения при $k = 5$ по (6) составляет $t_{\text{гаш}} = 0.77 T_{f0}$.

Для этих условий на рис. 5 приведены кривые изменения i_f и u_f в функции t/T_{f0} . Отметим, что при гашении поля напряжение u_f меняет свой знак по сравнению с предшествующим.

Если статор замкнут через реактивность x_{BH} , то в предыдущих выражениях вместо T_{f0} нужно ввести T'_f , определяемую как

$$T'_f = T_{f0} \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_d} \right) = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d}$$

В этом случае процесс гашения протекает быстрее, но значение тока i_{f0} , очевидно, больше, чем при холостом ходе. Поэтому заранее нельзя сказать, при каком

предшествующем режиме гашение поля будет эффективнее. Наибольшая величина напряжения u_{fm} , разумеется, будет при предшествовавшей работе машины с отстающим по фазе током или когда гашение осуществляется в течение какого-либо переходного процесса.

Существенным недостатком рассматриваемого способа гашения поля является быстрое снижение скорости затухания тока в цепи возбуждения, что удлиняет процесс гашения.

Можно установить **оптимальные условия** гашения поля, при которых обеспечивается возможная наименьшая продолжительность процесса гашения, а напряжение на обмотке возбуждения в течение всего процесса гашения не превышает допустимого значения. Пренебрегая r по сравнению с r_f , для указанных условий имеем простое уравнение

$$L_f \frac{di_f}{dt} + ri_f = L_f \frac{di_f}{dt} + U_{don} = 0$$

которое после интегрирования дает:

$$i_f = i_{f0} - \frac{U_{don}}{L_f} t \quad (7)$$

Таким образом, ток i_f должен уменьшаться по линейному закону; при этом время гашения (до $i_f = 0$) будет:

$$t_{zau} = \frac{L_f}{U_{don}} i_{f0} = T_{f0} \frac{1}{k} \quad (8)$$

т. е. оно в $\left(\frac{k}{1+k} \ln N\right)$ раз меньше, чем при гашении на постоянное разрядное сопротивление.

На рис. 6 показаны закономерности, отвечающие оптимальным условиям гашения поля. Для достижения их необходимо, чтобы разрядное сопротивление r изменялось от своего начального значения r_0 обратно пропорционально току i_f . С этой целью разные авторы предлагают использовать в качестве разрядных сопротивлений сопротивления с нелинейными характеристиками (например, выполненные из карборунда и др.).

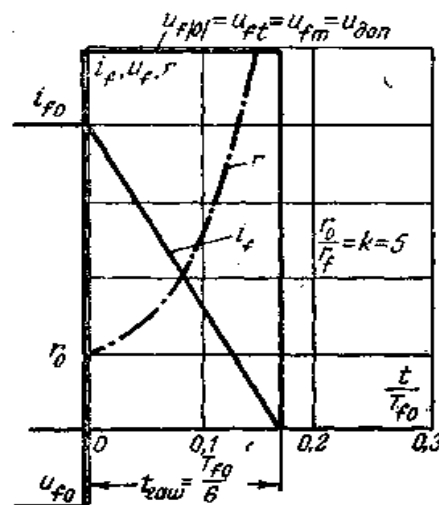


Рис. 8. Оптимальные условия гашения поля.

При подходе тока к нулю часто наблюдается так называемый срыв тока, т. е. внезапное прекращение его. При большой индуктивности обмотки возбуждения

синхронной машины это сопровождается резким возрастанием напряжения на обмотке. Для ограничения перенапряжения дугогасящая решетка шунтирована относительно большим сопротивлением $r_{шд}$, причем, чтобы дуга гасла по частям, а не вся сразу, решетка разбита на секции, которые присоединены к промежуточным ответвлениям этого сопротивления.

Из способов включения дугогасящей решетки предпочтительным является последовательное включение дугогасящей решетки.

Считая напряжение возбuditеля u_B (практически равное предшествующему напряжению на кольцах ротора u_{f0}) неизменным, для цепи возбуждения в схеме рис. 8-7,6 при гашении поля имеем:

$$L_f \frac{di_f}{dt} + r_f i_f + u_D = u_B = u_{f0}$$

где $u_D = 30n$ — напряжение на решетке (из n пластин) при горении дуги, в.

Интегрирование этого уравнения приводит к выражению для тока:

$$i_f = i_{f0} - \frac{u_D}{r_f} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right) \quad (9)$$

Напряжение на дугогасящей решетке

$$u_D = (1 + k) u_{f0} \quad (10)$$

где

$$k = \frac{r}{r_f} = \frac{u_{fm}}{u_{f0}}$$

поэтому выражение (9) можно представить в иной форме:

$$i_f = i_{f0} \left[(1 + k) e^{-\frac{t}{T_{f0}}} - k \right] \quad (11)$$

Из структуры (9) непосредственно следует, что включение дугогасящей решетки эквивалентно внезапному включению в цепь обмотки возбуждения постоянной э. д. с, равной u_D и направленной против u_B . При этом нужно иметь в виду, что (9) и (11) справедливы лишь в течение времени горения дуги, которое при отсутствии демпферных обмоток является также временем гашения поля $t_{гаш}$. Это время легко найти из (11) при $i_f = 0$

$$t_D = t_{гаш} = T_{f0} \ln \frac{1+k}{k} \quad (12)$$

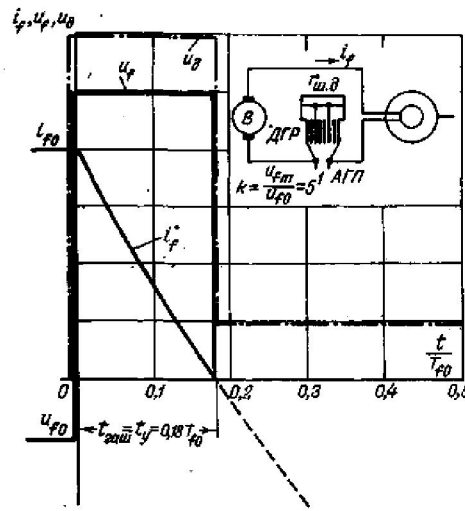


Рис.8 Гашение магнитного поля с помощью дугогасительной решетки

Закономерности изменения i_f , u_f и u_d в функции t/T_{f0} при рассматриваемом способе гашения поля представлены на рис. 8. Они построены, как и кривые рис. 5, при $k = 5$. Время гашения по (12) составляет $t_D = t_{зам} = 0.18T_{f0}$, т. е. оно в $0.77/0.18 = 4.3$ раза меньше, чем при гашении с помощью постоянного разрядного сопротивления, при котором соблюдается то же значение u_{fm} .

Кривая изменения тока i_f заканчивается при пересечении с осью абсцисс, т. е. при $t_D = t_{зам}$; пунктиром показано ее продолжение, соответствующее (9) или (11). Напряжение на дугогасящей решетке при горении дуги постоянно и равно $(1+k)u_{f0} = 6u_{f0}$; после погасания дуги оно падает до напряжения возбудителя. Напряжение на обмотке возбуждения при возникновении дуги, меняя знак, увеличивается до $ku_{f0} = 5u_{f0}$ и при погасании ее падает до нуля.

Теперь рассмотрим, как сказывается наличие демпферных обмоток на процессе гашения поля.

Поперечная демпферная обмотка не имеет магнитной связи с обмотками в продольной оси ротора, поэтому не оказывает влияния на процесс гашения поля.

Наличие продольной демпферной обмотки прежде всего скажется в том, что затухание потока Φ_d и обусловленной им э. д. с. статора будет происходить с большей постоянной времени; постоянная времени практически равна сумме постоянных времени продольной демпферной обмотки и обмотки возбуждения с учетом введенного в нее разрядного сопротивления, т. е.

$$T_{зам} = T_{ld0} + T_{f0} \frac{1}{1+k} \quad (13)$$

и время гашения согласно (6)

$$t_{зам} = \left(T_{ld0} + T_{f0} \frac{1}{1+k} \right) \ln N = T_{зам} \ln N \quad (14)$$

т. е. оно больше, чем при отсутствии продольной демпферной обмотки, что является, конечно, нежелательным. С другой стороны, продольная демпферная обмотка в процессе гашения принимает на себя часть энергии магнитного поля ротора, чем облегчает условия для обмотки возбуждения и включенного в ее цепь автомата гашения поля.

Легко найти, что при $\sigma = 0$ ток в обмотке возбуждения мгновенно падает до

$$i_{f|0} = \frac{T_{f0}}{T_{ld0} + T_{f0}} i_{f0} \quad (15)$$

затем затухает по экспоненте с постоянной времени $T_{\text{заш}}$, определяемой по (13). В продольной демпферной обмотке, напротив, ток мгновенно возрастает; его начальное значение, приведенное к обмотке возбуждения, будет:

$$i_{1d|0} = \frac{T_{1d0}}{T_{1d0} + T_{f0}} i_{f0} \cdot (16)$$

а далее затухает с той же закономерностью.

В действительности $\sigma > 0$ и соответственно T_d'' , поэтому внезапных изменений токов не происходит. Они сглаживаются быстро-затухающими токами i_f'' и i_{1d}'' .

При гашении поля дугогасящей решеткой проявление демпферных обмоток имеет более сложный характер. Весь процесс в данном случае состоит из двух основных стадий: первой, когда в решетке горит дуга и соответственно ток проходит как в обмотке возбуждения, так и в демпферной обмотке, и второй, когда дуга погасла ($i_{f0} = 0$), но ток в демпферной обмотке еще не затух. Следовательно, после разрыва цепи возбуждения магнитный поток машины поддерживается током демпферной обмотки. По этой причине время гашения поля $t_{\text{заш}}$ больше времени горения дуги t_d . Приведем окончательные выражения, позволяющие найти токи в обмотках ротора машины, время горения дуги и время гашения поля.

Ток в обмотке возбуждения (для $0 \leq t \leq t_d$)

$$i_f = i_{f0} \left[(1+k) \frac{T_{f0}}{T_{\text{заш}}} e^{-\frac{t}{T_{\text{заш}}}} - k \right] (17)$$

Ток в продольной демпферной обмотке на первой стадии $0 \leq t \leq t_d$

$$i_{1d} = i_{f0} \left[(1+k) \frac{T_{1d0}}{T_{\text{заш}1}} e^{-\frac{t}{T_{\text{заш}1}}} \right] (18)$$

на второй стадии ($t > t_d$)

$$i_{1d} = i_{f0} k \frac{T_{1d0}}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{1d0}}} (19)$$

Время горения дуги [из (17) при $i_f = 0$]

$$t_d = T_{\text{заш}} \ln \left(\frac{1+k}{k} \frac{T_{f0}}{T_{\text{заш}}} \right) (20)$$

при значениях k близких к значению отношения $\frac{T_{f0}}{T_{1d0}}$, более точным является выражение:

$$t_d = \frac{1}{1+k} \frac{(x_f - x_{ad})}{x_f} T_{f0} = \frac{1}{1+k} \left(1 - \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \right) T_{f0} (20a)$$

Время гашения поля

$$t_{\text{заш}} = t_d + T_{1d0} \ln \left(Nk \frac{T_{1d0}}{T_{f0}} \right) (21)$$

Изменение магнитного потока Φ_d на первой стадии гашения определяется изменением н.с. ротора, т. е. суммы приведенных токов обмотки возбуждения и продольной демпферной обмотки, что приводит к выражению

$$\Phi_d = \Phi_{d0} \left[(1+k) e^{-\frac{t}{T_{\text{зам1}}}} - k \right] \quad (22)$$

а на второй стадии — изменением только тока продольной демпферной обмотки, т. е.

$$\Phi_d = \Phi_{d02} k \frac{T_{1d0}}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{1d0}}} \quad (23)$$

где Φ_{d02} — поток в начале второй стадии.

Пример

Для турбогенератора типа ТВ2-100-2 известны следующие параметры: 100 МВт, 13,8 кВ, $x_\sigma = 0,11$; $x_d'' = 0,138$; $x_d' = 0,203$; $x_d = 1,8$; $x_f = 1,78$; $x_{1d} = 1,73$; $T_{f0} = 9,75$ сек; $T_{1d0} = 3,25$ сек; $r_f = 0,415$ ом (при горячем состоянии обмотки); ток возбуждения при холостом ходе 270 А, то же при номинальной нагрузке 650 А; испытательное напряжение обмотки возбуждения 3 200 В.

Определим время гашения поля этого турбогенератора при использовании: а) постоянного разрядного сопротивления и б) дугогасящей решетки.

Решение выполним для условий, когда статор замкнут накоротко и возбуждение имеет двукратную форсировку (относительно номинального режима).

а) Гашение на разрядное сопротивление

Напряжение на обмотке возбуждения в предшествующем режиме

$$u_{f0} = 0,415(2 \cdot 650) = 540 \text{ В}.$$

Допустимое напряжение согласно (1)

$$U_{\text{доп}} = 0,7 \cdot 3200 = 2240 \text{ В}.$$

Необходимое разрядное сопротивление из (4)

$$r = \frac{2240}{540} r_f = 4,15 r_f$$

Постоянные времени при короткозамкнутом статоре:

$$T_f' = 9,75 \frac{0,203}{1,8} = 1,1 \text{ с}$$

$$T_{1d}' = 3,25 \left(1 - \frac{1,69^2}{1,73 \cdot 1,8} \right) = 0,27 \text{ с}; (x_{ad} = 1,8 - 0,11 = 1,69)$$

По (13) постоянная времени гашения поля

$$T_{\text{зам}} = 0,27 + 1,1 \frac{1}{1 + 4,15} = 0,48 \text{ с}$$

Ток возбуждения, при котором гаснет дуга переменного тока,

$$i_{f\text{зам}} = 270 \frac{0,15}{13,8} = 3 \text{ А}$$

Следовательно,

$$N = (2 \cdot 650) / 3 = 434$$

и время гашения по (14)

$$t_{\text{зам}} = 0,48 \ln 434 = 2,9 \text{ с}$$

б) Гашение на дугогасящую решетку

Допустимое напряжение на решетке:

$$u_d = U_{\text{доп}} + u_{f0} = 2240 + 540 = 2780 \text{ В}$$

Необходимое число пластин в решетке

$$n = 2780 / 30 = 93$$

Принимаем к установке два автомата АГП-12, каждый из которых имеет 40 пластин. При их последовательном соединении число пластин составляет $2 \cdot 40 = 80$; тогда напряжение на решетке

$$u_d = 30 \cdot 80 = 2400 \text{ В}$$

и

$$k = (2400 - 540) / 540 = 3.4$$

Постоянные времени гашения:

$$\text{при горении дуги } T_{\text{гаш1}} = 0,27 + 1,1 = 1,37 \text{ с};$$

$$\text{после ее погасания } T_{\text{гаш2}} = 0,27 \text{ с}.$$

Время горения дуги определяем по (20а), учитывая, что статор короткозамкнут:

$$t_d = \frac{1}{1 + 3,4} \frac{(1,78 - 1,69)}{1,78} 1,1 = 0,013 \text{ с}$$

время гашения поля находим по (21), учитывая, что статор короткозамкнут:

$$t_{\text{гаш}} = 0,013 + 0,27 \ln \left(325 \cdot 3,4 \cdot \frac{0,27}{1,1} \right) = 1,53 \text{ с}.$$

15 Метод типовых кривых

Когда задача ограничена нахождением тока в месте короткого, замыкания или статочного напряжения непосредственно за аварийной ветвью, для проведения соответствующего расчета в течение многих лет широко используется так называемый метод типовых кривых. Причиной этого является его относительная простота и в большинстве случаев достаточная точность (в рамках указанной задачи).

Данный метод основан на применении специальных кривых, которые дают для произвольного момента процесса короткого замыкания при различной расчетной реактивности схемы относительные значения периодической слагающей тока в месте короткого замыкания. Построение таких кривых произведено применительно к простейшей схеме рис. 1, где принято, что генератор предварительно работал с (номинальной нагрузкой (при $\cos \varphi = 0.8$)). Соответственно этому сама нагрузка учтена относительным сопротивлением $z_H = 0.8 + j0.6$, которое считалось неизменным в течение

всего процесса короткого замыкания. Ветвь с реактивностью x_k , за которой предполагается трехфазное короткое замыкание, предварительно была не нагружена.

Для средних значений параметров генератора и при различной удаленности короткого замыкания в схеме рис. 1 вычислены относительные величины периодической слагающей тока в месте короткого замыкания. По полученным результатам построены типовые кривые, представляющие изменение относительной величины периодической слагающей тока в месте короткого замыкания для разных значений расчетной реактивности $x_{\text{расч}}$ в зависимости от времени t (рис. 2) или для различных значений t в зависимости от $x_{\text{расч}}$.

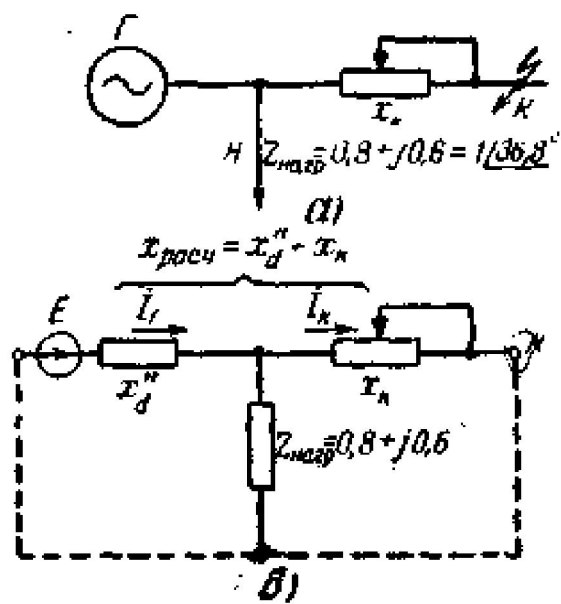


Рис. 1. Схема, принятая при построении типовых кривых.
а —исходная схема; б —схема замещения -

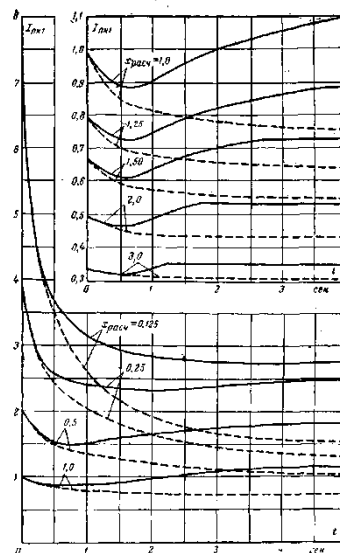


Рис. 2, Типовые кривые для турбогенератора средней мощности

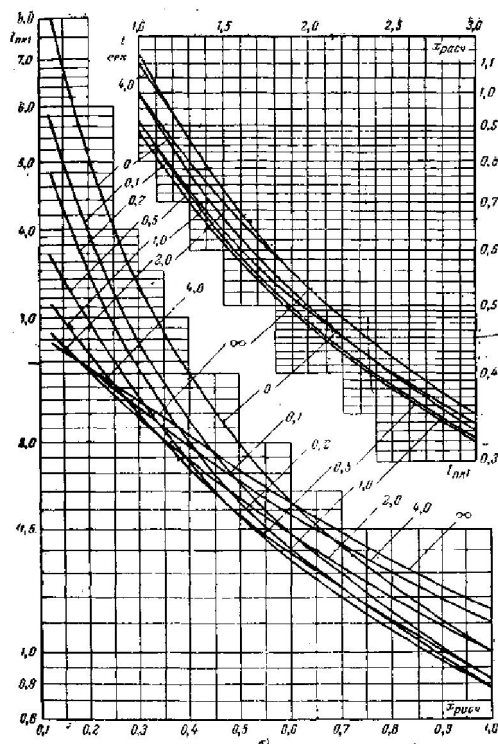


Рис. 3. Типовые кривые для турбогенератора средней мощности

В первом варианте расчетные кривые нагляднее отражают характер изменения тока при разной удаленности короткого замыкания, но при пользовании ими приходится чаще прибегать к менее точному интерполированию. Поэтому в большинстве литературных источников и в справочниках расчетные кривые обычно приводят выполненными по ихорому варианту.

Таблица 1
Параметры типовых генераторов средней мощности

Таблица 1

Наименование параметров	Турбогенератор	Гидрогенератор	
		с демпферными обмотками	без демпферных обмоток
Реактивность x''_d , отн.ед.	0,125	0,20	0,27
То же x''_q , отн.ед.	0,175	0,30	0,65
" " x'_d , отн.ед.	0,21	0,30	0,30
" " x_d , отн.ед.	1,72	1,00	1,00
" " x_q , отн.ед.	1,72	0,65	0,65
" " x_q , отн.ед.	0,11	0,17	0,17
Отношение к.з. K_c	0,70	1,06	1,06
Постоянная времени T_{f0} , сек.	7,00	5,00	5,00
То же T_ϕ , сек.	0,57	0,57	0,57
Ток возбуждения при номинальной нагрузке I_{fd} , отн.ед.	2,26	1,80	1,80
Предельный ток возбуждения, $I_{fпр}$, отн.ед.	3,96	3,15	3,15
Характеристика холостого хода	Стандартная		

Под расчетной реактивностью принята сумма реактивностей $x_{расч} = x''_d + x_k$, т. е. в ней не отражено наличие нагрузки в схеме, чем в сущности и определяется методика пользования типовыми кривыми. Приведенные на рис. 2 и 3 типовые кривые соответствуют типовым генераторам средней мощности (до 50—100 Мвт).

Значения тока и $x_{расч}$ выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора. По мере увеличения расчетной реактивности (или удаленности короткого замыкания) различие между токами во времени, как видно, становится все меньше. Это позволяет практически считать, что при $x_{расч} > 3$ периодическая слагающая тока короткого замыкания остается неизменной и равной своему начальному значению. На рис. 2 проведены пунктирные линии, которые для сравнения дают те же закономерности при отсутствии АРВ у генераторов. Следует также отметить, что с увеличением $x_{расч}$ различие в типах генераторов сказывается все меньше и уже при $x_{расч} \geq 1$ типовые кривые для генераторов разных типов почти совпадают.

Принятый способ построения расчетных кривых устанавливает простую методику их применения. В самом деле, для нахождения по ним значения тока короткого замыкания в произвольный момент времени достаточно определить $x_{расч}$ относительно рассматриваемой точки короткого замыкания, используя схему для начального момента, причем нагрузки в последнюю не должны входить; это значительно упрощает решение. При этом, как следует из самого построения типовых кривых найденное по ним значение тока получается с учетом влияния нагрузки. Такой косвенный учет нагрузки, конечно, не может претендовать на большую точность, но все же он приводит к более правильным результатам, чем если бы нагрузкой совсем пренебречь. Что касается той нагрузки, которая в действительности может быть подключена непосредственно к точке короткого замыкания, то ее учет можно произвести отдельно.

Распространение метода типовых кривых на сложные схемы с большим числом генераторов по существу соответствует допущению, что все участвующие в схеме генераторы могут быть заменены одним генератором суммарной номинальной мощности, поставленным в некоторые средние условия по отношению к точке короткого замыкания. Ошибка от такой замены зависит от того, в какой мере реальные условия отдельных генераторов отличаются от указанных средних. На этом вопросе ниже остановимся более подробно, а сейчас проследим порядок выполнения расчета при замене всех генераторов

одним генератором суммарной мощности или, как говорят, по общему изменению. Этот порядок состоит в следующем:

1) Для заданной системы составляют схему замещения, в которую генераторы вводят своими x_d'' ; нагрузки в ней должны отсутствовать, за исключением крупных двигателей и синхронных компенсаторов (в особенности расположенных вблизи места короткого замыкания), которые рассматриваются как генераторы равновеликой мощности. Поскольку метод достаточно приближен, схему замещения целесообразно составлять упрощенно. Никаких э. д. с. в схему замещения вводить не нужно.

2). Постепенным преобразованием схемы замещения (или замером на расчетной модели) находят ее результирующую реактивность x_Σ относительно места короткого замыкания.

3) Для определения расчетной реактивности $x_{расч}$ найденную реактивность x_Σ выражают в относительных единицах при суммарной номинальной мощности генераторов

$$S_{H\Sigma} = \sum_{i=1}^m S_{Hi}, \text{ Mва,}$$

участвующих в питании короткого замыкания, т. е. если x_Σ выражено в омах при U_{CP} , Кв, то

$$x_{расч} = x_\Sigma \frac{S_{H\Sigma}}{U_{CP}^2};$$

соответственно, если x_Σ выражено в относительных единицах при S_σ , то

$$x_{расч}^* = x_\Sigma^* \frac{S_{H\Sigma}}{S_\sigma};$$

4) Выбирают соответствующие расчетные кривые, по которым, исходя из полученной реактивности $x_{расч}$, находят (иногда интерполируя) для интересующих моментов времени относительные величины тока $I_{*нк,t}$.

При $x_{расч} > 3$ эту величину тока для всех моментов времени определяют как

$$I_{*нк,t} = 1 / x_{расч};$$

5) Находят искомую величину периодической слагающей тока короткого замыкания для каждого момента:

$$I_{нк,t} = I_{*нк,t} \dot{I}_{H\Sigma}, \text{ кА,}$$

где $\dot{I}_{H\Sigma} = \frac{S_{H\Sigma}}{\sqrt{3}U_{CP}}$ — суммарный номинальный ток генераторов, приведенный к напряжению U_{CP} той ступени, где рассматривается короткое замыкание. При $x_{расч} > 3$, очевидно,

$$I_{нк,t} = \dot{I}_{H\Sigma} / x_{расч};$$

причем здесь вместо $\dot{I}_{H\Sigma}$ и $x_{расч}$ могут быть использованы также соответственно I_σ и $x_{*\Sigma(\sigma)}$, т. е. значения при произвольно выбранной базисной мощности.

Поскольку при выбранных базисных условиях относительные величины тока и мощности короткого замыкания численно совпадают, типовые кривые одновременно дают значения относительной мощности короткого замыкания в произвольный момент времени.

Когда система содержит генераторы разных типов, при расчете по общему изменению может возникнуть формальное затруднение в выборе кривых. Очевидно, следует отдавать предпочтение тем генераторам, которые больше участвуют в питании короткого замыкания, т. е. находятся ближе к аварийной точке.

16 Метод спрямленных характеристик

Рассмотрим теперь метод расчета, который позволяет найти в произвольный момент переходного процесса не только ток в месте короткого замыкания, но также и распределение этого тока в схеме, что часто практически необходимо главным образом при решении вопросов релейной защиты и автоматизации электрических систем.

Когда генератор представлен своими E и x_Γ , величины которых не зависят от изменения внешних условий, периодическая слагающая тока при трехфазном коротком замыкании легко может быть определена из обычного выражения:

$$I_\Pi = \frac{E}{x_\Gamma + x_{BH}} \quad (1)$$

где x_{BH} — реактивность внешней цепи при рассматриваемой удаленности короткого замыкания.

Такое выражение используют при вычислении начальных и установившихся токов короткого замыкания, вводя в него в первом случае э. д. с. генератора E_0'' и сопротивление x_d'' , а во втором — соответственно E_{q0} или E_{qnp} (при наличии АРВ и работе генераторов в режиме предельного возбуждения) и x_d .

Естественно возникает вопрос: нельзя ли выражение (1) распространить на вычисление периодической слагающей тока в любой момент процесса короткого замыкания или, иными словами, можно ли вообще установить для генератора такие величины E_t и x_t , которые являлись бы функциями только времени с момента возникновения короткого замыкания?

Чтобы ответить на этот вопрос, достаточно вспомнить, что изменение во времени любой э. д. с. генератора определяется не только его собственными параметрами, но и реактивностью внешней цепи. Следовательно, строгие функциональные зависимости $E_t = f(t)$ и $x_t = g(t)$, которые были бы справедливы при любых внешних условиях, установить нельзя.

Ульянову С.А. совместно с Ю. Н. Баскаковым удалось показать, что для каждого момента процесса короткого замыкания можно подобрать некоторые расчетные E_t и x_t , не зависящие от внешней реактивности, которые позволяют с достаточной для практики точностью определить значение периодической слагающей тока в этот момент времени. Подбор этих расчетных E_t и x_t нагляднее всего иллюстрировать графически. Перепишем (1) в ином виде:

$$E - I_\Pi x_\Gamma = I_\Pi x_{BH} = U_\Gamma,$$

откуда следует, что в системе координат U, I ток и напряжение генератора определяются координатами точки пересечения внешней характеристики генератора $E - I_\Pi x_\Gamma = U_\Gamma$ и прямой $U_\Gamma = I_\Pi x_{BH}$.

Для генератора, имеющего в общем случае автоматическое регулирование возбуждения, внешние характеристики показаны на рис. 1.

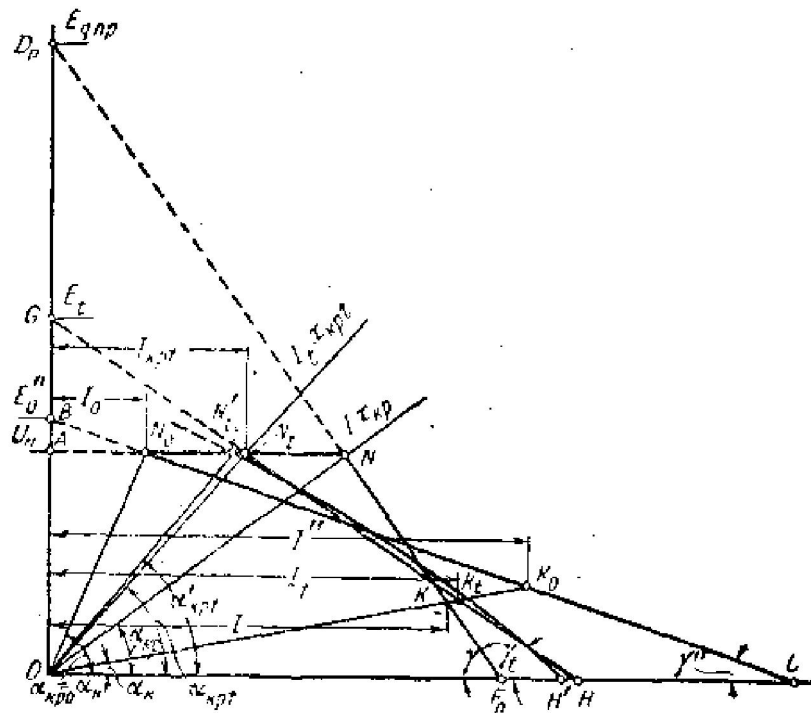


Рис. 1. К методу спрямленных характеристик.

Прямая N_0C отвечает внешней характеристике для начального момента короткого замыкания. Для установившегося режима эта характеристика, как известно, состоит из наклонного отрезка NF_{Π} (режим предельного возбуждения) и горизонтального отрезка NN_0 (режим нормального напряжения). Перелом этой характеристики (в точке N) имеет место при $x_{BH} = x_{KP}$.

Прямые N_0C и NF_{Π} отсекают на оси абсцисс отрезки, пропорциональные соответственно токам I'' и I при коротком замыкании на выводах генератора, а продолжение этих прямых до оси ординат определяет э. д. с. E_0'' и E_{qnp} . При одинаковых масштабах по обеим осям ($m_U = m_I$), очевидно,

$$\operatorname{tg} \alpha = x_{BH}$$

и

$$\operatorname{tg} \gamma = x_{\Gamma}.$$

Гиперболическая зависимость между I_{Π} и x_{BH} [согласно (1)] возможна лишь при прямолинейной внешней характеристике генератора, так как только в этом случае E и x_{Γ} неизменны. Это собственно подсказывает путь к нахождению E_t и x_t .

Допуская, что в схеме имеется один генератор, не представляет труда построить его внешнюю характеристику для произвольного момента времени процесса короткого замыкания. Для этого, задаваясь различными значениями внешней реактивности x_{BH} , достаточно по известным выражениям подсчитать ток короткого замыкания в рассматриваемый момент времени и по нему величину остаточного напряжения генератора. По полученным результатам легко построить для данного момента времени внешнюю характеристику $U_t = f(I_t)$. Пусть кривая N'_tH' на рис. 1 представляет ту часть такой характеристики, которая отвечает работе генератора при подъеме его возбуждения от действия АРВ. Ее другая часть, отвечающая работе генератора при нормальном напряжении, представляется горизонтальной прямой $N_0N'_t$. Наклон луча ON'_t

пропорционален внешней реактивности, при которой в данный момент времени t напряжение генератора уже достигает своего нормального значения. Эту реактивность можно назвать критической реактивностью для данного момента времени $x_{крт}$.

Чтобы определить искомые значения расчетной э. д. с. E_t и расчетной реактивности x_t генератора для выбранного момента времени процесса короткого замыкания, нужно соответствующую этому моменту внешнюю характеристику заменить подходящей прямой, продолжение которой до пересечения с осью ординат даст значение E_t , а ее наклон к оси абсцисс, т. е. $\operatorname{tg} \gamma_t$, — значение x_t . На рис. 1 такой заменяющей прямой является прямая $N_t H$. Она проведена так, чтобы ее отклонение от кривой $N'_t H'$ на всем диапазоне в среднем было наименьшим. Получаемые при таком спрямлении отклонения обычно не выходят за пределы $\pm(6 \div 8)\%$; при этом нет необходимости обеспечивать, чтобы прямая проходила через точки N'_t и H' . Таким путем можно найти расчетные E_t и x_t для каждого момента времени. Из изложенного понятно происхождение названия рассматриваемого метода.

Коль скоро для генератора с АРВ найдены его расчетные E_t и x_t , периодическую слагающую тока трехфазного короткого замыкания в соответствующий момент времени можно вычислить совершенно аналогично тому, как это делалось для установившегося режима короткого замыкания. Для произвольного момента можно написать:

критическая реактивность

$$x_{крт} = x_t \frac{U_H}{E_t - U_H}$$

и критический ток

$$I_{крт} = \frac{E_t - U_H}{x_t} = \frac{U_H}{x_{крт}}$$

Если внешняя реактивность $x_{вн} \leq x_{крт}$, то генератор работает в режиме подъема возбуждения должен быть введен в схему своими E_t и x_t ; если $x_{вн} \geq x_{крт}$, то генератор должен быть введен в схему "и", что соответствует его работе в режиме $E = U_H$ и $x = 0$ нормального напряжения.

Изложенный путь нахождения E_t и x_t , вообще говоря, можно использовать для каждого генератора. Однако в большинстве случаев достаточно ограничиться применением расчетных E_t и x_t , найденных для типовых машин. Для генераторов средней мощности, параметры которых указаны в табл. 1, на рис. 2 приведены семейства кривых $E_t = f(t)$ и $x_t = \varphi(t)$ при разных значениях предшествующего тока возбуждения I_{f0} . Величины E_t и x_t выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Если действительные параметры генератора существенно отличаются от типовых, при которых построены кривые рис. 2, значения E_t и x_t такого генератора приближенно могут быть найдены из выражений:

$$E_t = E_{qnp} - (E_{qnp} - E_0'') \sigma_{E_t}$$

$$x_t = x_d - (x_d - x_d'') \sigma_{x_t}$$

где E_{qnp} , E_0'' , x_d , x_d'' — соответствующие э. д. с. и реактивности данного генератора;

σ_{E_t} и σ_{x_t} — коэффициенты, значения которых определяются по кривым, приведенным на рис. 2.

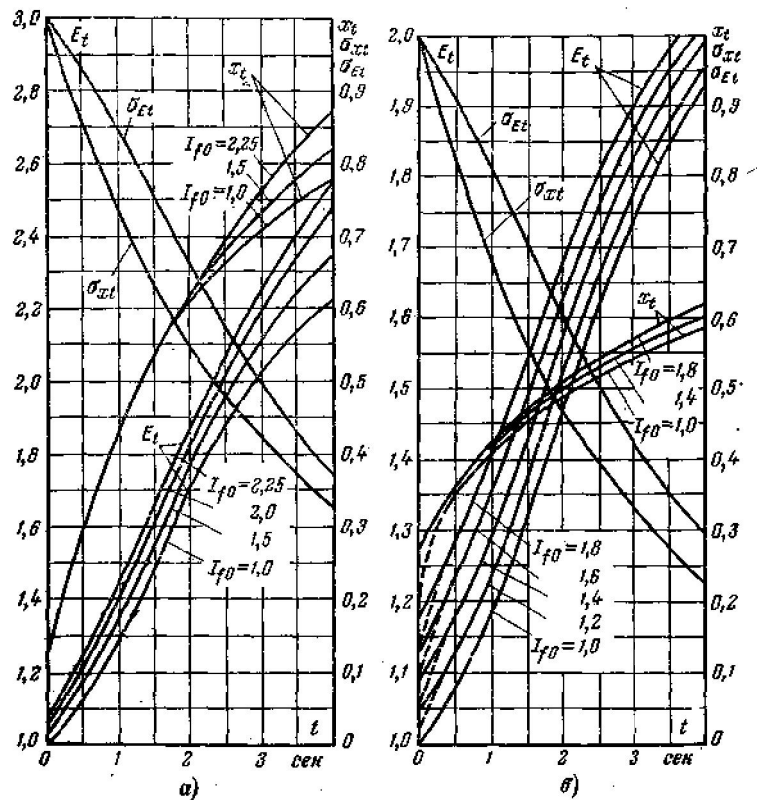


Рис. 2. Кривые для определения расчетных E_t и x_t генераторов средней мощности с автоматическим регулированием возбуждения.

а — для турбогенератора; б — для гидрогенератора (при малых временах для гидрогенератора с демпферными обмотками — пунктирные линии).

То обстоятельство, что установленные для генератора расчетные значения E_t и x_t не зависят от удаленности короткого замыкания, казалось бы, дает право использовать их для расчета процесса короткого замыкания в любой схеме с произвольным числом источников питания. Однако такое заключение было бы преждевременным. В самом деле, значения E_t и x_t получены из условий отдельной работы генератора, в то время как при параллельной работе с другими генераторами внешние характеристики в той или иной мере отличаются от тех, спрямление которых позволило установить эти значения E_t и x_t генератора. Таким образом, принципиальным и главным допущением рассматриваемого метода в его применении к сложным схемам является использование расчетных E_t и x_t , которые с небольшой погрешностью, обусловленной спрямлением внешней характеристики, справедливы лишь, для элементарной схемы (т. е. схемы с одним генератором). Тем не менее во многих случаях этот метод даже при сложной схеме позволяет с достаточной для практики точностью определить для промежуточных моментов времени не только ток в месте короткого замыкания, но также (что особенно важно) и его распределение в схеме. Это подтверждается сравнением как с результатами расчета более точными методами, так и с экспериментальными данными.

Аналогичные кривые для нахождения E_t и x_t построены также для типовых генераторов без АРВ.

Общий порядок выполнения расчета по методу спрямленных характеристик полностью идентичен порядку расчета установившегося режима короткого замыкания.

Для рассматриваемого момента t все генераторы с АРВ в зависимости от ожидаемого для них режима должны быть введены в схему либо своими E_t и x_t , либо $E = U_H$ и $x = 0$, а генераторы без АРВ — своими E_t и x_t . Для предварительной оценки возможного режима

генератора с АРВ следует сопоставить величину его x_{kpt} с внешней реактивностью схемы по отношению к данному генератору. В сложной схеме с несколькими источниками питания такая оценка может быть сделана лишь в первом приближении. Для $t \leq 0.5 \text{ сек}$, имея ввиду еще малое влияние АРВ, все генераторы с АРВ можно вводить своими E_t и x_t (т. е. считать, что они работают в режиме подъема возбуждения). Нагрузки должны быть введены в схему замещения в точках их действительного присоединения; при этом их относительная реактивность принимается равной $x_{нагр} = 1.2$, а э. д. с. $E = 0$.

После того как для заданной схемы найдены ее $E_{t\Sigma}$ и $x_{t\Sigma}$ относительно точки короткого замыкания, значение периодической слагающей тока в месте короткого замыкания в данный момент легко определить:

$$I_{kt} = \frac{E_{t\Sigma}}{x_{t\Sigma}}$$

Затем следует проверить правильность выбранных режимов генераторов с АРВ. С этой целью необходимо, развертывая схему, найти токи генераторов или напряжения на их выводах (если для них был принят режим подъема возбуждения). При режиме нормального напряжения должно быть $I_t \leq I_{kpt}$, а при режиме подъема возбуждения $I_t \leq I_{kpt}$.

Если оказалось, что у некоторых генераторов режимы выбраны неверно, то их следует соответственно изменить и затем повторить аналогичный расчет.

Чтобы построить кривую изменения токов в какой-либо ветви (или напряжения в произвольной точке) схемы, производят расчет, для нескольких моментов времени. В большинстве случаев бывает достаточно произвести расчет для двух-трех наиболее характерных моментов, выбранных в пределах интересующего отрезка времени процесса короткого замыкания и, интерполируя междуполученными результатами, построить интересующую кривую.

17 Методы расчета несимметричных режимов трехфазных электрических систем

Основное предположение. Несимметрия возникает лишь в одной точке сети.

Виды несимметрии:

1. поперечная – любое несимметричное короткое замыкание;
2. продольная – обрыв одной или двух фаз, несимметричность нагрузки по фазам.

Анализ несимметричных переходных режимов затруднен тем обстоятельством, что при таких процессах возникает пульсирующее магнитное поле ротора генератора, вызывающее полный спектр высших гармоник. Это приводит к тому, что переход от фазных переменных в дифференциальных уравнениях переходного процесса к переменным в вращающейся системе координат $d, q, 0$ не освобождает эти уравнения от периодических коэффициентов. Безусловно можно было бы записать уравнения переходных процессов для каждой гармоники, то есть записать эти уравнения в переменных в системе координат $d, q, 0$, вращающейся с угловой частотой, соответствующей выбранной гармонике, а затем, используя принцип суперпозиции, найти значения фазных величин, но такой подход приводит к необходимости решения бесконечной системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

17.1 Образование высших гармоник С.Г. при несимметрии.

При несимметрии ротора (отсутствие демпферных обмоток или их наличие только по одной оси):

- каждая нечетная гармоника тока обмотки возбуждения порождает следующую четную гармонику фазных токов;
- каждая четная гармоника тока обмотки возбуждения порождает следующую нечетную гармонику фазного тока.

Чем сильнее несимметрия ротора, тем выше амплитуда высших гармоник фазного тока, для симметричных роторов этот эффект имеет противоположный характер. Этот эффект используют в турбогенераторах, добиваясь как можно более высокой симметричности ротора.

17.2 Метод симметричных составляющих в исследовании переходных процессов при нарушении несимметрии трехфазной сети.

Симметричной системой называют трехфазную систему электрических величин, в которой электрические величины в отдельных фазах равны по амплитуде и отстают по фазе друг относительно друга на углы, равные $q \cdot 2\pi/3$, где q - любое целое число.

При $q = 1$ получается система из трех равных по амплитуде электрических величин и сдвинутых относительно друг друга на угол $2\pi/3$:

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi); e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi - 2\pi/3); e_3 = E_m \sin(\omega t + \psi - 4\pi/3);$$

или в комплексной форме

$$\dot{E}_1 = E_1 e^{j\psi}; \dot{E}_2 = E_1 e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \dot{E}_3 = E_1 e^{-j\frac{4\pi}{3}}.$$

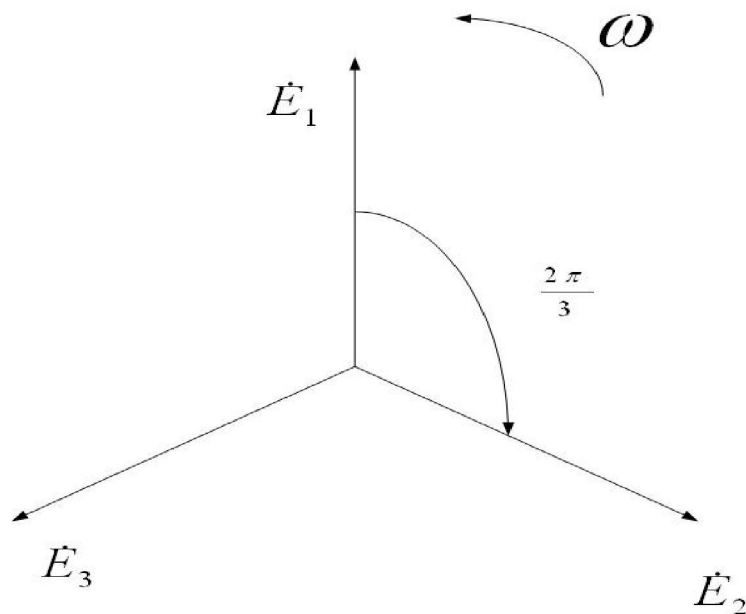
Если обозначить $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, то

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos \frac{4\pi}{3} + j \sin \frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^3 = e^{j\frac{6\pi}{3}} = \cos 2\pi + j \sin 2\pi = 1; a^4 = e^{j\frac{8\pi}{3}} = e^{j(\frac{2\pi}{3} + \frac{6\pi}{3})} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = a; 1 + a + a^2 = 0.$$

Тогда симметричная трехфазная система электрических величин может быть записана в виде:

$$\dot{E}_1; a^2 \dot{E}_1; a \dot{E}_1.$$



Так как электрические величины в фазах проходят через максимум в порядке следования номеров фаз (1,2,3,1,2,3,...) , то такую систему называют *симметричной системой прямой последовательности*.

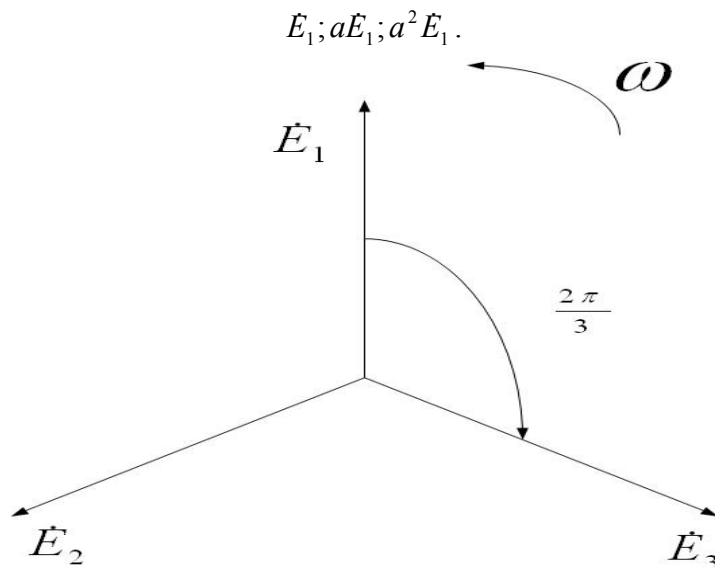
При $q = 2$ получается система из трех равных по амплитуде электрических величин и сдвинутых относительно друг друга на угол $4\pi/3$:

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi); e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi - 4\pi/3); e_3 = E_m \sin(\omega t + \psi - 8\pi/3);$$

или в комплексной форме

$$\dot{E}_1 = E_1 e^{j\psi}; \dot{E}_2 = \dot{E}_1 e^{-j\frac{4\pi}{3}}; \dot{E}_3 = \dot{E}_1 e^{-j\frac{8\pi}{3}}.$$

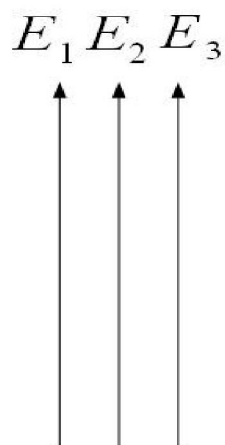
Симметричная трехфазная система электрических величин может быть записана в виде:



Так как электрические величины в фазах проходят через максимум в обратном порядке следования номеров фаз (1,3,2,1,3,2,...) , то такую систему называют *симметричной системой обратной последовательности*.

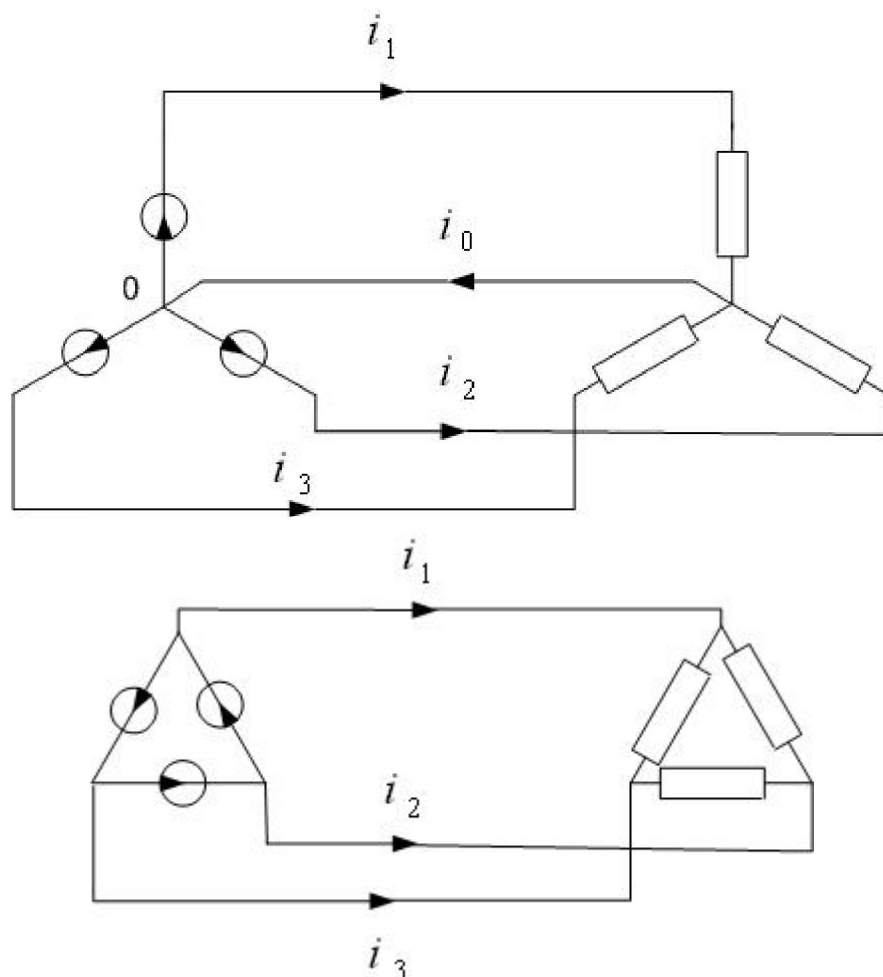
При $q = 0$ получается система из трех равных по амплитуде электрических величин

$$E_1 = E_2 = E_3.$$



Так как электрические величины в фазах проходят через максимум одновременно, то такую систему называют *симметричной системой нулевой последовательности*.

Основными видами соединения трехфазных систем является *соединение треугольником* и *соединение звездой*.



При соединении звездой начала обмоток фаз генератора объединяют в нейтральную точку 0 генератора. Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называют нейтральным проводом или нейтралью, а провода, идущие от концов фаз генератора к приемнику, - линейными проводами. При симметрии токов по нейтральному проводу протекает нулевой ток, а при несимметрии - ток, амплитуда которого обычно много меньше амплитуды токов в линейных проводах.

При соединении треугольником конец обмотки каждой фазы в генераторе соединяется с началом обмотки следующей фазы.

При отсутствии нейтрального провода способы соединения фазных обмоток генератора и независимы.

Напряжения на зажимах отдельных фаз генератора или приемника называют *фазными напряжениями*, а напряжения между линейными и проводами – *линейными напряжениями*; аналогично, токи в фазах генератора или приемника называют *фазными токами*, а токи в линейных проводах – *линейными токами*.

При соединении звездой линейные токи равны соответствующим фазным токам, а линейные напряжения – разностям соответствующих фазных напряжений.

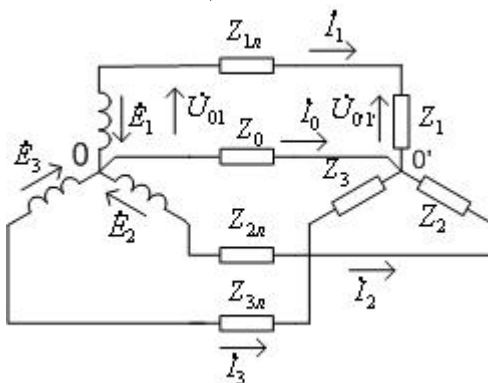
При соединении треугольником линейные напряжения равны соответствующим фазным напряжениям, а линейные токи – разности соответствующих фазных токов.

Расчет любой трехфазной сети может быть произведен одним из методов ТОЭ (контурных токов, узловых напряжений, сечений, смешанных величин, метод расчета, основанный на принципе наложения, эквивалентного генератора), так как схема замещения трехфазной цепи представляет собой сложную электрическую цепь, в которой действуют несколько источников ЭДС – каждый трехфазный генератор можно рассматривать как три источника фазных ЭДС.

Например, для электроэнергетической системы



при несимметричном режиме схема замещения может иметь вид



Тогда, учитывая, что схема содержит два узла, используя метод узловых напряжений, получаем для напряжения между узлами 0 и 0':

$$\dot{U}_{00'}(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) = \mathfrak{S}_1 + \mathfrak{S}_2 + \mathfrak{S}_3;$$

где проводимости ветвей определяются как

$$Y_1 = \frac{1}{Z_{1r} + Z_1}; Y_2 = \frac{1}{Z_{2r} + Z_2}; Y_3 = \frac{1}{Z_{3r} + Z_3}; Y_0 = \frac{1}{Z_0};$$

а токи источников

$$\mathfrak{S}_1 = E_1 Y_1; \mathfrak{S}_2 = E_2 Y_2; \mathfrak{S}_3 = E_3 Y_3.$$

Находим

$$\dot{U}_{00'} = \frac{E_1 Y_1 + E_2 Y_2 + E_3 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_0};$$

откуда токи в проводах

$$I_0 = \dot{U}_{00'} Y_0; I_1 = (\dot{U}_{01} - \dot{U}_{00'}) Y_1; I_2 = (\dot{U}_{02} - \dot{U}_{00'}) Y_2; I_3 = (\dot{U}_{03} - \dot{U}_{00'}) Y_3.$$

17.3 Разложение несимметричных трехфазных систем на симметричные составляющие

Любую несимметричную трехфазную систему величин (ЭДС, силу тока, напряжение) можно представить в виде суммы трех симметричных составляющих: прямой, обратной и нулевой последовательности.

Пусть задана несимметричная трехфазная система ЭДС $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$. Потребуем, чтобы

$$\dot{E}_A = \dot{E}_0 + \dot{E}_1 + \dot{E}_2;$$

$$\dot{E}_B = \dot{E}_0 + a^2 \dot{E}_1 + a \dot{E}_2;$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_0 + a \dot{E}_1 + a^2 \dot{E}_2;$$

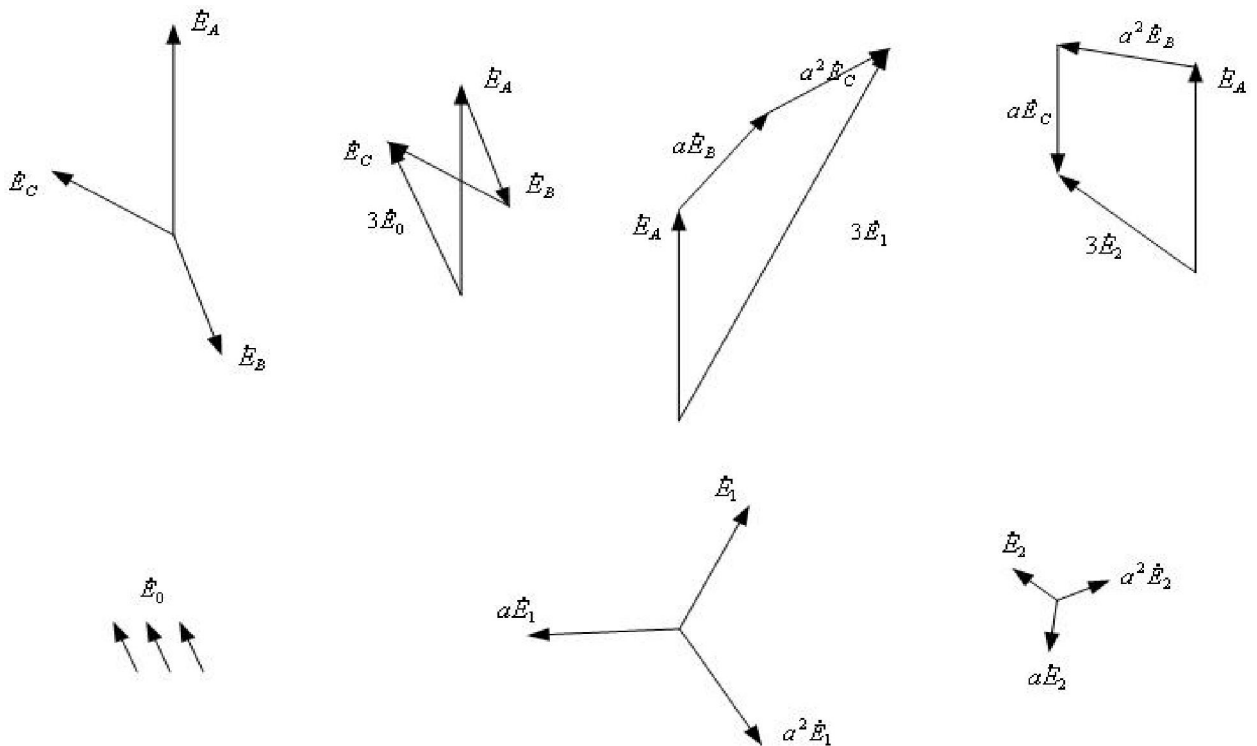
где $(\dot{E}_0, \dot{E}_0, \dot{E}_0)$ - симметричная система нулевой последовательности, $(\dot{E}_1, a^2 \dot{E}_1, a \dot{E}_1)$ - симметричная система прямой последовательности; $(\dot{E}_2, a \dot{E}_2, a^2 \dot{E}_2)$ - симметричная система обратной последовательности. Из последней системы несложно получить уравнения связывающие величины $\dot{E}_0, \dot{E}_1, \dot{E}_2$ и $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$:

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C);$$

$$\dot{E}_1 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + a \dot{E}_B + a^2 \dot{E}_C);$$

$$\dot{E}_2 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + a^2 \dot{E}_B + a \dot{E}_C).$$

Так как $\dot{E}_0, \dot{E}_1, \dot{E}_2$ и $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ представляют собой комплексные числа, то геометрически это вектора на плоскости, а поэтому:



17.4 Применение метода симметричных составляющих к расчету несимметричных трехфазных цепей.

Этот метод позволяет свести задачу расчета сложной несимметричной сети к расчету трех более простых симметричных цепей. Особенно этот метод полезен в случае расчета цепей, содержащих в себе вращающиеся трехфазные электрические машины. Дело в том, что расчет индуктивных сопротивлений фазных обмоток машин в несимметричных режимах крайне затруднен. Вместе с тем паспортные и каталожные данные электрических машин и трансформаторов содержат значения полных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности, а поэтому метод симметричных составляющих позволяет достаточно просто рассчитывать несимметричные режимы, используя методы ТОЭ и представленные в предыдущем пункте формулы.

Для симметричных элементов электрической цепи справедлив закон Ома:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_1 &= Z_1 \dot{I}_1; \\ \Delta \dot{U}_2 &= Z_2 \dot{I}_2; \\ \Delta \dot{U}_0 &= Z_0 \dot{I}_0;\end{aligned}$$

а при рассмотрении только основной гармоники 2-й закон Кирхгофа для несимметричного к.з. имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{K1} &= \dot{E}_\Sigma - Z_{1\Sigma} \dot{I}_{K1}; \\ \dot{U}_{K2} &= 0 - Z_{2\Sigma} \dot{I}_{K2}; \\ \dot{U}_{K0} &= 0 - Z_{0\Sigma} \dot{I}_{K0};\end{aligned}\quad (*)$$

где $\dot{U}_{K1}, \dot{U}_{K2}, \dot{U}_{K0}$ - симметричные составляющие напряжений в точке к.з.; $\dot{I}_{K1}, \dot{I}_{K2}, \dot{I}_{K0}$ - симметричные составляющие токов в точке к.з.; \dot{E}_Σ - результирующая ЭДС относительно точки к.з.; $Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ - суммарные полные сопротивления последовательностей относительно точки к.з.

Эти уравнения служат основой для расчета несимметричных коротких замыканий. Составляя эти уравнения, исходят из следующих предпосылок:

- до места короткого замыкания цепь вполне симметрична;
- несимметричное короткое замыкание нарушает симметрию цепи;
- для того, чтобы цепь была симметричной можно в точке к.з. ввести дополнительный соединенный в звезду генератор, с ЭДС, равными

$$\dot{E}_A = -\dot{U}_A; \dot{E}_B = -\dot{U}_B; \dot{E}_C = -\dot{U}_C.$$

В уравнении (*) шесть неизвестных, поэтому необходимо к этим уравнениям добавить три уравнения, характеризующие конкретный вид несимметрии:

продольная несимметрия	
Вид несимметрии	Дополнительные уравнения
Перекас фазы А (сопротивление Z_A)	$\dot{U}_{K1} + \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K3} = Z_A (\dot{I}_{K1} + \dot{I}_{K2} + \dot{I}_{K0});$ $a^2 \dot{U}_{K1} + a \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K0} = 0;$ $a \dot{U}_{K1} + a^2 \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K0} = 0;$
Разрыв фазы А	$\dot{I}_{K1} + \dot{I}_{K2} = 0;$ $a^2 \dot{U}_{K1} + a \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K0} = 0;$ $a \dot{U}_{K1} + a^2 \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K0} = 0;$
Перекас фаз А и В (сопротивления Z_A, Z_B)	$\dot{U}_{K1} + \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K3} = Z_A (\dot{I}_{K1} + \dot{I}_{K2} + \dot{I}_{K0});$ $a^2 \dot{U}_{K1} + a \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K0} = Z_B (a^2 \dot{I}_{K1} + a \dot{I}_{K2} + \dot{I}_{K0});$ $a \dot{U}_{K1} + a^2 \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K0} = 0;$
поперечная несимметрия	
Вид несимметрии	Дополнительные уравнения

однофазное к.з. (фаза А) Z_A - сопротивление дуги	$\dot{U}_{K1} + \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K3} = Z_A(I_{K1} + I_{K2} + I_{K0});$ $a^2 I_{K1} + a I_{K2} + I_{K0} = 0;$ $a I_{K1} + a^2 I_{K2} + I_{K0} = 0;$
двухфазное к.з. на землю (фазы В,С) Z_B, Z_C - сопротивления дуги	$a^2 \dot{U}_{K1} + a \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K3} = Z_B(I_{K1} + I_{K2} + I_{K0});$ $a \dot{U}_{K1} + a^2 \dot{U}_{K2} + \dot{U}_{K3} = Z_C(I_{K1} + I_{K2} + I_{K0});$ $I_{K1} + I_{K2} + I_{K0} = 0;$
двухфазное к.з. (фазы В,С) Z_B - сопротивления дуги	$I_{K1} + I_{K2} = 0;$ $a^2 \dot{U}_{K1} + a \dot{U}_{K2} - (a \dot{U}_{K1} + a^2 \dot{U}_{K2}) = Z_B(a^2 I_{K1} + a I_{K2});$

18 Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательности различных элементов ЭС

18.1 Общие положения.

Все сопротивления, характеризующие элементы ЭС в нормальном симметричном режиме, а также симметричном переходном процессе, во всех случаях, кроме случая определения постоянной времени $T_a = x_2 / r$ затухания свободных токов при внезапном коротком замыкании синхронной машины без демпферных контуров, являются сопротивлениями прямой последовательности.

При отсутствии магнитной связи между фазами какого-либо элемента (например, реакторы) справедливо соотношение:

$$x_1 = x_2 = x_0; r_1 = r_2 = r_0.$$

Для элементов, магнитно связанные цепи которых неподвижны относительно друг друга (трансформаторы, автотрансформаторы, воздушные линии, кабели) справедливы соотношения:

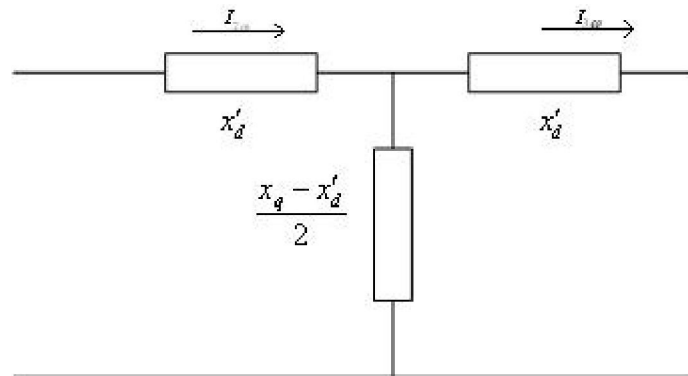
$$x_1 = x_2 \neq x_0; r_1 = r_2 \neq r_0.$$

18.2 Синхронные машины

Так как магнитный поток, созданный токами обратной последовательности синхронной частоты, вращается относительно ротора с двойной синхронной частотой и при этом встречает на своем пути непрерывно меняющееся магнитное сопротивление, обусловленное не симметрией ротора. При этом магнитное сопротивление тем больше, чем больше не симметрия ротора. Для синхронной машины без демпферных контуров известно приближенное соотношение:

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q};$$

определяющее собой реактивность обратной последовательности, определяемую как отношение подведенного синусоидального напряжения обратной последовательности синхронной частоты к основной гармонике тока обратной последовательности. Эта реактивность может быть представлена схемой замещения



При этом ток в ветви с сопротивлением x'_d есть ток тройной синхронной частоты прямой последовательности, который вызван магнитным потоком синхронной частоты обратной последовательности. Если напряжение обратной последовательности подается на статорные обмотки СГ через произвольную реактивность, то в этом случае:

$$x_2 = \frac{2(x'_d + x)(x_q + x)}{x'_d + x_q + 2x};$$

при этом на долю самой машины приходится:

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{2(x'_d + x)(x_q + x)}{x'_d + x_q + 2x} - x = \frac{2x'_d x_q + 2x'_d x + 2xx_q + 2x^2 - x'_d x - x_q x - 2x^2}{x'_d + x_q + 2x} = \\ &= \frac{2x'_d x_q + x(x'_d + x_q)}{x'_d + x_q + 2x}; \end{aligned}$$

При стремлении внешнего сопротивления к бесконечности:

$$x_2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x'_d x_q + x(x'_d + x_q)}{x'_d + x_q + 2x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x'_d x_q / x + (x'_d + x_q)}{x'_d / x + x_q / x + 2} = \frac{0 + (x'_d + x_q)}{2} = \frac{(x'_d + x_q)}{2};$$

что соответствует отсутствию ветви с током тройной частоты, то есть его не учета.

При учете всех гармоник, схема замещения превращается в бесконечную и результирующая реактивность определяется как:

$$x_2 = \sqrt{x'_d x_q}.$$

Таким образом для синхронного генератора без демпферных контуров реактивность обратной последовательности равна:

- при учете всех гармоник
-

$$x_2 = \sqrt{x'_d x_q}.$$

— при учете только основной и третьей гармоники

—

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q};$$

— при учете только основной гармоники

—

$$x_2 = \frac{(x'_d + x_q)}{2}.$$

Для синхронного генератора с демпферными контурами реактивность обратной последовательности равна:

— при учете всех гармоник

—

$$x_2 = \sqrt{x''_d x''_q}.$$

— при учете только основной и третьей гармоники

—

$$x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q};$$

— при учете только основной гармоники

—

$$x_2 = \frac{(x''_d + x''_q)}{2}.$$

В качестве приближенных значений при инженерных расчетах часто принимают:

— для синхронных генераторов без демпферных контуров:

—

$$x_2 \approx 1.45x'_d;$$

— для синхронных машин с демпферными контурами в обеих осях ротора:

—

$$x_2 \approx 1.22x''_d.$$

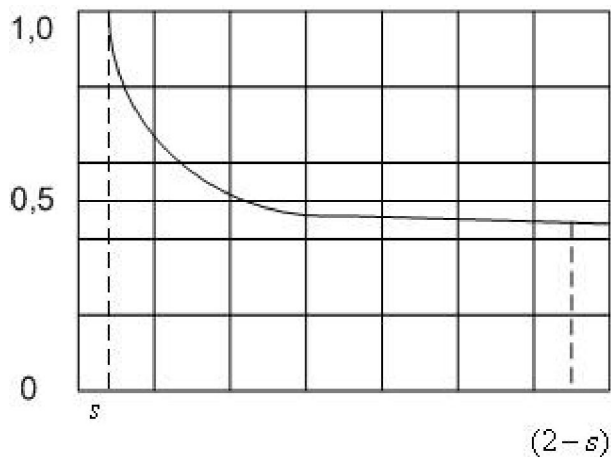
Токи нулевой последовательности создают только магнитные потоки рассеяния статорной обмотки, которые меньше, чем при токах прямой и обратной последовательности. При этом магнитные потоки рассеяния обмоток статора очень сильно зависят от конструктивных параметров этих обмоток, поэтому величина реактивности нулевой последовательности для синхронных генераторов колеблется в больших пределах:

$$x_0 = (0.15 \div 0.6)x''_d,$$

а ее уточнение требует применения достаточно тонких расчетов, либо путем проведения серии экспериментов.

18.3 Асинхронные двигатели

Если в нормальных условиях асинхронный двигатель работает со скольжением s , то по отношению к магнитному потоку обратной последовательности ротор двигателя имеет скольжение $(2-s)$. Поэтому реактивность обратной последовательности есть реактивность прямой последовательности при скольжении $(2-s)$. Зависимость относительного значения реактивности прямой последовательности от скольжения показана на рисунке:



Из графика видно, что

$$x_2 \approx x_{s=1} = x_k.$$

То есть реактивность обратной последовательности асинхронного двигателя приближенно равна его реактивности при скольжении, равном единице – частота тока в роторе совпадает с частотой сети, которая называется реактивностью короткого замыкания. Ее числовое значение в относительных единицах равно:

$$x_k = \frac{1}{I_{\Pi}},$$

где I_{Π} - номинальный пусковой ток асинхронного двигателя.

Реактивность нулевой последовательности асинхронного двигателя определяется рассеянием статорной обмотки, поэтому сильно зависит от ее конструктивных параметров и может быть найдены путем тонких и сложных теоретических расчетов или путем проведения серии экспериментов.

18.4 Обобщенная нагрузка.

Для средней типовой промышленной нагрузки, состоящей в основном из асинхронных двигателей

$$x_2 \approx 0.35,$$

причем относительная величина этой реактивности отнесена к полной рабочей мощности в мегавольтамперах этой нагрузки и среднему номинальному напряжению в киловольтах той ступени, к которой она подключена.

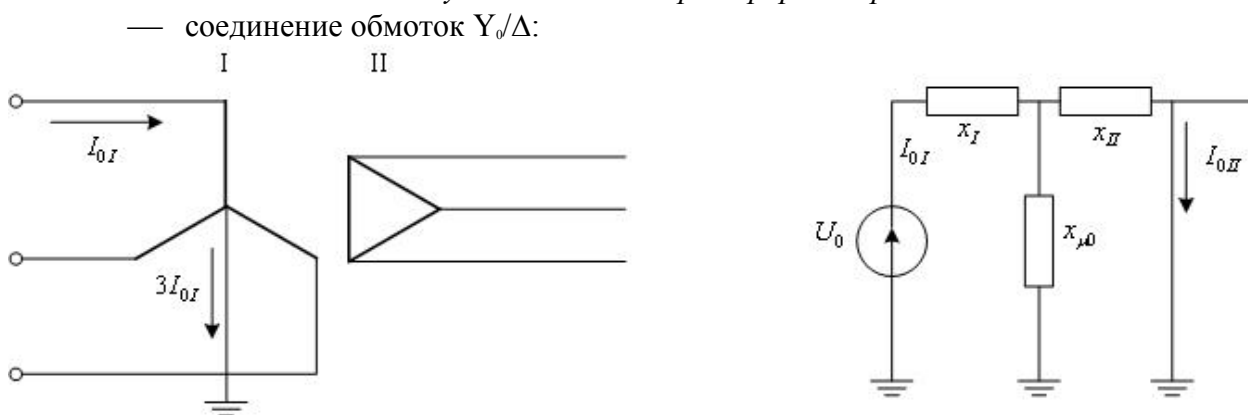
Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки может быть найдено только путем конкретизации элементов, входящих в обобщенную нагрузку, ее среднее значение для обобщенной нагрузки привести нельзя.

18.5 Трансформаторы

Реактивность нулевой последовательности трансформатора в значительной мере определяется ее конструктивными особенностями и соединением обмоток. Со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду без заземления нейтрали, реактивность нулевой последовательности трансформатора равна бесконечности, так как в этих обмотках исключена возможность циркуляции токов нулевой последовательности. Таким образом реактивность нулевой последовательности будет конечна только у обмоток трансформатора, соединенных в звезду с заземленной нейтралью.

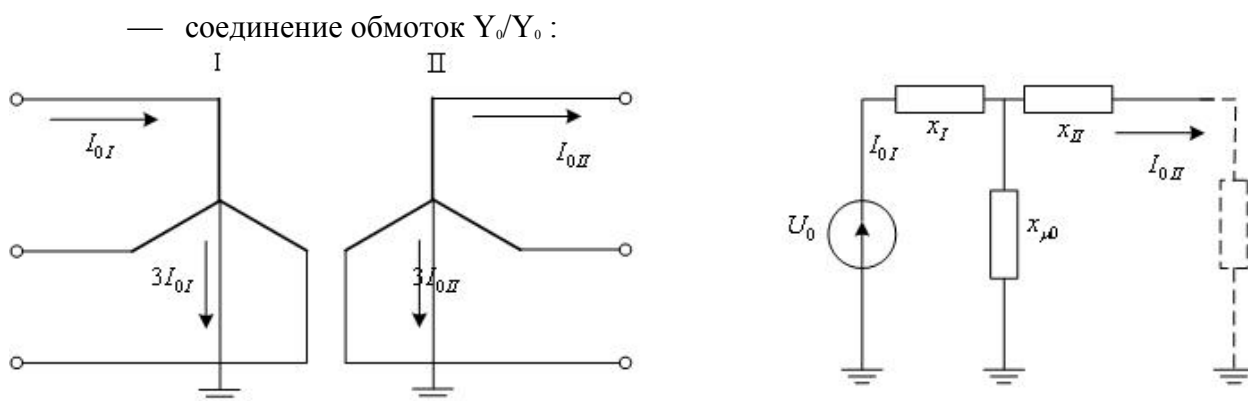
Ниже приводятся схемы соединения обмоток трансформаторов различных типов и соответствующие им схемы замещения с соответствующими разъяснениями:

двухобмоточные трансформаторы:



в этом случае ЭДС нулевой последовательности трансформатора целиком расходуется на проведение тока нулевой последовательности через реактивность рассеяния обмотки, соединенной треугольником, так как этот ток не выходит за пределы данной обмотки, поэтому в схеме для вторичной обмотки ветвь с реактивностью вторичной обмотки закорочена. Таким образом сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора характеризуется только реактивностью первичной обмотки, а поэтому равна:

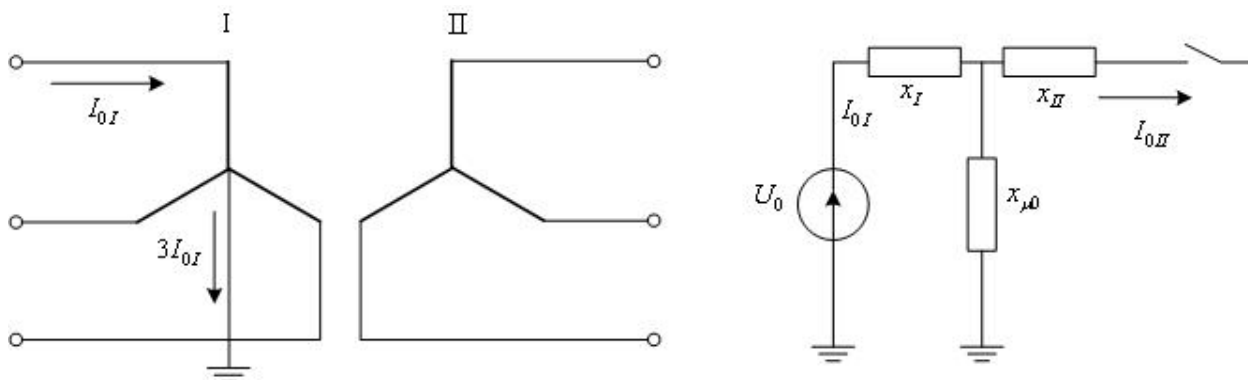
$$x_0 = x_I;$$



в этом случае предполагается, что на стороне вторичной обмотки имеется элемент трехфазной сети с соединением фазных обмоток в звезду с заземленной нейтралью, что

обеспечивает циркуляцию токов нулевой последовательности в цепи вторичной обмотки. Если же такого элемента нет, то случай соединения обмоток Y_0/Y соответствует предыдущему случаю соединения обмоток Y_0/Y ;

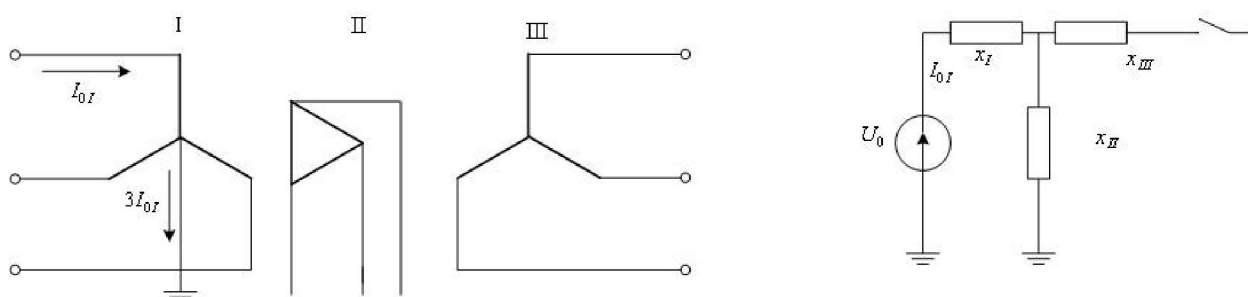
— соединение обмоток Y_0/Y :



в этом случае режим циркуляции токов нулевой последовательности соответствует режиму холостого хода трансформатора;

трехобмоточные трансформаторы:

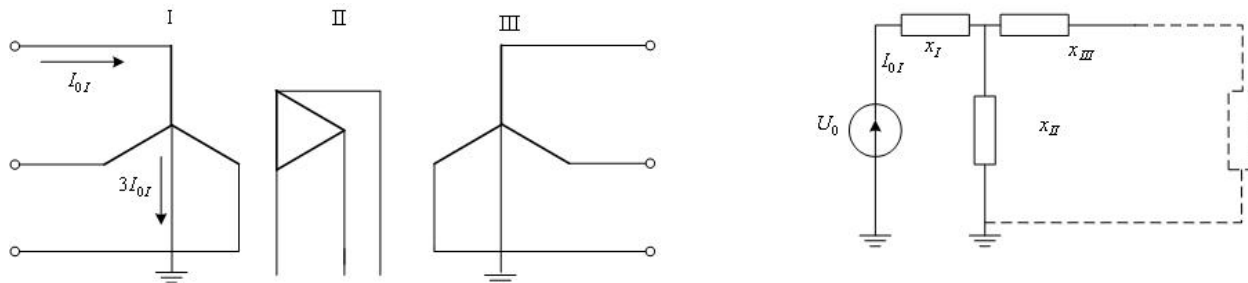
— соединение $Y_0/\Delta/Y$:



в этом случае ток в обмотке III отсутствует, а поэтому

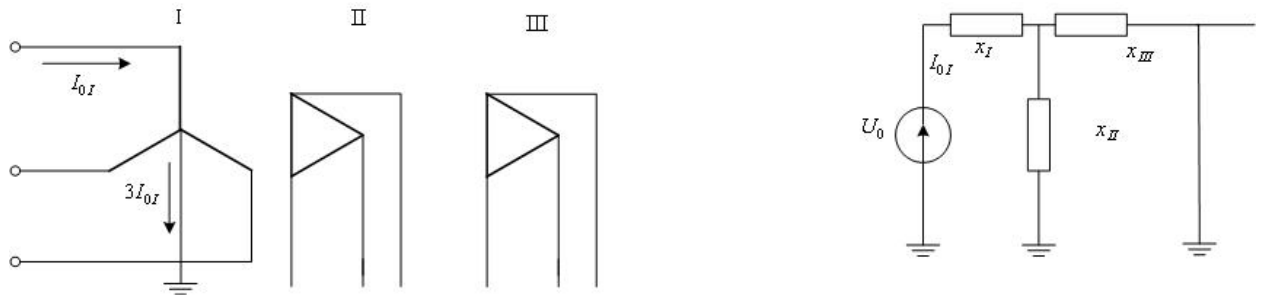
$$x_0 = x_I + x_{II} = x_{I-II};$$

— соединение $Y_0/\Delta/Y_0$:



предполагается, что путь токов нулевой последовательности в обмотке III существует, то есть в цепи обмотке III имеется элемент трехфазной сети с соединением фазных обмоток в звезду с заземленной нейтралью, что обеспечивает циркуляцию токов нулевой последовательности, а поэтому трансформатор может быть введен в схему замещения нулевой последовательности своей стандартной схемой замещения;

— соединение $Y_0/\Delta/\Delta$:



в этом случае компенсация тока нулевой последовательности в обмотке I осуществляется токами, наведенными в обмотках II и III, а поэтому

$$x_0 = x_I + \frac{x_{II} x_{III}}{x_{II} + x_{III}}.$$

18.6 Оценка величины реактивности намагничивания нулевой последовательности двухфазного трансформатора

Для группы из трех однофазных трансформаторов или трехфазных броневого трансформатора ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, поэтому для них считают, что $x_{\mu 0} = \infty$.

Для трехфазных трехстержневых трансформаторов магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через изолирующую среду и кожух трансформатора, а поэтому они должны быть достаточно большими, а следовательно достаточно большим должен быть ток намагничивания, а поэтому $x_{\mu 0} = 0,3 \div 1,0$.

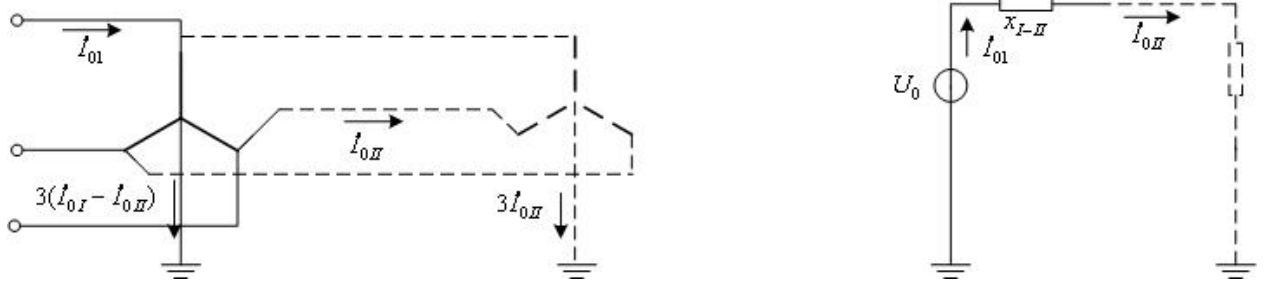
У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток обычно соединена в треугольник, а поэтому принимают, что для них $x_{\mu 0} = \infty$.

Из оценок сопротивления $x_{\mu 0}$ и приведенных выше схем замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов можно оценить величину реактивности x_0 :

- трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0/Δ - $x_0 = x_1$;
- трехфазная группа из однофазных трансформаторов или трехфазный броневого:
 - с соединением обмоток Y_0/Y $x_0 = \infty$;
 - с соединением обмоток Y_0/Y_0 - $x_0 = x_1$;
- трехфазный трехстержневой:
 - с соединением обмоток Y_0/Y $x_0 = x_1 + x_{\mu 0}$;
 - с соединением обмоток Y_0/Y_0 -зависит от внешнего сопротивления (см. схему замещения).

18.7 Автотрансформаторы

Так как в автотрансформаторах обмотки связаны между собой не только магнитно, но и электрически, то циркуляция токов нулевой последовательности происходит совсем по другому, чем в трансформаторах. В частности даже в случае изоляции нейтрали автотрансформатора в нем могут протекать токи нулевой последовательности.



Если у автотрансформатора нет третьей обмотки и во вторичной цепи обеспечен путь для тока нулевой последовательности, то его схема замещения может быть представлена суммарной реактивностью рассеяния x_{I-II} , при этом непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности получить ток, протекающий в его нейтрали, нельзя, так как токи нулевой последовательности, протекающие в первичной и вторичной обмотках, нужно относить к своей ступени напряжения.

Предположим, что нейтраль автотрансформатора заземлена через реактивность x_N , тогда, если напряжение на выводах нейтрали равно U_N , а напряжения на выводах ступеней первичного и вторичного напряжения относительно нейтрали составляют U_{NI}, U_{NII} , то для результирующей реактивности, отнесенной к ступени I

$$x'_{I-II} = \frac{(U_{NI} + U_N) - (U_{NII} + U_N)k}{I_{0I}} = \frac{U_{NI} - kU_{NII}}{I_{0I}} + \frac{U_N}{I_{0I}}(1-k) = \frac{U_{NI} - U_{NII}^0}{I_{0I}} + \frac{U_N}{I_{0I}}(1-k),$$

где k - коэффициент трансформации автотрансформатора:

$$k = \frac{U_I}{U_{II}}.$$

Поскольку

$$x_{I-II} = \frac{U_{NI} - U_{NII}^0}{I_{0I}},$$

а

$$\frac{U_N}{I_{0I}} = \frac{3x_N(I_{0I} - I_{0II})}{I_{0I}} = 3x_N(1-k),$$

то

$$x'_{I-II} = x_{I-II} + 3x_N(1-k)^2.$$

Аналогичным образом можно показать, что для автотрансформатора, имеющего третью обмотку, соединенную треугольником, можно найти реактивности нулевой последовательности, отнесенные к ступени I, при этом схема замещения нулевой последовательности трехобмоточного автотрансформатора представляет собой трехлучевую звезду:

$$x'_I = x_I + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}}\right),$$

$$x'_{II} = x_{II} + 3x_N \frac{(U_I - U_{II})U_I}{U_{II}^2},$$

$$x'_{III} = x_{III} + 3x_N \frac{U_I}{U_{II}}.$$

18.8 Воздушные линии.

Ток нулевой последовательности воздушной линии возвращается через землю или по заземленным цепям, поэтому главная трудность определения сопротивления нулевой последовательности для воздушных линий заключается в нахождении распределения тока в земле, что представляет собой достаточно сложную проблему.

Распределение тока в земле выражается сложными зависимостями, которые аналогичны распределению тока в массивных проводниках.

Рассмотрим однопроводную линию в виде линии «провод-земля», то есть обратным проводом в такой системе является земля. Индуктивность такой линии, как показал Карсон, может быть определена как индуктивность эквивалентной двухпроводной линии, с расстоянием между проводами D_3 , называемым эквивалентной глубиной возврата тока через землю и определяемой по формуле:

$$D_3 = \frac{2,085}{\sqrt{f\lambda 10^{-9}}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$$

где f - частота т, гц, λ - удельная проводимость земли, 1/ом*см.

Обычно принимают, что $f = 50 \text{ гц}$, а $\lambda = 10^{-4} 1/\text{ом} \cdot \text{см}$, тогда $D_3 = 935 \text{ м}$.

Тогда из ТОЭ известно, что

$$x_L = 0.145 \lg \frac{D_3}{r_s}, \text{ ом / км},$$

где r_s - эквивалентный радиус провода, значение которого составляет:

- для витых медных проводов $r_s = (0,724 \div 0,771)r$;
- для алюминиевых и сталеалюминевых проводов марки А, АС, АСО, АСУ $r_s = 0,95r$.

Для линий с расщепленными проводами в выражение для x_L вместо r_s следует вводить средний геометрический радиус системы проводов одной фазы:

$$r_{cp} = \sqrt[n]{r_s a_{cp}^{n-1}},$$

где n - число проводов в фазе, a_{cp} - среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Активное сопротивление линии «провод-земля» складывается из активного сопротивления провода r_{Π} и сопротивления r_3 , учитывающего потери активной мощности в земле, при протекании в ней тока:

$$r_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4}, \text{ ом/км},$$

или при $f = 50$ гц, $r_3 = 0,05$ ом/км.

Тогда полное сопротивление, обусловленное взаимоиנדукцией между двумя параллельными линиями «провод-земля» с расстоянием d между осями проводов можно определить по формуле:

$$Z_M = 0.05 + j \cdot 0.145 \cdot \lg \frac{D_3}{d}, \text{ ом/км},$$

которая для трехфазной одноцепной линии дает:

$$Z_M = 0.05 + j \cdot 0.145 \cdot \lg \frac{D_3}{D_{cp}}, \text{ ом/км},$$

где

$$D_{cp} = \sqrt[3]{d_{aa} d_{ac} d_{bc}}.$$

Теперь нетрудно найти сопротивление нулевой последовательности трехфазной одноцепной линии: это сопротивление равно значению напряжения, которое должно быть приложено к каждому проводу линии, чтобы покрыть падение напряжения при протекании по фазам токов нулевой последовательности с значением 1 а, то есть:

$$Z_0 = Z_L + Z_M + Z_M = Z_L + 2Z_M.$$

Подстановка найденных ранее значений дает:

$$Z_0 = Z_L + 2Z_M = r_{\Pi} + 0.15 + 0.435 \lg \frac{D_{cp}}{\sqrt[3]{r_3 D_{cp}^2}}; \text{ ом/км}.$$

Если по линии протекает ток прямой последовательности с эффективным значением I_a , то

$$I_a = 1; I_b = a^2; I_c = a;$$

$$Z_1 = Z_L + a^2 Z_M + a Z_M;$$

или

$$Z_1 = Z_L + (a^2 + a)Z_M = Z_L - Z_M;$$

$$a^2 + a + 1 = 0;$$

откуда, решая систему

$$Z_0 = Z_L + 2Z_M;$$

$$Z_1 = Z_L - Z_M;$$

получаем

$$Z_L = (Z_0 + 2Z_1)/3;$$

$$Z_M = (Z_0 - Z_1)/3.$$

18.9 Кабели

Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности обычно находят по заводским данным, приводимым в справочной литературе.

Прокладку кабеля производят на малой глубине, поэтому распределение обратного тока подземной цепи «провод-земля» практически не отличается от того, которое имеет место для воздушных линий. Поэтому при отсутствии проводящей оболочки у кабеля сопротивление его нулевой последовательности можно посчитать по формуле

$$Z_0 = Z_L + 2Z_M = r_{\Pi} + 0.15 + 0.435 \lg \frac{D_{cp}}{R_{cp}}; \text{ом/км};$$

где

$$R_{cp} = \sqrt[3]{r_s d^2};$$

здесь r_s - эквивалентный радиус жилы; d - расстояние между осями жил.

Однако кабель обычно содержит проводящую оболочку, которая к тому же заземлена на его концах и в промежуточных точках, а поэтому она образует путь для токов нулевой последовательности, который параллелен земле. На распределение тока между оболочкой и землей существенное влияние оказывает не только собственное сопротивление оболочки, но так же сопротивление ее заземлений, величины которых существенно зависят от характера прокладки кабеля и ряда других факторов, что существенно затрудняет расчет сопротивления нулевой последовательности кабеля.

Обычно в инженерных расчетах принимают:

$$r_0 \approx 10r_1;$$

$$x_0 \approx (3.5 - 4.6)x_1.$$

19 Однократная поперечная несимметрия

19.1 Общие замечания

Поперечная несимметрия в произвольной точке трехфазной системы в общем виде может быть представлена присоединением в этой точке неодинаковых сопротивлений, как

это, например, показано на рис. 1. Такой подход, вообще говоря, позволяет получить решение в общем виде, из которого затем вытекают решения для всех частных случаев. Однако решение в общем виде приводит к весьма громоздким выражениям. Поэтому значительно проще и нагляднее проводить решение для каждого вида поперечной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия.

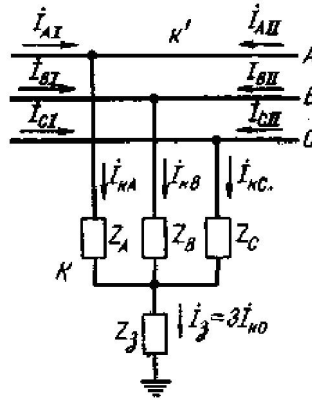


Рис.1. Общий вид поперечной несимметрии.

Далее будут рассмотрены три основных вида несимметричных коротких замыканий (двухфазное, однофазное и двухфазное на землю); при этом предполагается, что эти замыкания металлические.

При этом предполагается, что рассматриваются только основные гармоники тока и напряжения, причем схемы отдельных последовательностей состоят лишь из реактивностей и приведены к элементарному виду относительно короткого замыкания, т.е. найдены результирующая э. д. с. E_Σ и результирующие реактивности $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$.

При записи граничных условий примем, что фаза A находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз, т. е. она является, как говорят, особой фазой. За положительное направление токов (фазных и их симметричных составляющих) будем считать направление к месту короткого замыкания. Наконец, чтобы упростить запись, будем опускать индекс вида короткого замыкания, сохраняя его только в записи граничных условий и в окончательных результатах выводов.

19.2 Двухфазное короткое замыкание

Запишем граничные условия для двухфазного короткого замыкания (рис. 2,а):

$$\dot{I}_{kA}^{(2)} = 0; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{kB}^{(2)} = -\dot{I}_{kC}^{(2)}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{kB}^{(2)} - \dot{U}_{kC}^{(2)} = 0; \quad (3)$$

Поскольку система токов уравновешенная, т. е. $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, то $\dot{I}_{k0} = 0$. Следовательно, (1) можно записать как

$$\dot{I}_{kA} = \dot{I}_{kA1} + \dot{I}_{kA2} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{kA1} = -\dot{I}_{kA2} \quad (4)$$

Выразим \dot{U}_{kB} и \dot{U}_{kC} через симметричные составляющие напряжения фазы A . Тогда (3) будет:

$$a^2 \dot{U}_{kA1} + a \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{k0} - a \dot{U}_{kA1} - a^2 \dot{U}_{kA2} - \dot{U}_{k0} = (a^2 - a)(\dot{U}_{kA1} - \dot{U}_{kA2}) = 0$$

откуда

$$\dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2}. \quad (5)$$

Теперь обратимей к основным выражениям (4) — (6). Соотношение (5) позволяет приравнять правые части (4) и (5), т.е.

$$\dot{E}_{A\Sigma} - jx_{1\Sigma} \dot{I}_{kA1} = -jx_{2\Sigma} \dot{I}_{kA2}.$$

откуда, имея в виду (4), после простых преобразований получаем:

$$\dot{I}_{kA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}. \quad (6)$$

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания легко выразить через $\dot{I}_{kA1}^{(2)}$, т.е.

$$\dot{I}_{kB}^{(2)} = a^2 \dot{I}_{kA1} + a \dot{I}_{kA2} = (a^2 - a) \dot{I}_{kA1}^{(2)} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{kA1}^{(2)} \quad (7)$$

и согласно (2)

$$\dot{I}_{kC}^{(2)} = j\sqrt{3} \dot{I}_{kA1}^{(2)} \quad (7a)$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей фазы A в месте короткого замыкания в соответствии с (5), (4) и (5) будут:

$$\dot{U}_{kA1}^{(2)} = \dot{U}_{kA2}^{(2)} = jx_{2\Sigma} \dot{I}_{kA1}^{(2)}. \quad (8)$$

Что касается напряжения $\dot{U}_{k0}^{(2)}$, то оно может иметь произвольное значение, так как при рассматриваемом виде короткого замыкания смещение нейтрали системы относительно земли не влияет на величины токов. Поскольку в данном случае для токов путь через землю отсутствует ($x_{0\Sigma} = \infty$) по (6) имеем:

$$\dot{U}_{kA}^{(2)} = -jx_{0\Sigma} \dot{I}_{k0}^{(2)} = -\infty \cdot 0 \text{ — неопределенность.}$$

Фазные напряжения в месте короткого замыкания составляют:

$$\dot{U}_{kA}^{(2)} = \dot{U}_{kA1}^{(2)} + \dot{U}_{kA2}^{(2)} = 2\dot{U}_{kA1}^{(2)} = 2jx_{2\Sigma} \dot{I}_{kA1}^{(2)}. \quad (9)$$

$$\dot{U}_{kB}^{(2)} = \dot{U}_{kC}^{(2)} = a^2 \dot{U}_{kA1}^{(2)} + a \dot{U}_{kA2}^{(2)} = -\dot{U}_{kA1}^{(2)} = -\frac{\dot{U}_{kA}^{(2)}}{2}. \quad (10)$$

Построенные по полученным выражениям векторные диаграммы напряжений и токов показаны на рис. 2.

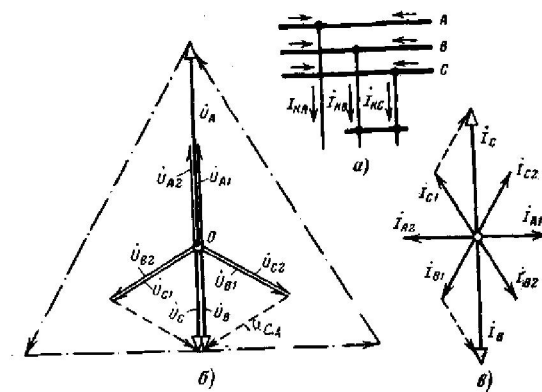


Рис. 2. Двухфазное короткое замыкание.

a — принципиальная схема; $б$ — векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания; $в$ — то же токов.

19.3 Однофазное короткое замыкание

При коротком замыкании на землю фазы A (рис. 3,а)

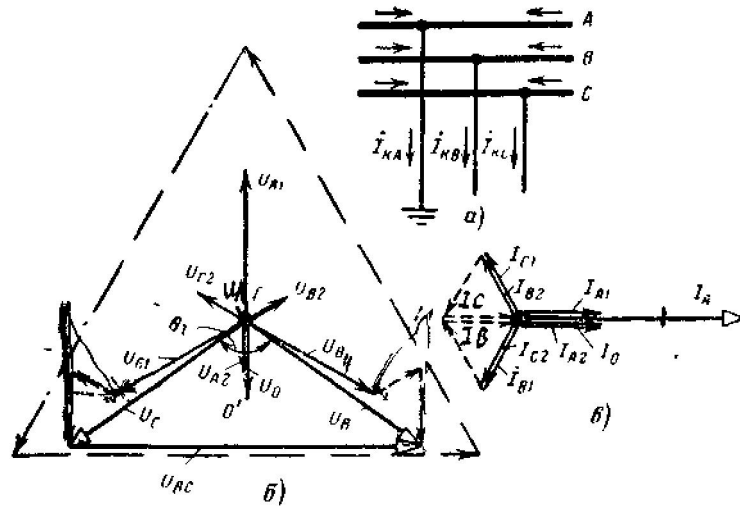


Рис. 3. Однофазное короткое замыкание.
 а — принципиальная схема, б — векторная диаграмма напряжения в месте короткого замыкания; в — то же токов.

граничные условия будут:

$$\dot{I}_{kB}^{(1)} = 0; (11)$$

$$\dot{I}_{kC}^{(1)} = 0; (12)$$

$$\dot{U}_{kA}^{(1)} = 0. (13)$$

Нетрудно убедиться, что при (11) и (12) симметричные составляющие токов в месте короткого замыкания связаны простыми соотношениями:

$$\dot{I}_{kA1}^{(1)} = \dot{I}_{kA2}^{(1)} = \dot{I}_{k0}^{(1)} = \frac{1}{3\dot{I}_{kA}^{(1)}} (14)$$

Для заземленной фазы в соответствии с (13) имеем

$$\dot{U}_{kA} = \dot{U}_{kA1} + \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{k0} = 0,$$

или, подставив сюда вместо симметричных составляющих напряжений их выражения (4) — (6) и учтя (14), получим:

$$\dot{E}_{A\Sigma} - j\dot{I}_{kA1}(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) = 0$$

откуда

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. (15)$$

Ток в поврежденной фазе в месте короткого замыкания

$$\dot{I}_{kA}^{(1)} = 3\dot{I}_{kA1}^{(1)}. (16)$$

Этот же ток в соответствии с (14) является током, поступающим в землю в месте замыкания.

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого замыкания:

$$\dot{U}_{k0} = -jx_{0\Sigma}\dot{I}_{k0} = -jx_{0\Sigma}\dot{I}_{kA1}; (17)$$

$$\dot{U}_{kA2} = -jx_{2\Sigma}\dot{I}_{kA2} = -jx_{2\Sigma}\dot{I}_{kA1}; (18)$$

$$\dot{U}_{kA1} = -(\dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{k0}) = j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})\dot{I}_{kA1}. (19)$$

Фазные (относительно земли) напряжения в месте короткого замыкания:

$$\dot{U}_{kB} = a^2\dot{U}_{kA1} + a\dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{k0} = j[(a^2 - a)x_{2\Sigma} + (a^2 - 1)x_{0\Sigma}]\dot{I}_{kA1}; (20)$$

$$\dot{U}_{kC} = j \left[(a - a^2) x_{2\Sigma} + (a - 1) x_{0\Sigma} \right] \dot{I}_{kA1}^{(1)} \quad (21)$$

На рис. 3,б и 3,в приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте однофазного короткого замыкания. Угол θ_U между напряжениями неповрежденных фаз зависит от соотношения между $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$. Он изменяется в широких пределах: $60^\circ \leq \theta_U \leq 180^\circ$.

Нижний предел соответствует условию $x_{0\Sigma} = \infty$; к верхнему пределу θ_U стремится при $x_{0\Sigma} \rightarrow 0$. Лишь при $x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$ угол $\theta_U = 120^\circ$.

19.4 Двухфазное короткое замыкание на землю

При одновременном коротком замыкании фаз B и C на землю в одной точке (рис.4,а) граничные условия будут:

$$\dot{I}_{kA}^{(1.1)} = 0; \quad (22)$$

$$\dot{U}_{kB}^{(1.1)} = 0; \quad (23)$$

$$\dot{U}_{kC}^{(1.1)} = 0. \quad (24)$$

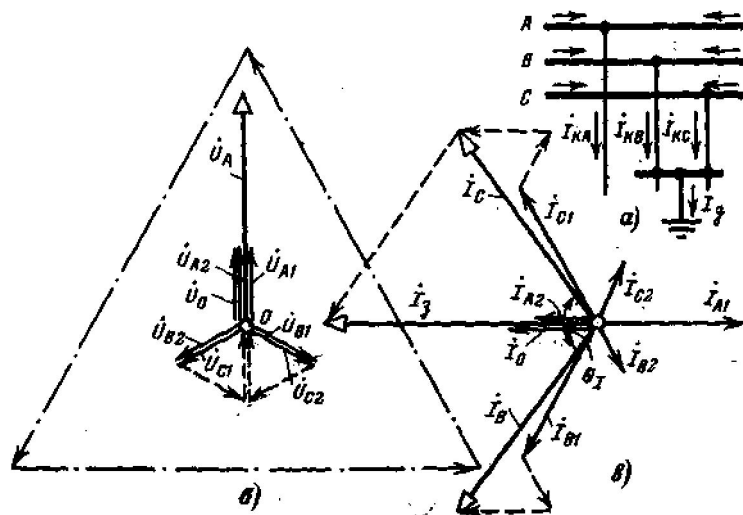


Рис. 4. Двухфазное короткое замыкание на землю.

а — принципиальная схема; б — векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания;
в — то же токов.

В записи через симметричные составляющие эти граничные условия дают:

$$\dot{I}_{kA1}^{(1.1)} + \dot{I}_{kA2}^{(1.1)} + \dot{I}_{k0}^{(1.1)} = 0 \quad (22a)$$

и

$$\dot{U}_{kA1}^{(1.1)} = \dot{U}_{kA2}^{(1.1)} = \dot{U}_{k0}^{(1.1)} = \frac{1}{3} \dot{U}_{kA}^{(1.1)}. \quad (25)$$

или:

$$\dot{I}_{kA2}^{(1.1)} jx_{2\Sigma} = \dot{I}_{k0}^{(1.1)} jx_{0\Sigma};$$

теперь, прибавив к обеим частям равенства $\dot{I}_{k0}^{(1.1)} jx_{2\Sigma}$ и учтя (22a), после небольших преобразований получим:

$$\dot{I}_{k0}^{(1.1)} = -\dot{I}_{kA1}^{(1.1)} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}; \quad (26)$$

аналогично

$$\dot{I}_{kA2}^{(1.1)} = -\dot{I}_{kA1}^{(1.1)} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \quad (27)$$

Учитывая (25) и (26), имеем:

$$\dot{U}_{kA1}^{(1.1)} = \dot{E}_{A\Sigma} - \dot{I}_{kA1}^{(1.1)} jx_{1\Sigma} = \dot{U}_{k0}^{(1.1)} = \dot{I}_{kA1}^{(1.1)} j \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}; \quad (28)$$

откуда

$$\dot{I}_{kA1}^{(1.1)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j[x_{1\Sigma} + (x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma})]}. \quad (29)$$

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания:

$$\dot{I}_{kB}^{(1.1)} = \left(a^2 + \frac{x_{2\Sigma} + ax_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right) \dot{I}_{kA1}^{(1.1)}; \quad (30)$$

$$\dot{I}_{kC}^{(1.1)} = \left(a - \frac{x_{2\Sigma} + a^2 x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right) \dot{I}_{kA1}^{(1.1)}. \quad (31)$$

Ток в земле

$$\dot{I}_3^{(1.1)} = 3\dot{I}_{k0}^{(1.1)} \quad (32)$$

Модули выражений в скобках, входящих в (30) и (31), одинаковы; они составляют:

$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} \quad (33)$$

В' зависимости от соотношения между $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ значение $m^{(1.1)}$ находится в пределах $1.5 \leq m^{(1.1)} \leq \sqrt{3}$.

Нижний предел наступает при $x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$, а верхний—при $x_{2\Sigma} / x_{0\Sigma}$, равном 0 или ∞ .

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного короткого замыкания на землю приведены на рис. 4,б и в. Угол θ_l между токами поврежденных фаз может изменяться в пределах $60^\circ \leq \theta_l \leq 180^\circ$, стремясь к нижнему пределу при $x_{0\Sigma} \rightarrow 0$ и к верхнему —при $x_{0\Sigma} \rightarrow \infty$, что соответствует условиям двухфазного короткого замыкания без соединения с землей.

Напряжение неповрежденной фазы (относительно земли) в месте короткого замыкания составляет:

$$\dot{U}_{kA}^{(1.1)} = 3\dot{U}_{kA1}^{(1.1)} \quad (34)$$

напряжения двух других фаз равны нулю.

20 Комплексные схемы замещения

Аналитические соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте короткого замыкания позволяют для каждого вида несимметричного короткого замыкания соединить между собой схемы отдельных последовательностей и образовать тем самым комплексную схему замещения для соответствующего вида короткого замыкания. Такие схемы приведены на рис. 1, причем здесь принято, что в месте замыкания имеется сопротивление дуги и схема каждой последовательности характеризуется соответствующим полным сопротивлением Z_1, Z_2, Z_0 .

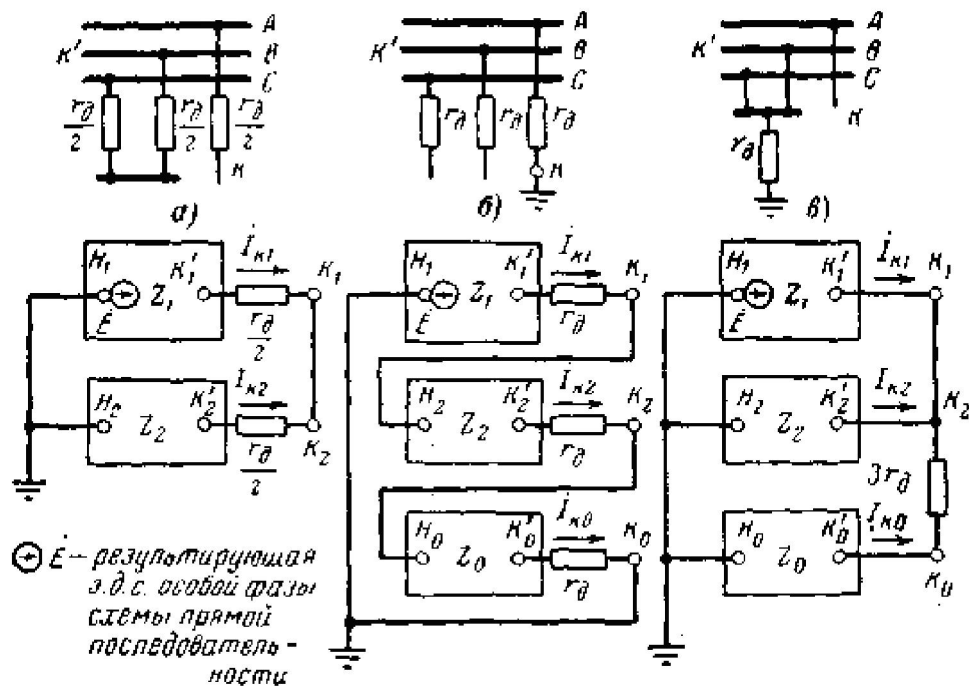


Рис. 1. Комплексные схемы замещения.

a — для двухфазного замыкания через дугу; *б* — для однофазного замыкания через дугу; *в* — для двухфазного замыкания на землю через дугу.

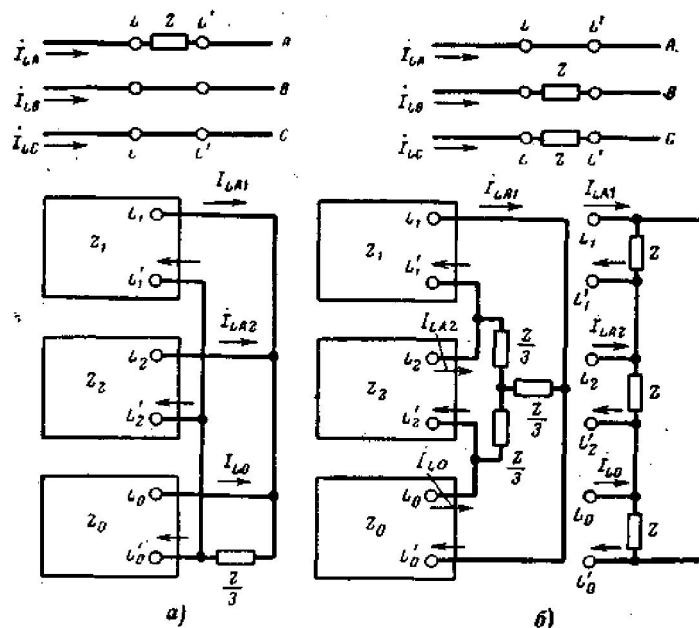


Рис. 2. Комплексные схемы замещения.

a — при наличии сопротивления в одной фазе; *б* — при наличии одинаковых сопротивлений в двух фазах.

Комплексная схема для двухфазного замыкания на землю (рис. 1,в) при $Z_0 = \infty$ или $r_D = \infty$ переходит в комплексную схему для обычного двухфазного замыкания. При отсутствии переходного сопротивления в месте замыкания достаточно положить равными нулю r_D .

Схема прямой последовательности обычно содержит много источников, в то время как в схемах рис. 1 условно показана лишь одна результирующая э. д. с.

Комплексные схемы особенно удобны при использовании расчетных моделей и установок, поскольку в этом случае можно измерить приборами токи и напряжения отдельных последовательностей для любого участка илюбой точки рассчитываемой системы,

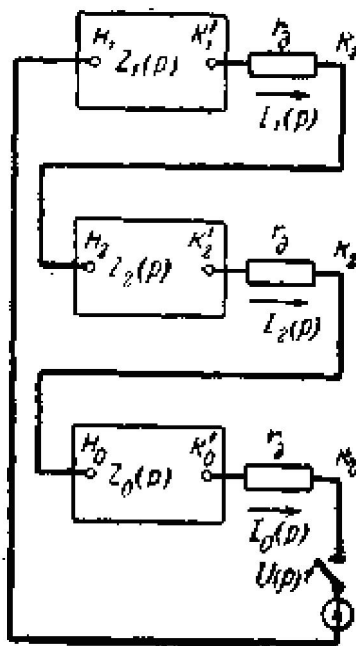


Рис. 3. Комплексная схема замещения в операторной форме для однофазного замыкания через дугу.

При учете лишь основной гармоники комплексные схемы замещения справедливы также для переходных процессов. Эти схемы позволяют определить (в соответствии с применяемым методом расчета) как периодические, так и аperiodические слагающие токов.

При строгом определении аperiodической слагающей тока целесообразно применение операторного метода. Так, например, для однофазного короткого замыкания эта слагающая может быть определена из комплексной схемы в операторной форме, представленной на рис. 3, где $Z_1(p), Z_2(p), Z_0(p)$ —операторные сопротивления соответствующих последовательностей, приведенные относительно места короткого замыкания, а $U(p)$ —изображение того напряжения, которое было в данной точке при предшествовавшем режиме, но взятое с обратным знаком. Переход от изображений к оригиналам осуществляют известными приемами.

Пример 1.

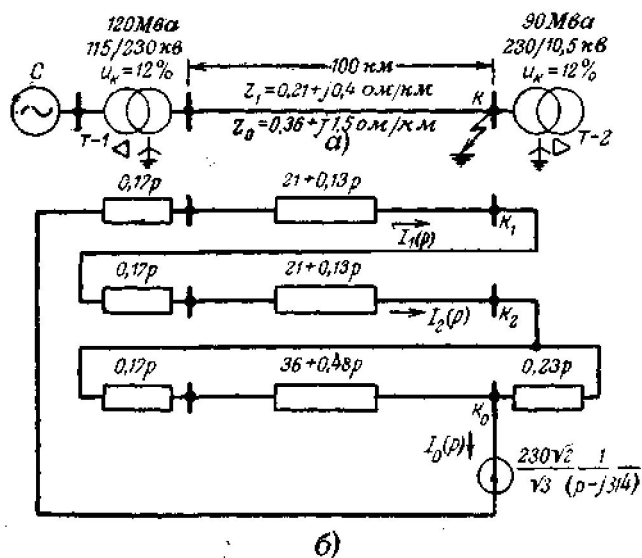


Рис 4. Пример 1 (а- исходная схема; б – комплексная схема замещения в операторной форме)

При однофазном металлическом коротком замыкании в конце линии схемы рис. 4,а найти выражение для тока в месте короткого замыкания. Исходные данные приведены на рис. 4,а. Источником является система, которая поддерживает у трансформатора $T-1$ синусоидальное напряжение постоянной амплитуды $\sqrt{2} \frac{115}{\sqrt{3}} \text{ кВ}$. Активными сопротивлениями трансформаторов пренебречь.

Комплексная схема замещения для рассматриваемого случая показана на рис. 4,б. Операторные сопротивления $Z(p) = r + Lp$ ее элементов выражены в именованных единицах и приведены к стороне 230 кВ.

Результирующие операторные сопротивления отдельных последовательностей составляют:

$$Z_{1\Sigma}(p) = 21 + 0.13p + 0.17p = 21 + 0.3p = Z_{2\Sigma}(p);$$

$$Z_{0\Sigma}(p) = (36 + 0.48p + 0.17p) // 0.23p = \frac{0.15p^2 + 8.15p}{0.88p + 36}$$

Суммарное операторное сопротивление при однофазном коротком замыкании

$$Z^{(1)}(p) = 2(21 + 0.3p) + \frac{0.15p^2 + 8.15p}{0.88p + 36} = \frac{p^2 + 100p + 2280}{1.32p + 54.5}$$

Примем, что в момент короткого замыкания напряжение источника проходило через нуль. Тогда приведенное напряжение системы как функция времени и ее изображение будут:

$$U_A = \sqrt{2} \frac{230}{\sqrt{3}} \sin \omega t \div U_Z(p) = \sqrt{2} \frac{230}{\sqrt{3}} \frac{1}{(p - j314)}.$$

Искомый ток в операторной форме

$$I_A(p) = \sqrt{2} \frac{230}{\sqrt{3}} \frac{3}{(p - j314)} \frac{(1.32p + 54.5)}{(p^2 + 100p + 2280)}.$$

Для характеристического уравнения

$$Z^{(1)}(p) = 0 = p^2 + 100p + 2280$$

находим корни:

$$p_1 = -35.15; p_2 = -64.85$$

Следовательно, при переходном процессе, помимо принужденного синусоидального тока, имеют место два свободных тока, затухающих экспоненциально с постоянными времени соответственно:

$$T_1 = -\frac{1}{-35.15} = 0.028c; T_2 = -\frac{1}{-64.85} = 0.015c.$$

После перехода от изображения к оригиналу искомое выражение тока в месте короткого замыкания будет:

$$i_A = 2340 \sin(\omega t - 0.44\pi) + 490e^{-t/0.028} + 1810e^{-t/0.015}$$

При достижении положительной амплитуды принужденного тока, к-то наступит через $t = \frac{(0.5 + 0.44)\pi}{314} = 0.0094c$, мгновенное значение тока в поврежденной фазе по полученному выражению составляет $i_A = 3650A$.

21 Правило эквивалентности прямой последовательности

Обращаясь к полученным в предыдущих лекциях выражениям для симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного короткого замыкания, замечаем, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте короткого замыкания. Следовательно, задача расчета любого несимметричного короткого замыкания прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида короткого замыкания.

В свою очередь структура полученных в предыдущих лекциях выражений позволяет ток прямой последовательности особой фазы (А) при любом виде несимметричного короткого замыкания выразить в общем виде как

$$I_{kA1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{jx_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)}}, (1)$$

где $Z_{\Delta}^{(n)}$ — дополнительное сопротивление, величина которого для каждого вида короткого замыкания определяется соответствующим выражением из табл. 1.

Помимо того, поскольку фазные токи в месте короткого замыкания также пропорциональны току прямой последовательности, модуль фазного тока в месте любого несимметричного короткого замыкания в общем виде можно представить как

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{k1}^{(n)}$$

где $m^{(n)}$ — коэффициент, определяемый по данным табл. 1.

Таблица 1

Вид замыкания	(n)	$Z_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трёхфазное	(3)	0	1
Двухфазное	(2)	$r_D + jx_2$	$\sqrt{3}$
Однофазное	(1)	$3r_D + j(x_2 + x_0)$	3
Двухфазное на землю	(1,1)	$jx_2 // (3r_D + jx_0)$	$\left a^2 - \frac{jx_2 + a(3r_D + jx_0)}{3r_D + j(x_2 + x_0)} \right $

Двухфазное на землю при $r_D = 0$	(1,1)	$jx_2 // jx_0$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_2 x_0}{(x_2 + x_0)^2}}$
-----------------------------------	-------	----------------	---

Обобщенная запись выражения (1) позволила Н. Н. Щедрину впервые сформулировать следующее весьма важное положение.

Ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания может быть определен как ток при трехфазном коротком замыкании в точке, удаленной от действительной точки короткого замыкания на дополнительное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$, которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида короткого замыкания определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки схемы, а также в общем случае сопротивлением возникшей дуги.

Это положение, которое называют правилом эквивалентности прямой последовательности, справедливо при условии, что рассматривается только основная гармоника тока несимметричного короткого замыкания.

Напряжение \dot{U}_{k1} можно записать в общем виде как

$$\dot{U}_{k1}^{(n)} = Z_{\Delta}^{(n)} \dot{I}_{k1}^{(n)}.$$

Для большей наглядности рис. 1 иллюстрирует смысл эквивалентного трехфазного короткого замыкания, при котором могут быть найдены ток и напряжение прямой последовательности в месте заданного несимметричного короткого замыкания.

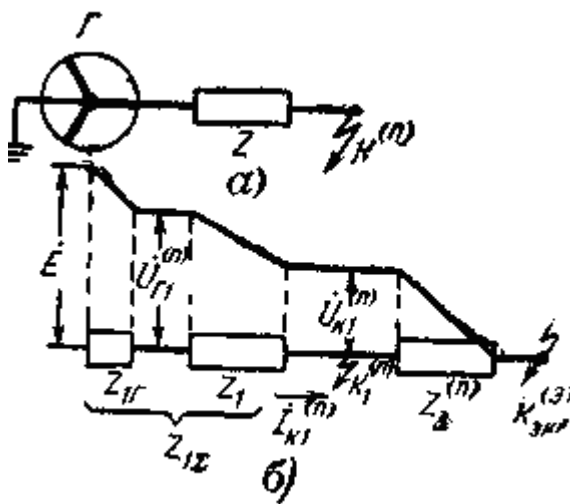


Рис. 1.

Установленная идентичность между током прямой последовательности несимметричного короткого замыкания и током при некотором эквивалентном трехфазном коротком замыкании указывает, что все полученные ранее выражения для тока трехфазного короткого замыкания можно распространить на случаи несимметричных коротких замыканий.

Так, при отсутствии демпферных обмоток постоянную времени затухания свободного переходного тока прямой последовательности любого вида короткого замыкания при чисто индуктивной цепи статора можно определять по выражению:

$$T_d'^{(n)} = T_{f0} \frac{x_d' + x_\Delta^{(n)}}{x_d + x_\Delta^{(n)}}$$

где $x_\Delta^{(n)}$ —дополнительная реактивность для данного вида короткого замыкания, определяемая аналогично $Z_\Delta^{(n)}$ (табл. 1), но при $r = 0$.

При наличии демпферных обмоток приближенные значения постоянных времени затухания свободных переходного и сверхпереходного токов прямой последовательности любого вида короткого замыкания будут иметь вид:

$$T_d'^{(n)} \approx T_f'^{(n)} + T_{1d}'^{(n)}$$

и

$$T_d''^{(n)} \approx \frac{\sigma'^{(n)} T_f'^{(n)} T_{1d}'^{(n)}}{T_f'^{(n)} + T_{1d}'^{(n)}}$$

где значения $T_f'^{(n)}$, $T_{1d}'^{(n)}$ и $\sigma'^{(n)}$ должны быть определены соответственно по формулам, рассмотренным при изучении переходных процессов в синхронном генераторе с учетом дополнительной реактивности $x_\Delta^{(n)}$.

Для эквивалентной постоянной времени затухания аperiodической слагающей тока статора при любом виде короткого замыкания можно написать выражение в общем виде

$$T_{a.\Sigma}^{(n)} = \frac{x_{2\Sigma} + x_\Delta^{(n)}}{\omega(r_\Sigma + r_\Delta^{(n)})}, \text{сек},$$

где $r_\Delta^{(n)}$ —дополнительное активное сопротивление для данного вида короткого замыкания, определяемое, как и $x_\Delta^{(n)}$, но при $x = 0$.

Таким образом, изменение во времени действующего значения продольного тока прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании можно представить как

$$I_{d1t}^{(n)} = I_{dt}^{(n)} + I_{d1tc8/0}^{(n)} e^{-\frac{t}{T_d'^{(n)}}} + I_{d1tc8/0}''^{(n)} e^{-\frac{t}{T_d''^{(n)}}} + \Delta I_{d1np}^{(n)} F_{dt}^{(n)} \leq \frac{U_H}{x_{an1} + x_\Delta^{(n)}};$$

причем данное выражение ограничено условием, что под действием АРВ напряжение прямой последовательности генератора не может превзойти нормальное значение. Для мгновенного значения тока (фазы А) при любом виде короткого замыкания справедливо:

$$i_A^{(n)} = m^{(n)} \{ i_{1A}^{(n)} - [U_{q0} \cos \gamma_0 + U_{d0} \sin \gamma_0] \frac{x_{d\Sigma}''^{(n)} + x_{q\Sigma}''^{(n)}}{2x_{d\Sigma}''^{(n)} x_{q\Sigma}''^{(n)}} e^{-\frac{t}{T_{a.\Sigma}^{(n)}}} - \\ - [U_{q0} \cos(2t + \gamma_0) - U_{d0} \sin(2t + \gamma_0)] \frac{x_{q\Sigma}''^{(n)} - x_{d\Sigma}''^{(n)}}{2x_{d\Sigma}''^{(n)} x_{q\Sigma}''^{(n)}} e^{-\frac{t}{T_{a.\Sigma}^{(n)}}} \}$$

где $x_{d\Sigma}''^{(n)}$ и $x_{q\Sigma}''^{(n)}$ определены с учетом реактивности $x_\Delta^{(n)}$; $i_{1A}^{(n)}$ — мгновенное значение тока прямой последовательности фазы А.

Важно заметить, что *величина тока прямой последовательности в месте короткого замыкания, а также связанные с ней величины токов других последовательностей зависят от сопротивлений всех последовательностей элементов рассматриваемой схемы* (включая сопротивление дуги при ее учете). Так, например, если нейтраль трансформатора, на выводах которого имеется однофазное или двухфазное замыкание на землю, заземлить через какое-либо сопротивление, то это скажется на величинах токов всех последовательностей, хотя токи прямой и обратной последовательностей через это сопротивление и не протекают.

22 Однократная продольная несимметрия

Конечной целью анализа нарушений нормального режима работы энергосистемы при продольной несимметрии или сложных видах повреждений является расчет токов и напряжений как в точке (точках) нарушений нормальной работы, так и в других узлах ЭЭС с целью выбора и настройки элементов СЭС.

Для формализации анализа продольную несимметрию представляют как включение в каждую фазу трехфазной сети неодинаковых сопротивлений. При рассмотрении только основной гармоники исходят из следующих условий:

- включение сопротивлений в фазу сети при неизменной ЭДС источника питания тождественно шунтированию таких же сопротивлений в других фазах;
- разрыв фазы эквивалентен включению в месте разрыва источника напряжения, равного падению напряжения на концах разорванного участка фазы;
- шунтирование сопротивления в фазе сети тождественно включению по значению такого же сопротивления, но с противоположным знаком.

В случае продольной несимметрии эффективным является метод симметричных составляющих, который дает следующие расчетные выражения:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{LA} &= \Delta\dot{U}_{LA1} + \Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0}; \\ \Delta\dot{U}_{LB} &= a^2\Delta\dot{U}_{LA1} + a\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0}; \\ \Delta\dot{U}_{LC} &= a\Delta\dot{U}_{LA1} + a^2\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0}; \\ \dot{I}_{LA} &= \dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}; \\ \dot{I}_{LB} &= a^2\dot{I}_{LA1} + a\dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}; \\ \dot{I}_{LC} &= a\dot{I}_{LA1} + a^2\dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0};\end{aligned}$$

где $\dot{I}_{LA}, \dot{I}_{LB}, \dot{I}_{LC}$ и $\Delta\dot{U}_{LA}, \Delta\dot{U}_{LB}, \Delta\dot{U}_{LC}$ - токи и напряжения для несимметричной системы фазных величин; $\dot{I}_{LA1}, \dot{I}_{LA2}, \dot{I}_{LA0}$ и $\Delta\dot{U}_{LA1}, \Delta\dot{U}_{LA2}, \Delta\dot{U}_{LA0}$ - симметричные составляющие токов и падений напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности особой фазы А.

Величины $\dot{I}_{LA1}, \dot{I}_{LA2}, \dot{I}_{LA0}$ и $\Delta\dot{U}_{LA1}, \Delta\dot{U}_{LA2}, \Delta\dot{U}_{LA0}$ связаны между собой соотношениями

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = E_{A\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_{LA1};$$

$$\Delta\dot{U}_{LA2} = 0 - Z_{2\Sigma} I_{LA2};$$

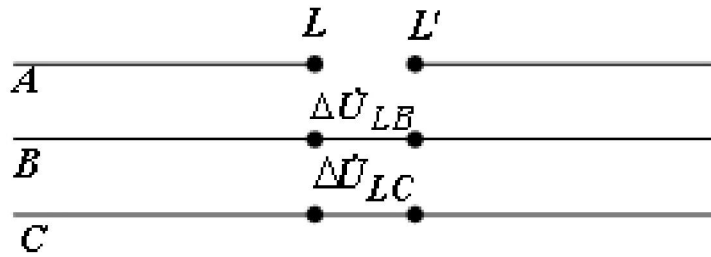
$$\Delta\dot{U}_{LA0} = 0 - Z_{0\Sigma} I_{LA0};$$

где $E_{A\Sigma}, Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ - суммарная ЭДС источников питания и результирующие сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности относительно точки возникновения несимметрии.

Дополнительные три уравнения для нахождения $I_{LA1}, I_{LA2}, I_{LA0}$ и $\Delta\dot{U}_{LA1}, \Delta\dot{U}_{LA2}, \Delta\dot{U}_{LA0}$ выписываются для конкретного вида поперечной несимметрии.

22.1 Разрыв одной фазы сети.

Рассмотрим разрыв фазы А трехфазной сети в точке L :



Уравнения для этого вида несимметрии имеют вид:

$$I_{LA} = 0;$$

$$\Delta U_{LB} = 0;$$

$$\Delta U_{LC} = 0;$$

или

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_{LB} = \Delta\dot{U}_{LC} &= a^2 \Delta\dot{U}_{LA1} + a \Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0} = a \Delta\dot{U}_{LA1} + a^2 \Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0} = \\ &= (a^2 - a) \Delta\dot{U}_{LA1} = (a^2 - a) \Delta\dot{U}_{LA2}; \end{aligned}$$

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA2};$$

$$a^2 \Delta\dot{U}_{LA1} + a \Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0} = (a^2 + a) \Delta\dot{U}_{LA1} + \Delta\dot{U}_{LA0} = -\Delta\dot{U}_{LA1} + \Delta\dot{U}_{LA0} = 0;$$

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA0};$$

$$I_{LA} = I_{LA1} + I_{LA2} + I_{LA0} = 0;$$

$$I_{LA1} = -(I_{LA2} + I_{LA0});$$

Откуда

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_{LA1}; \\
\Delta \dot{U}_{LA2} &= 0 - Z_{2\Sigma} I_{LA2}; \\
\Delta \dot{U}_{LA0} &= 0 - Z_{0\Sigma} I_{LA0}; \\
\Delta \dot{U}_{LA1} &= \Delta \dot{U}_{LA2}; \\
\Delta \dot{U}_{LA1} &= \Delta \dot{U}_{LA0}; \\
I_{LA1} &= -(I_{LA2} + I_{LA0});
\end{aligned}$$

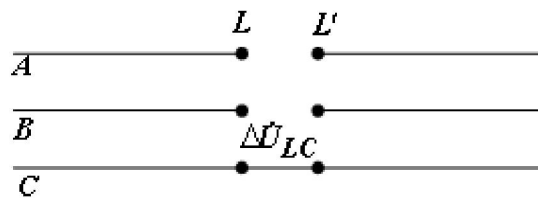
система 6 уравнений с 6 неизвестными.

Решая методом Крамера, находим

$$\begin{aligned}
I_{LA1} &= \frac{(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}) \dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma} Z_{0\Sigma}}; \\
I_{LA2} &= -\frac{Z_{0\Sigma} \dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma} Z_{0\Sigma}}; \\
I_{LA0} &= -\frac{Z_{2\Sigma} \dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma} Z_{0\Sigma}}; \\
\Delta \dot{U}_{LA1} &= \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} \dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma} Z_{0\Sigma}}; \\
\Delta \dot{U}_{LA2} &= \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} \dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma} Z_{0\Sigma}}; \\
\Delta \dot{U}_{LA0} &= \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma} \dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma} Z_{0\Sigma}}.
\end{aligned}$$

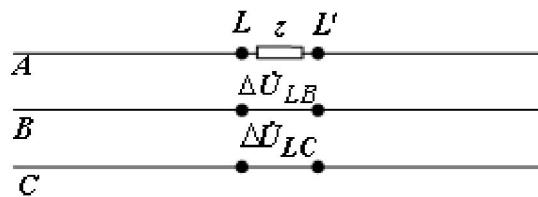
Аналогично можно найти значения $I_{LA1}, I_{LA2}, I_{LA0}$ и $\Delta \dot{U}_{LA1}, \Delta \dot{U}_{LA2}, \Delta \dot{U}_{LA0}$ для:

- разрыва двух фаз:



$$\begin{aligned}
I_{LA} &= 0; \\
I_{LB} &= 0; \\
\Delta U_{LC} &= 0;
\end{aligned}$$

- перекоса одной (двух) фаз:



$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{LA} &= zI_{LA}; \\ \Delta\dot{U}_{LB} &= 0; \\ \Delta\dot{U}_{LC} &= 0;\end{aligned}$$

В примере предыдущей лекции при разрыве фазы А в точке К (вместо короткого замыкания) имеем:

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = 5,173 \text{ Ом}; \quad E_{A\Sigma} = 65,037 \text{ кВ}; \quad x_{0\Sigma} = 5,118 \text{ Ом};$$

Тогда

$$I_{LA1} = \frac{(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma}Z_{0\Sigma}} = 8.40 \text{ кА};$$

$$I_{LA2} = -\frac{Z_{0\Sigma}\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma}Z_{0\Sigma}} = -4.18 \text{ кА};$$

$$I_{LA0} = -\frac{Z_{2\Sigma}\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma}Z_{0\Sigma}} = -4.22 \text{ кА};$$

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA2} = \Delta\dot{U}_{LA0} = \frac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}\dot{E}_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma}Z_{0\Sigma}} = 21,60 \text{ кВ};$$

а фазные токи и напряжения находятся из выражений

$$\Delta\dot{U}_{LA} = \Delta\dot{U}_{LA1} + \Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0};$$

$$\Delta\dot{U}_{LB} = a^2\Delta\dot{U}_{LA1} + a\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0};$$

$$\Delta\dot{U}_{LC} = a\Delta\dot{U}_{LA1} + a^2\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0};$$

$$I_{LA} = I_{LA1} + I_{LA2} + I_{LA0};$$

$$I_{LB} = a^2I_{LA1} + aI_{LA2} + I_{LA0};$$

$$I_{LC} = aI_{LA1} + a^2I_{LA2} + I_{LA0};$$

аналогично поперечной несимметрии.

22.2 Несимметрия от включения сопротивлений

Ограничимся рассмотрением случаев, когда в одну или в две фазы включаются одинаковые сопротивления Z (рис. 1, а и в). Такие условия могут возникнуть, например, при неодновременном расхождении контактов полюсов выключателя, при котором дуга отключаемого тока возникает еще не на всех полюсах.

Включение сопротивлений в одну или две фазы можно рассматривать как шунтирование таких же сопротивлений соответственно в двух других или третьей фазах (рис. 1, б и г), если при такой замене источники характеризуются величинами э. д. с, которые у них были в действительном предшествующем режиме.

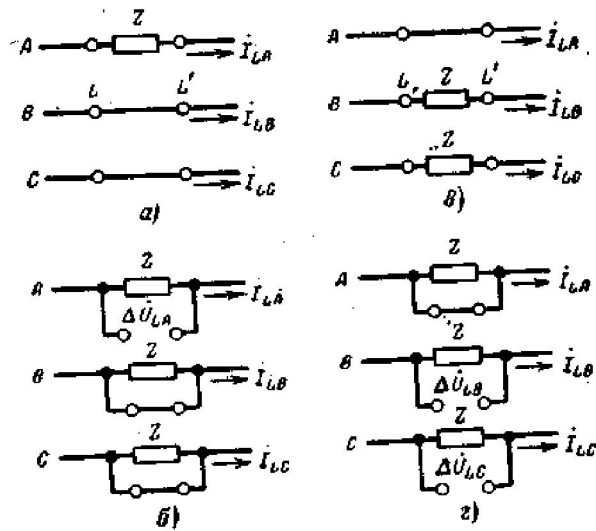


Рис. 1. Несимметрия от включения сопротивлений. а и б — в одну фазу; в и г — в две фазы.

Закорачивание сопротивления, вообще говоря, можно представить как включение такого же сопротивления, но с обратным знаком.

Для случая, когда имеется сопротивление в одной фазе, например A , имеем:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = Z \dot{I}_{LA}$$

два остальных граничных условий,

$$\Delta \dot{U}_{LB} = 0;$$

$$\Delta \dot{U}_{LC} = 0;$$

а также справедливы равенства

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}.$$

Представив

$$\Delta \dot{U}_{LA} = Z \dot{I}_{LA}$$

через симметричные составляющие и используя

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = 0 - jx_{L2\Sigma} \dot{I}_{LA2};$$

$$\Delta \dot{U}_{L0} = 0 - jx_{L0\Sigma} \dot{I}_{L0};$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA};$$

нетрудно получить выражение для дополнительного сопротивления в схеме прямой последовательности

$$Z_{\Delta L}^{(1)} = \frac{Z}{3} // jx_{L2\Sigma} // jx_{L0\Sigma}$$

Таким образом, учет сопротивления Z , включенного в одну фазу, сводится к тому, что вместо реактивности $x_{\Delta L}^{(1)}$ определяемой при разрыве фазы как

$$x_{\Delta L}^{(1)} = x_{L2\Sigma} // x_{L0\Sigma}$$

нужно в полученные ранее выражения ввести сопротивление $Z_{\Delta L}^{(1)}$, определяемого как

$$Z_{\Delta L}^{(1)} = \frac{Z}{3} // jx_{L2\Sigma} // jx_{L0\Sigma}.$$

Когда одинаковые сопротивления включены только в две фазы, например В и С (рис. 1в и з), для характеристики такой несимметрии нужно ввести другие граничные условия:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{LB} &= Z I_{LB}; \\ \Delta \dot{U}_{LC} &= Z I_{LC}; \\ \Delta \dot{U}_{LA} &= 0;\end{aligned}$$

После разложения на симметричные составляющие из граничных условий следует, что

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{L0} &= \frac{Z}{3} [(i_{L0} - i_{LA1}) + (i_{L0} - i_{LA2})]; \\ \Delta \dot{U}_{LA1} &= \frac{Z}{3} [(i_{LA1} - i_{LA2}) + (i_{LA1} - i_{L0})]; \\ \Delta \dot{U}_{LA2} &= \frac{Z}{3} [(i_{LA2} - i_{LA1}) + (i_{LA2} - i_{L0})].\end{aligned}$$

Эти три уравнения вместе с

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{LA2} &= 0 - jx_{L2\Sigma} I_{LA2}; \\ \Delta \dot{U}_{L0} &= 0 - jx_{L0\Sigma} I_{L0}; \\ \Delta \dot{U}_{LA1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - jx_{L1\Sigma} I_{LA1};\end{aligned}$$

позволяют найти расчетные выражения для всех симметричных составляющих токов и падений напряжений (см. табл. 1). Здесь лишь приведем выражения для дополнительного сопротивления, вводимого в схему прямой последовательности:

$$Z_{\Delta L}^{(2)} = [(Z // jx_{L0\Sigma}) + (Z // jx_{L2\Sigma})] // Z.$$

Расчетные выражения для симметричных составляющих токов и падений напряжений в месте продольной несимметрии, вызванной включением сопротивления в одну или две фазы, сведены в табл. 1. Разрыв одной или двух фаз является частным

случаем такой несимметрии; расчетные выражения для него получают из выражений, приведенных в табл. 1, полагая $Z = \infty$.

Таблица 1

**Симметричные составляющие токов и падений напряжений в месте
однократной продольной несимметрии**

Определяемые величины	При включении сопротивления	
	в одну фазу	в две фазы
\dot{I}_{LA1}	$\frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{jx_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(1)}}$	$\frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{jx_{L1\Sigma} + Z_{\Delta L}^{(2)}}$
$Z_{\Delta L}^{(n)}$	$\frac{Z}{3} // jx_{L2\Sigma} // jx_{L0\Sigma}$	$Z // [(Z // jx_{L2\Sigma}) + (Z // jx_{L0\Sigma})]$
\dot{I}_{LA2}	$-\frac{Z_{\Delta L}^{(1)}}{jx_{L2\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$	$-\frac{Z_{\Delta L}^{(2)}}{Z + jx_{L2\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$
\dot{I}_{L0}	$-\frac{Z_{\Delta L}^{(1)}}{jx_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$	$-\frac{Z_{\Delta L}^{(2)}}{Z + jx_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$
$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$Z_{\Delta L}^{(1)} \dot{I}_{LA1}$	$Z_{\Delta L}^{(2)} \dot{I}_{LA1}$
$\Delta \dot{U}_{LA2}$	$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$\frac{jx_{L2\Sigma} (Z - Z_{\Delta L}^{(2)})}{Z + jx_{L2\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$
$\Delta \dot{U}_{L0}$	$\Delta \dot{U}_{LA1}$	$\frac{jx_{L0\Sigma} (Z - Z_{\Delta L}^{(2)})}{Z + jx_{L0\Sigma}} \dot{I}_{LA1}$

22.3 Распределение напряжений при продольной несимметрии

При выводе основных соотношений и расчетных выражений, характеризующих каждый вид короткого замыкания, были приведены векторные диаграммы токов и напряжений в месте короткого замыкания и показаны их изменения в зависимости от сопротивления дуги.

Теперь проследим, как деформируются векторные диаграммы токов и напряжений при разных видах короткого замыкания по мере удаления от места короткого замыкания и при переходе через трансформатор.

Обратимся к схеме рис. 1, где в конце воздушной линии присоединены однополюсные выключатели, с помощью которых может быть осуществлен любой вид короткого замыкания. Для упрощения примем, что цепь короткого замыкания состоит из чисто индуктивных сопротивлений.

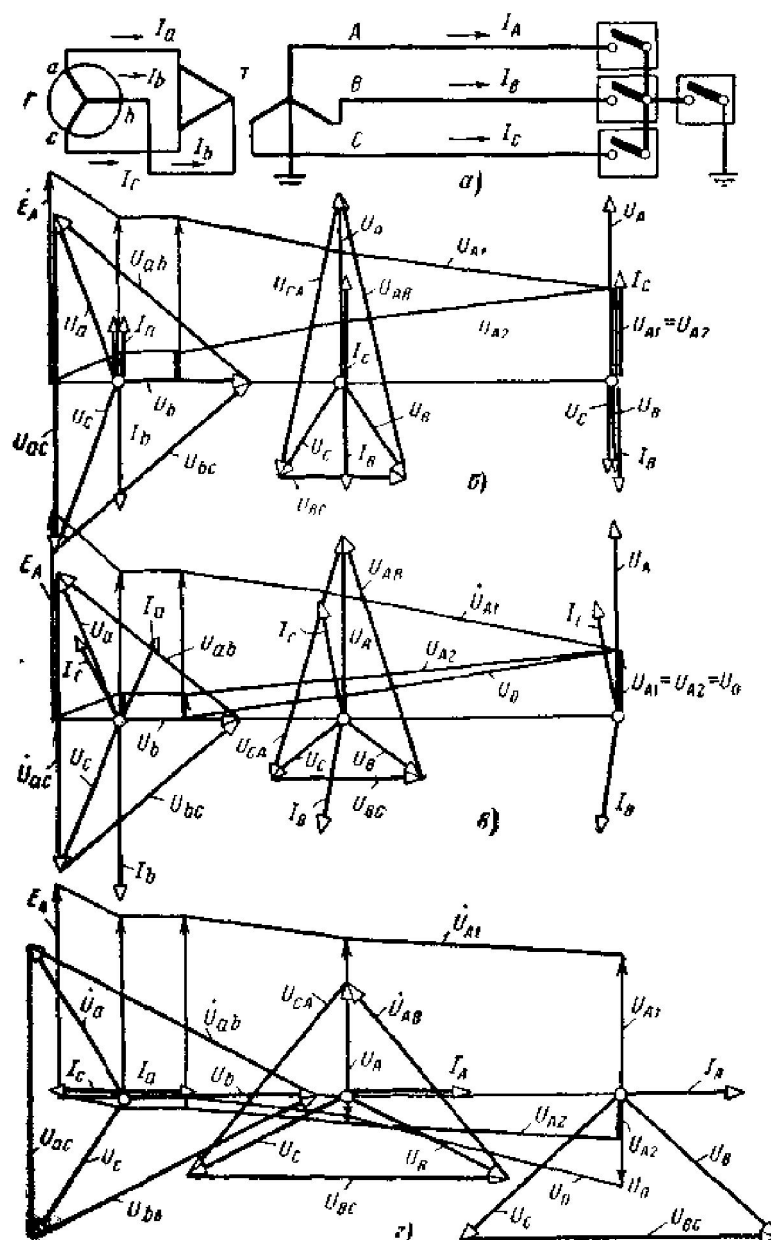


Рис. 1. Принципиальная схема (а), эпюры относительных напряжений отдельных последовательностей и векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном (б), двухфазном на землю (в) и однофазном (г) коротких замыканиях.

Характер эпюр напряжений отдельных последовательностей вдоль элементов рассматриваемой схемы для каждого несимметричного короткого замыкания представлен на рис. 1. По мере приближения к генератору напряжение прямой последовательности возрастает, а напряжения обратной и нулевой последовательностей уменьшаются (по абсолютной величине). При указанном на рис. 1 соединении обмоток трансформатора напряжение нулевой последовательности за трансформатором отсутствует. Как видно из соотношения между U_{A2} и U_{A0} в месте однофазного короткого замыкания, в данном случае, $x_{0\Sigma} > x_{2\Sigma}$.

Векторные диаграммы напряжений, построенные по соответствующим величинам симметричных составляющих, приведены для места короткого замыкания, в начале линии и на выводах генератора; при этом считалось, что обмотки трансформатора соединены по схеме группы $Y_0/\Delta-11$. Чтобы можно было сравнивать диаграммы на обеих сторонах

трансформатора, принято, что токи и напряжения выражены в относительных единицах или приведены к одной ступени напряжения.

Наибольшее искажение векторной диаграммы напряжений всегда получается в месте короткого замыкания. Для точек, расположенных ближе к генератору, это искажение становится все меньшим. Полностью симметричной сохраняется система векторов э. д. с.

Интересно отметить, что благодаря трансформатору с нечетной группой соединения обмоток однофазное короткое замыкание на стороне звезды генератор воспринимает как двухфазное короткое замыкание.

Нахождение симметричных составляющих токов и напряжений при продольной несимметрии, вообще говоря, полностью решается на основе соответствующей комплексной схемы. При этом следует иметь в виду некоторую особенность продольной несимметрии, заключающуюся в том, что если напряжения прямой последовательности по концам несимметричного участка отличаются только по величине, то напряжения обратной и нулевой последовательностей отличаются также и по знаку.

Наглядным примером могут служить эпюры напряжений отдельных последовательностей, показанные на рис. 2. Они построены для схемы (рис. 2,а). Пунктиром проведена эпюра напряжений в нормальном режиме данной схемы.

В схеме с односторонним питанием (рис. 2,а) при разрыве одной фазы (рис. 2,б) напряжение прямой последовательности за местом разрыва значительно выше, чем при разрыве двух фаз (рис. 2,в). До места разрыва, наоборот, в последнем случае напряжение несколько выше.

Напряжения обратной и нулевой последовательностей при разрыве одной и двух фаз по знаку противоположны. По мере удаления от места продольной несимметрии степень искажения векторной диаграммы напряжений снижается, так как возрастает относительное участие составляющей напряжения прямой последовательности даже при удалении от источника питания, как это видно из эпюр рис. 2 б и в. Правда, в последнем случае сами величины напряжений прямой последовательности существенно меньше (особенно при разрыве двух фаз), чем при нормальном режиме.

Если сохраняется предшествующая э. д. с. источника, то напряжения прямой последовательности до места разрыва оказываются, напротив, выше предшествующих.

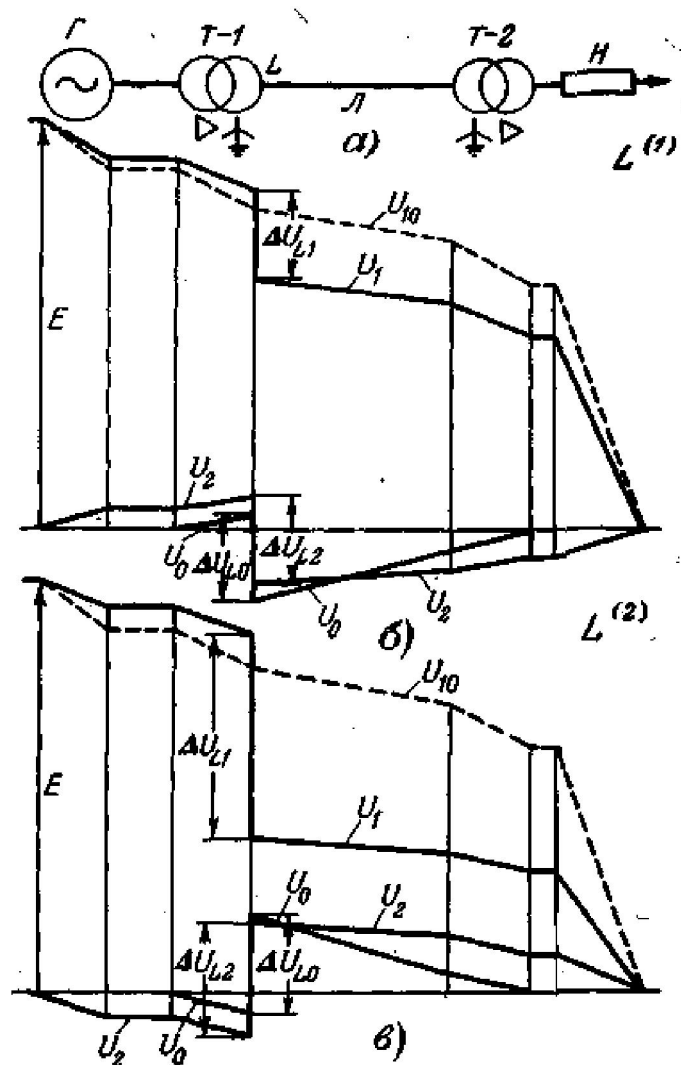


Рис. 2. Эпюры напряжений отдельных последовательностей.
 а — исходная схема; б — эпюры при разрыве одной фазы линии; в — эпюры при разрыве двух фаз линии.

Пример

Для схемы рис. 3,а построить векторные диаграммы токов в обеих цепях линии при разрыве провода фазы А цепи. Предшествующие фазные токи каждой цепи линии составляют 305 а.

Генератор Г 250 Мва; 13,8 кВ; $x'_d = 0,29$; $x_2 = 0,36$.

Трансформатор Т 240 Мва; 248/13,8 кВ; $u_K = 14\%$; $Y_0/\Delta-11$.

Автотрансформатор АТ 200 Мва; 209/121/11 кВ; $u_{BC} = 9\%$; $u_{BH} = 35\%$; $u_{CH} = 20\%$; $Y_0/\Delta-11$.

Линия Л 175 км; $x_1 = 0,41$ ом/км одной цепи; $x_0 = 3,5 x_1$ одной цепи; $x_{01-11} = 0,82$ ом/км.

Система С — источник бесконечной мощности ($x_0 = x_2 = x_1$) с напряжением 110 кВ.

Решение проведем по принципу наложения. Комплексная схема замещения для собственно аварийного режима заданной схемы представлена на рис. 3,б. Реактивности всех ее элементов выражены в омах и приведены к ступени напряжения, на которой имеется линия.

Результирующие реактивности схем отдельных последовательностей составляют:

$$x_{L1\Sigma} = 117,8 \text{ ом}; x_{L2\Sigma} = 119,8 \text{ ом}; x_{L0\Sigma} = 177,3 \text{ ом}.$$

Резльтирующая реактивность комплексной схемы относительно источника тока будет:

$$x_{\Sigma} = 117,8 // 119,8 // 177,3 = 44,5 \text{ ом}.$$

Собственно аварийная составляющая тока прямой последовательности в месте разрыва

$$I_{abLA} = -305 \frac{44,5}{117,8} = -115 \text{ а};$$

составляющие токов обратной и нулевой последовательностей в месте разрыва

$$I_{LA2} = -305 \frac{44,5}{119,3} = -113 \text{ а}; I_{L0} = -305 \frac{44,5}{177,3} = -77 \text{ а}.$$

Распределение этих токов в схемах соответствующих последовательностей показано на рис. 15-13,6.

По найденным составляющим токов на рис. 3, в построены требуемые векторные диаграммы токов; при этом условно принято, что предшествующий ток совпадает по фазе с собственно аварийной составляющей тока прямой последовательности.

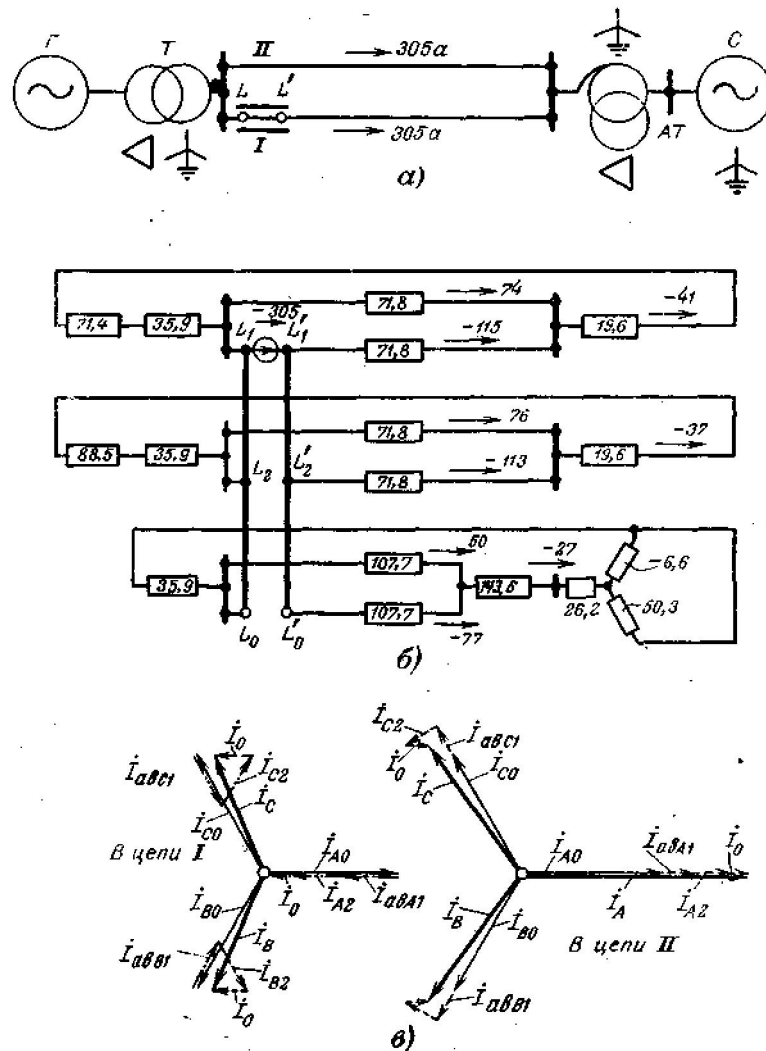


Рис. 3. а —исходная схема: б — комплексная схема замещения для собственно аварийного режима (с источником тока в месте разрыва фазы); в — векторные диаграммы токов в цепях линии-

23 Методы расчета токов короткого замыкания в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ

Расчет токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ, необходим для выбора и проверки электрооборудования по условиям КЗ, для выбора коммутационных аппаратов, уставок релейной защиты и заземляющих устройств.

Расчету для выбора и проверки электрооборудования по условиям КЗ подлежат:

- 1) начальное значение периодической составляющей тока КЗ;
- 2) аperiodическая составляющая тока КЗ;
- 3) ударный ток КЗ;
- 4) действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени, вплоть до расчетного времени размыкания поврежденной цепи.

При расчетах токов КЗ в электроустановках до 1 кВ **необходимо** учитывать:

- 1) индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, включая силовые трансформаторы, проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;
- 2) активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи;
- 3) активные сопротивления различных контактов и контактных соединений;
- 4) значения параметров синхронных и асинхронных электродвигателей.

При расчетах токов КЗ **рекомендуется** учитывать:

- 1) сопротивление электрической дуги в месте КЗ;
- 2) изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при КЗ;
- 3) влияние комплексной нагрузки (электродвигатели, преобразователи, термические установки, лампы накаливания) на ток КЗ, если номинальный ток электродвигателей нагрузки превышает 1,0 % начального значения периодической составляющей тока КЗ, рассчитанного без учета нагрузки.

При расчетах токов КЗ **допускается**:

- 1) максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ;
- 2) не учитывать ток намагничивания трансформаторов;
- 3) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;
- 4) принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений: 37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ;
- 5) не учитывать влияния асинхронных электродвигателей, если их суммарный номинальный ток не превышает 1,0 % начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей.

Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ **рекомендуется** рассчитывать в именованных единицах.

При составлении эквивалентных схем замещения параметры элементов исходной расчетной схемы следует **приводить** к ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ, а активные и индуктивные сопротивления всех элементов схемы замещения выражать в миллиомах.

При расчете токов КЗ в электроустановках, получающих питание непосредственно от сети энергосистемы, допускается считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения через эквивалентное индуктивное сопротивление системы. Значение этого сопротивления (x_c) в миллиомах, приведенное к ступени низшего напряжения сети, рассчитывают по формуле

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{к.ВН}} U_{\text{ср.ВН}}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{S_{\text{к}}} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ср.НН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;

$U_{\text{ср.ВН}}$ - среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка высшего напряжения трансформатора, В;

$I_{\text{к.ВН}} = I_{\text{поВН}}$ - действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА;

$S_{\text{к}}$ - условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

При отсутствии указанных данных эквивалентное индуктивное сопротивление системы в миллиомах допускается рассчитывать по формуле

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{откл.ном}} U_{\text{ср.ВН}}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{откл.ном}}$ - номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора цепи.

При расчете токов КЗ в электроустановках с автономными источниками электроэнергии необходимо учитывать значения параметров всех элементов автономной электрической системы, включая автономные источники (синхронные генераторы), распределительную сеть и потребители.

23.1 Расчет сопротивлений различных элементов электроустановки

23.1.1 Активное и индуктивное сопротивления силовых трансформаторов

Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающих трансформаторов ($r_{\text{т}}$, $x_{\text{т}}$) в миллиомах, приведенные к ступени низшего напряжения сети, рассчитывают по формулам:

$$r_{\text{т}} = \frac{P_{\text{к.ном}} U_{\text{НН.ном}}^2}{S_{\text{т.ном}}^2} \cdot 10^6; \quad (3)$$

$$x_{\text{т}} = \sqrt{u_{\text{к}}^2 - \left(\frac{100 P_{\text{к.ном}}}{S_{\text{т.ном}}} \right)^2} \cdot \frac{U_{\text{НН.ном}}^2}{S_{\text{т.ном}}} \cdot 10^4, \quad (4)$$

где $S_{\text{т.ном}}$ - номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$P_{\text{к.ном}}$ - потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;

$U_{\text{НН.ном}}$ - номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;

$u_{\text{к}}$ - напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности понижающих трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Δ/Y_0 , при расчете КЗ в сети низшего напряжения следует принимать равными соответственно активным и

индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей.

23.1.2 Активное и индуктивное сопротивления реакторов

Активное сопротивление токоограничивающих реакторов ($r_{1p} = r_{2p} = r_{0p}$) в миллиомах рассчитывают по формуле

$$r_{1p} = \frac{\Delta P_{\text{р.ном}}}{I_{\text{р.ном}}^2} \cdot 10^3, \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{р.ном}}$ - потери активной мощности в фазе реактора при номинальном токе, Вт;
 $I_{\text{р.ном}}$ - номинальный ток реактора, А.

Индуктивное сопротивление реакторов ($x_{1p} = x_{2p} = x_{0p}$) в миллиомах принимают как указано изготовителем или рассчитывают по формуле

$$x_{1p} = \omega(L - M) \cdot 10^3, \quad (6)$$

где ω - угловая частота напряжения сети, рад/с;
 L - индуктивность катушки трехфазного реактора, Гн;
 M - взаимная индуктивность между фазами реактора, Гн.

23.1.3 Активное и индуктивное сопротивления шинопроводов

При определении активного и индуктивного сопротивлений прямой и нулевой последовательностей шинопроводов следует использовать данные завода изготовителя, эксперимента или применять расчетный метод.

23.1.4 Активное и индуктивное сопротивление кабелей

Значения параметров прямой (обратной) и нулевой последовательности кабелей, применяемых в электроустановках до 1 кВ, принимают, как указано изготовителем.

При определении минимального значения тока КЗ рекомендуется учитывать увеличение активного сопротивления кабеля к моменту отключения цепи вследствие нагревания кабеля током КЗ. Значение активного сопротивления кабеля в миллиомах с учетом нагрева его током КЗ (r_g) рассчитывают по формуле

$$r_g = c_g r_{g_0}, \quad (7)$$

где c_g - коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления кабеля. При приближенных расчетах значение коэффициента c_g допускается принимать равным 1,5. При уточненных расчетах коэффициент c_g следует определять в зависимости от материала и сечения жил кабеля, тока КЗ и продолжительности КЗ; r_{g_0} - активное сопротивление кабеля при температуре g_0 , равной плюс 20 °С, мОм.

23.1.5 Активное и индуктивное сопротивления воздушных линий и проводов

Расчетное сопротивление проводов

Активное сопротивление прямой последовательности одной фазы проводника (r) в миллиомах рассчитывают по формуле

$$r = c_g K_c K_{пз} \rho_{g_{норм}} \frac{l}{S} \cdot 10^3,$$

где c_g - коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления с повышением температуры;

$K_c = 1,02$ - коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления многопроволочных жил проводов и кабелей вследствие скрутки. Для однопроволочных проводов $K_c = 1,0$;

$K_{пз}$ - коэффициент поверхностного эффекта при переменном токе. Для медных и алюминиевых проводов коэффициент принимают равным единице;

$\rho_{g_{норм}}$ - удельное сопротивление провода при $\vartheta = 20$ °С. Для медных проводов $\rho_{g_{норм}} = 0,0178$ Ом·мм²/м, для алюминиевых проводов $\rho_{g_{норм}} = 0,02994$ Ом·мм²/м; S - сечение проводника, мм²; l - длина проводника, м

Индуктивное сопротивление прямой последовательности (x) одной фазы провода круглого сечения в миллиомах на метр рассчитывают по формуле

$$x = 0,145 \lg \frac{a}{R_{п}},$$

где a - расстояние между проводниками, м;

$R_{п}$ - радиус проводника, м.

Если фазный и нулевой проводники выполнены из круглых проводов одинакового сечения и проложены параллельно, то индуктивное сопротивление цепи фаза - нуль ($x_{ф-н}$) в миллиомах на метр рассчитывают по формуле

$$x_{ф-н} = 0,29 \lg \frac{a}{R_{п}}.$$

При прямоугольной форме сечения нулевого проводника сопротивление цепи фаза - нуль определяют по сечению фазного проводника.

Активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности воздушных линий, имеющих нулевой провод с повторным заземлением, зависят от числа заземлений и коэффициента сезонности.

23.1.6 Активные сопротивления контактов и контактных соединений

Переходное сопротивление электрических контактов любого вида следует определять на основании данных экспериментов или с использованием расчетных методик. При приближенном учете сопротивлений контактов принимают: $r_k = 0,1$ мОм - для контактных соединений кабелей; $r_k = 0,01$ мОм - для шинопроводов; $r_k = 1,0$ мОм - для коммутационных аппаратов.

23.1.7 Активные и индуктивные сопротивления трансформаторов тока

При расчете токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ следует учитывать как индуктивные, так и активные сопротивления первичных обмоток всех многовитковых измерительных трансформаторов тока, которые имеются в цепи КЗ. Значения активных и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности принимают равными значениям сопротивлений прямой последовательности. Активным и индуктивным сопротивлением одновитковых трансформаторов (на токи более 500 А) при расчетах токов КЗ можно пренебречь.

23.1.8 Активные и индуктивные сопротивления катушек автоматических выключателей

Расчеты токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ следует вести с учетом индуктивных и активных сопротивлений катушек (расцепителей) максимального тока автоматических выключателей, принимая значения активных и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности равными соответствующим сопротивлениям прямой последовательности.

23.1.9 Параметры автономных источников электроэнергии и синхронных электродвигателей

При расчете начального значения периодической составляющей тока КЗ автономные источники, а также синхронные электродвигатели следует учитывать сверхпереходным сопротивлением по продольной оси ротора (x'_d), а при определении постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ - индуктивным сопротивлением для токов обратной последовательности x_2 и активным сопротивлением обмотки статора r . При приближенных расчетах принимают: $x''_{d(ном)} = 0,15$; $x_2 = x'_d$; $r = 0,15x'_d$.

23.1.10 Параметры асинхронных электродвигателей

При расчетах начального значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей последние следует вводить в схему замещения сверхпереходным индуктивным сопротивлением. При необходимости проведения уточненных расчетов следует также учитывать активное сопротивление статора. При приближенных расчетах принимают: сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя $x''_{AD(ном)} = 0,18$; активное сопротивление статора асинхронного двигателя $r_{AD} = 0,36x''_{AD}$.

23.1.11 Расчетные параметры комплексных нагрузок

При расчете токов КЗ от комплексных нагрузок следует учитывать их параметры прямой, обратной и нулевой последовательностей. Рекомендуемые значения сопротивлений прямой (Z_1) и обратной (Z_2) последовательностей отдельных элементов комплексной нагрузки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры элементов комплексной нагрузки

Потребители комплексной нагрузки	Обозначения на схемах	Cos $\varphi_{ном}$	Значения сопротивлений, отн. ед.	
			z_1^*	z_2^*
Асинхронные электродвигатели	АД	0,8	$0,07 + j 0,18$	$0,07 + j 0,18$
Синхронные электродвигатели	СД	0,9	$0,03 + j 0,16$	$0,03 + j 0,16$
Лампы накаливания	ЛН	1,0	1,0	1,33
Газоразрядные источники света	ЛГ	0,85	$0,86 + j 0,53$	$0,38 + j 0,24$
Преобразователи	П	0,9	$0,9 + j 0,44$	$1,66 + j 0,81$
Электротермические установки	ЭУ	0,9	$1 + j 0,49$	$0,4 + j 0,2$

В приближенных расчетах для узлов, содержащих до 70 % асинхронных двигателей, допускается значения модулей полных сопротивлений комплексной нагрузки принимать равными $Z_{1нг} = Z_{2нг} = 0,4$; $Z_{0нг} = 3,0$.

23.1.12 Активное сопротивление дуги в месте КЗ

При определении минимального значения тока КЗ следует учитывать влияние на ток КЗ активного сопротивления электрической дуги в месте КЗ.

Приближенные значения активного сопротивления дуги приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения активного сопротивления дуги

Расчетные условия КЗ	Активное сопротивление дуги (r_d), мОМ, при КЗ за трансформаторами мощностью, кВ·А					
	250	400	630	1000	1600	2500
КЗ вблизи выводов низшего напряжения трансформатора:						
- в разделке кабелей напряжением:						
0,4 кВ	15	10	7	5	4	3
0,525 кВ	14	8	6	4,5	3,5	2,5
0,69 кВ	12	7	5	4	3	2
- в шинопроводе типа ШМА напряжением:						
0,4 кВ	-	-	-	6	4	3
0,525 кВ	-	-	-	5	3,5	2,5
0,69 кВ	-	-	-	4	3	2
КЗ в конце шинопровода типа ШМА длиной 100 - 150 м напряжением:						
0,4 кВ	-	-	-	6-8	5-7	4-6
0,525 кВ	-	-	-	5-7	4-6	3-5
0,69 кВ	-	-	-	4-6	3-5	2-4

23.2 Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного кз

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей

трехфазного тока КЗ ($I_{по}$) в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей рассчитывают по формуле

$$I_{по} = \frac{U_{ср.НН}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}, \quad (8)$$

где $U_{ср.НН}$ - среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание, В;

$r_{1\Sigma}$, $x_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$r_{1\Sigma} = r_T + r_p + r_{ТА} + r_{кв} + r_{ш} + r_k + r_{1кб} + r_{вл} + r_d$$

$$\text{и } x_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_p + x_{ТА} + x_{кв} + x_{ш} + x_{1кб} + x_{вл},$$

где r_T и x_T - активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающего трансформатора, мОм;

$r_{ТА}$ и $x_{ТА}$ - активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм;

x_c - эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм, приведенное к ступени низшего напряжения;

r_p - активное и индуктивное сопротивления реакторов, мОм;

$r_{кв}$ и $x_{кв}$ - активное и индуктивное сопротивления токовых катушек автоматических выключателей, мОм;

$r_{ш}$ и $x_{ш}$ - активное и индуктивное сопротивления шинопроводов, мОм;

r_k - суммарное активное сопротивление различных контактов, мОм;

$r_{1кб}$, $r_{вл}$ и $x_{1кб}$, $x_{вл}$ - активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности кабельных и воздушных линий, мОм;

r_d - активное сопротивление дуги в месте КЗ, мОм;

Если электроснабжение электроустановки осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, то начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом подпитки от электродвигателей или комплексной нагрузки следует определять как сумму токов от энергосистемы и от электродвигателей или комплексной нагрузки.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронных электродвигателей ($I_{поСД}$) в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{поСД} = \frac{E_{ф.СД}''}{\sqrt{(x_d'' + x_{1\Sigma})^2 + (r_{СД} + r_{1\Sigma})^2}}, \quad (9)$$

где $E_{ф.СД}''$ - сверхпереходная ЭДС синхронного электродвигателя (фазное значение), В;

x_d'' и $r_{СД}$ - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, мОм;

$r_{1\Sigma}$ и $x_{1\Sigma}$ - суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между электродвигателем и точкой КЗ, мОм.

Для синхронных электродвигателей, которые до КЗ работали с перевозбуждением, сверхпереходную ЭДС ($E_{ф.СД}''$) в вольтах рассчитывают по формуле

$$E_{\phi, \text{сд}}'' = \sqrt{(U_{\phi|0|} + I_{|0|} x_d'' \sin \varphi|0|)^2 + (I_{|0|} x_d'' \cos \varphi|0|)^2}, \quad (10)$$

где $U_{\phi|0|}$ - фазное напряжение на выводах электродвигателя в момент, предшествующий КЗ, В;

$I_{|0|}$ - ток статора в момент, предшествующий КЗ, А;

$\varphi|0|$ - угол сдвига фаз напряжения и тока в момент, предшествующий КЗ, град, эл.;

x_d'' - сверхпереходное сопротивление по продольной оси синхронного электродвигателя, мОм.

Для синхронных электродвигателей, работавших до КЗ с недовозбуждением, сверхпереходную ЭДС ($E_{\phi, \text{сд}}''$) в вольтах рассчитывают по формуле

$$E_{\phi, \text{сд}}'' = \sqrt{(U_{\phi|0|} - I_{|0|} x_d'' \sin \varphi|0|)^2 + (I_{|0|} x_d'' \cos \varphi|0|)^2}, \quad (11)$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей ($I_{\text{поАД}}$) в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{\text{поАД}} = \frac{E_{\phi, \text{АД}}''}{\sqrt{(x_{\text{АД}}'' + x_{1\Sigma})^2 + (r_{\text{АД}} + r_{1\Sigma})^2}}, \quad (12)$$

где $x_{\text{АД}}''$ и $r_{\text{АД}}$ - соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, мОм;

$E_{\phi, \text{АД}}''$ - сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя, которую можно рассчитать по формуле

$$E_{\phi, \text{АД}}'' = \sqrt{(U_{\phi|0|} \cos \varphi|0| - I_{|0|} r_{\text{АД}})^2 + (U_{\phi|0|} \sin \varphi|0| - I_{|0|} x_{\text{АД}}'')^2}. \quad (13)$$

В электроустановках с автономными источниками электроэнергии начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ без учета подпитки от электродвигателей ($I_{\text{по}}$) в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{\text{по}} = \frac{E_{\phi}''}{\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}, \quad (14)$$

где $r_{1\Sigma}$ и $x_{1\Sigma}$ - соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$r_{1\Sigma} = r_{\text{ТА}} + r_{\text{кв}} + r_{\text{р}} + r_{\text{ш}} + r_{\text{к}} + r_{1\text{кб}} + r_{\text{вл}};$$

$$x_{1\Sigma} = x_d'' + x_{\text{ТА}} + x_{\text{кв}} + x_{\text{р}} + x_{\text{ш}} + x_{1\text{кб}} + x_{\text{вл}},$$

где E_{ϕ}'' - эквивалентная сверхпереходная ЭДС (фазное значение), В; значение этой ЭДС следует рассчитывать так же, как и для синхронных электродвигателей (см. п.

23.2 Расчет аperiodической составляющей тока КЗ

Наибольшее начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ (i_{a0}) в общем случае считают равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент КЗ

$$i_{a0} = \sqrt{2I_{\text{по}}} \quad (15)$$

В радиальных сетях аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени (i_{at}) рассчитывают по формуле

$$i_{at} = i_{a0} e^{-t/T_a}, \quad (16)$$

где t - время, с;

T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ с, равная

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega_c r_{\Sigma}}, \quad (17)$$

где x_{Σ} и r_{Σ} - результирующие индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ, мОм;

ω_c - синхронная угловая частота напряжения сети, рад/с.

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, независимые друг от друга ветви, то аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени следует определять как сумму аperiodических составляющих токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{at} = \sum_{i=1}^m i_{a0i} e^{-t/T_{ai}}, \quad (18)$$

где m - число независимых ветвей схемы;

i_{a0i} - начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в i -й ветви, кА.

23.3 Расчет ударного тока КЗ

Ударный ток трехфазного КЗ ($i_{уд}$) в электроустановках с одним источником энергии (энергосистема или автономный источник) рассчитывают по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2}I_{\text{по}} (1 + \sin \varphi_k e^{-t_{уд}/T_a}) = \sqrt{2}I_{\text{по}} K_{уд}, \quad (19)$$

где $K_{уд} = (1 + \sin \varphi_k e^{-t_{уд}/T_a})$ - ударный коэффициент,;

T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока

φ_k - угол сдвига по фазе напряжения или ЭДС источника и периодической составляющей тока КЗ, который рассчитывают по формуле

$$\varphi_k = \arctg x_{1\Sigma} / r_{1\Sigma};$$

$t_{уд}$ - время от начала КЗ до появления ударного тока, с, равное

$$t_{уд} = 0,01 \frac{\pi / 2 + \varphi_k}{\pi}.$$

При расчете ударного тока КЗ на выводах автономных источников, а также синхронных и асинхронных электродвигателей допускается считать, что:

ударный ток наступает через 0,01 с после начала КЗ;

амплитуда периодической составляющей тока КЗ в момент времени $t = 0,01$ с равна амплитуде этой составляющей в начальный момент КЗ.

Ударный ток от асинхронного электродвигателя ($i_{уд.АД}$) в килоамперах рассчитывают с учетом затухания амплитуды периодической составляющей тока КЗ по формуле

$$i_{уд.АД} = \sqrt{2} I_{поАД} \left(e^{-\frac{0,01}{T_p}} + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right), \quad (20)$$

где T_p - расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора, с;

T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока статора, с.

При этом T_p и T_a допускается рассчитывать по формулам

$$T_p = \frac{x_{АД}'' + x_{1кб}}{\omega_c r_2};$$

$$T_a = \frac{x_{АД}'' + x_{1кб}}{\omega_c (r_1 + r_{1кб})},$$

где ω_c - синхронная угловая частота, рад/с;

r_1 и r_2 - соответственно активное сопротивление статора и активное сопротивление ротора, приведенное к статору,.

Если точка КЗ делит расчетную схему на радиальные, не зависящие друг от друга ветви, то ударный ток КЗ ($i_{уд}$) определяют как сумму ударных токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{уд} = \sum_{i=1}^m \sqrt{2} I_{поi} (1 + e^{-t_{удi}/T_{ai}}), \quad (21)$$

где m - число независимых ветвей схемы;

$T_{поi}$ - начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i -й ветви, кА;

$t_{удi}$ - время появления ударного тока в i -й ветви, с;

T_{ai} - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ в i -й ветви, с.

Литература

1. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий : учебник для вузов / Б.И.Кудрин. — М. : Интермет инжиниринг, 2005. — 672с. : ил. — Библиогр.в конце кн. — ISBN 5-89594-113-5 /в пер./ : 693.00.

2. Рекус, Г.Г. Электрооборудование производств : учеб.пособие для вузов / Г.Г.Рекус. — М. : Высш.шк., 2005. — 709с. : ил. — ISBN 5-06-004414-9 /в пер./ : 294.27.

3. Проектирование систем внутрицехового электроснабжения промышленных предприятий : учеб.пособие для вузов / В. М. Степанов, В. С. Косырихин, Н. М. Меркулов ; ТулГУ. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2004. — 86с. : ил. — Дар каф. Электроэнергетики ТулГУ ТулГУ : 1330146-1330170. — Библиогр.в конце кн. — ISBN 5-7679-0591-6.

4. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : методическое пособие / С.М.Силюк, Л.Н.Свита; Белорусский НТУ. — Минск : БНТУ, 2004. — 104с. : ил. — Библиогр. в конце кн. — ISBN 985-479-125-4 : 35.00.

5. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети : учеб. пособие / А.В. Лыкин. — М. : Логос, 2007. — 254с. : ил. — (Новая университетская библиотека). — Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-98704-055-8 /в пер./ : 209.36.

6. Устойчивость электроэнергетических систем. Сборник задач и примеры их решения : метод. пособие к практ. занятиям для вузов / Е. В. Калентионок [и др.] ; под ред. Е. В. Калентионка ; БНТУ, Каф. "Электрические системы". — Минск, 2007. — 131 с. : ил. — Дар БНТУ ТулГУ : 1298744. — Библиогр.: с. 129. — ISBN 978-985-479-655-0.