

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емец Валерий Сергеевич
Должность: Директор филиала
Дата подписания: 30.06.2026 12:32:57
Уникальный программный ключ:
f2b8a1573c931f1098cfe699d1debd94fcff35d7

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Рязанский институт (филиал)
федерального государственного автономного образовательного учреждение
высшего образования
«Московский политехнический университет»

Ю.А. Юдаев

ПЕРЕХОДНЫЕ И АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Часть 1

Учебное пособие



Рязань 2025

УДК 621.311
ББК 31.27я73
Ю16

Юдаев, Ю.А.

Ю16 Аварийные и переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие. Часть 1 / Ю.А. Юдаев. – Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2025. – 64 с.

Предназначено для магистров и бакалавров обучающихся по направлениям: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехник, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рассматриваются аварийные и переходные процессы, которые создаются в системах электроснабжения, причины их возникновения и характерные варианты протекания. Приводятся методы расчёта переходных процессов.

Печатается по решению методической комиссии Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.

УДК 621.311
ББК 31.27я73

© Юдаев Ю.А., 2025
© Рязанский институт (филиал)
Московского политехнического
университета, 2025

Содержание

Список сокращений	4
Введение	5
1 Общие сведения о переходных процессах в линейных электрических цепях	6
1.1 Законы коммутации	6
1.2 Классический метод расчета переходных процессов	7
1.3 Подключение источника ЭДС к цепи с последовательным соединением сопротивления и индуктивным элементом	8
1.4 Переходные процессы в цепи постоянного тока с одним емкостным элементом	10
1.5 Подключение последовательно соединенных элементов к источнику постоянной ЭДС	12
1.6 Подключение последовательной RCL цепи к источнику синусоидального напряжения	14
1.7 Переходные процессы в системах электроснабжения	16
1.8 Режимы работы систем электроснабжения	17
1.9 Причины возникновения переходных процессов	18
1.10 Последствия переходных процессов в системах электроснабжения	20
1.11 Классификация электромеханических переходных процессов	21
2 Токи трехфазного короткого замыкания	22
2.1 Короткое замыкание на зажимах генератора с автоматической регулировкой возбуждения	27
2.2 Короткие замыкания в удаленных точках системы ЭС	29
2.3 Начальный ток короткого замыкания	32
2.4 Ток короткого замыкания в произвольный момент времени	33
2.5 Установившийся режим короткого замыкания	34
3 Короткие замыкания в системах электроснабжения	37
3.1 Виды, причины и последствия коротких замыканий	37
3.2 Назначение расчетов коротких замыканий	40
3.3 Математические допущения при расчётах токов короткого замыкания	40
3.4 Расчетные схемы и параметры их элементов	42
3.5 Схемы замещения и их преобразования	45
4 Несимметричные аварийные режимы систем ЭС	48
4.1 Поперечная несимметрия СЭС в аварийных режимах	49
4.2 Междофазное короткое замыкание (двухфазное КЗ)	52
4.3 Учёт переходного сопротивления в месте короткого замыкания	55
4.4 Однофазное короткое замыкание	56
4.5 Соотношения между токами несимметричных коротких замыканий и трёхфазного короткого замыкания	59
Библиографический список	63

Список сокращений

АВР – автоматическое включение резерва (восстановление питания потребителей путём автоматического присоединения резервных источников питания взамен рабочих источников, получивших повреждение при аварии).

АПВ – автоматическое повторное включение (восстановление питания потребителей или межсистемных и внутрисистемных электрических связей путём автоматического включения выключателей, отключенных устройствами защиты при авариях или случайных отключениях).

АРВ – автоматическое регулирование возбуждения (регулирование тока в обмотке возбуждения синхронного генератора, синхронного компенсатора и синхронного двигателя под действием автоматической системы регулирования).

ВЛ – воздушная линия.

ВН – высшее напряжение (например, обмотка высшего напряжения трансформатора).

ГПП – главная понижающая подстанция.

ГЭС – гидравлическая электростанция.

ИРМ – источники реактивной мощности (синхронные компенсаторы или конденсаторные батареи).

КЗ – короткое замыкание.

КЛ – кабельная линия.

ЛЭП – линия электропередачи (линия для передачи электрической энергии от источника к потребителю).

НН – низшее напряжение (например, обмотка НН трансформатора).

ОВ – обмотка возбуждения (обмотка для возбуждения постоянного магнитного поля в синхронном генераторе, двигателе, компенсаторе).

ПП – переходный процесс.

ПР – переходный режим.

РУ – распределительное устройство (РУ электрической станции или подстанции предназначены для распределения электроэнергии между отдельными потребителями).

СН – среднее напряжение (например, вывод СН автотрансформатора).

СЭС – система электроснабжения (это часть электроэнергетической системы, непосредственно осуществляющая снабжение электрической энергией потребителей).

ТЭС – тепловая электростанция.

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль.

УР – установившийся режим (режим работы ЭС или СЭС, параметры которого неизменны во времени).

ЭС – электрическая система (это условно выделенная часть электроэнергетической системы, в которой генерируется, преобразуется, передаётся и потребляется электрическая энергия).

ЭЭС – электроэнергетическая система (это совокупность электрических станций, электрических и тепловых сетей и узлов потребления, объединённых процессом производства, передачи и распределения электроэнергии и теплоэнергии и связанных общим оперативным и хозяйственным управлением).

Введение

Изучение аварийных и переходных процессов в системах электроснабжения является составной частью в структуре комплексной подготовки специалистов электроэнергетиков. Понимание этих процессов должно сформировать представление о работе сложных электрических и электромеханических систем не только в нормальных условиях эксплуатации, но и в аварийных режимах.

Изучение переходных процессов даёт возможность лучше понять сущность явлений, происходящих в системах электроснабжения, и, следовательно, возможность овладеть методами управления этими процессами.

При знакомстве с данным учебным пособием студенты должны получить представление о технике расчётов и выработать понимание задач и допущений, положенных в основу этих расчётов, привыкнуть к инженерной оценке получающихся результатов. Курс позволяет на примерах решения простых задач овладевать основными методами и приёмами анализа, вырабатывать навыки физической интерпретации результатов решения сложных задач, которые относительно легко решаются с помощью современной вычислительной техники

Предлагаемое учебное пособие основано на материалах работы [1], которое дополнено общими сведениями о переходных процессах в линейных электрических цепях и методами численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, которые описывают ПП.

В учебном пособии на основе научно-технических источников рассмотрены наиболее важные вопросы по переходным процессам в системах электроснабжения.

Материал учебного пособия может служить дополнением к материалам, излагаемым на лекциях, изучаемым на упражнениях и в ходе самостоятельной работы.

В полном объёме данное учебное пособие рассчитано на студентов магистратуры по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а отдельные разделы используются для подготовки бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

1 Общие сведения о переходных процессах в линейных электрических цепях

Переходные процессы возникают в электрических цепях при различных воздействиях, приводящих к изменению их режима работы, т. е. при действии различного рода коммутационной аппаратуры, например ключей, переключателей для включения или отключения источника или приемника энергии, при обрывах в цепи, при коротких замыканиях отдельных участков цепей и т. д. [1, 2].

Причиной возникновения переходных процессов в цепях является наличие в них катушек индуктивности и конденсаторов, которые накапливают энергию магнитного и электрического полей и не могут изменяться скачкообразно

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \quad (1.1)$$

$$W_c = \frac{Cu^2}{2}. \quad (1.2)$$

В общем случае переходные процессы в электрических цепях описываются дифференциальными уравнениями.

1.1 Законы коммутации

Энергия, запасённая в индуктивном и ёмкостном элементах не может изменяться скачком. Изменение этой энергии обуславливает переходный процесс.

Законы коммутации формулируются следующим образом – ток в индуктивном элементе и напряжение на ёмкостном элементе не могут изменяться скачком.

Первый закон коммутации: изменение тока в индуктивном элементе скачком невозможно. Другая формулировка этого закона: ток через индуктивный элемент i_L до коммутации равен току через индуктивный элемент в момент коммутации. Это можно записать в следующем виде

$$i_L(t_-) = i_L(t_+), \quad (1.3)$$

где t – момент времени, в который произошла коммутация в цепи.

Второй закон коммутации: изменение напряжения на ёмкостном элементе скачком невозможно, или напряжение на ёмкостном элементе до коммутации равно напряжению на ёмкостном элементе в момент коммутации

$$u_c(t_-) = u_c(t_+). \quad (1.4)$$

Эти законы следуют из соотношений, описывающих напряжение на индуктивности и ток через конденсатор

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad i_C = C \frac{du_C}{dt}. \quad (1.5)$$

Если i_L или u_C изменяются скачками, то получаются бесконечно большие значения напряжения u_L и тока i_C , что противоречит законам физики.

Токи в индуктивных элементах i_L и напряжения на емкостных элементах u_C до коммутации называются начальными условиями.

Если токи в индуктивных элементах и напряжения на емкостных элементах цепи в момент времени $t = 0$ равны нулю, то такие условия называются нулевыми начальными условиями. В противном случае имеем ненулевые начальные условия.

1.2 Классический метод расчёта переходных процессов

Классический метод расчёта переходных процессов основан на решении дифференциальных уравнений методами классической математики.

Расчёт переходного процесса в цепи классическим методом содержит следующие этапы:

1) составление системы уравнений с использованием законов Кирхгофа, Ома, электромагнитной индукции, которые описывают состояние цепи до коммутации и после коммутации в установившемся режиме;

2) составление уравнения или системы дифференциальных уравнений с использованием законов Кирхгофа, Ома, электромагнитной индукции. Для простых цепей получаются дифференциальные уравнения первого или второго порядков, в котором в качестве искомой величины выбирают ток в индуктивности или напряжение на конденсаторе;

3) нахождение решения неоднородного дифференциального уравнения цепи в виде суммы частного решения неоднородного дифференциального уравнения и общего решения.

Применительно к электрическим цепям в качестве частного решения неоднородного дифференциального уравнения выбирают установившийся режим в рассматриваемой цепи т. е. постоянные токи и напряжения, если в цепи действуют источники постоянных ЭДС и токов, или синусоидальные напряжения и токи при действии источников синусоидальных ЭДС и токов.

Токи и напряжения установившегося режима обозначают i_y и u_y и называют установившимися.

Общее решение однородного дифференциального уравнения описывает процесс в цепи без источников ЭДС и тока, который называют свободным процессом. Токи и напряжения свободного процесса обозначают $i_{св}$ и $u_{св}$ и называют свободными.

В общем решении $i = i_y + i_{св}$ и $u = u_y + u_{св}$ необходимо найти постоянные интегрирования, которые определяются из начальных условий.

1.3 Подключение источника ЭДС к цепи с последовательным соединением сопротивления и индуктивным элементом

Проводится анализ переходного процесса в цепи при замыкании ключа S в момент времени $t = 0$ (рисунок 1.1).

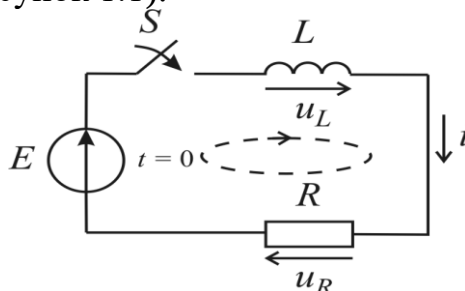


Рисунок 1.1 – Подключение источника ЭДС к цепи с последовательным соединением сопротивления и индуктивного элемента

При выбранном обходе контура по часовой стрелке с помощью второго закона Кирхгофа и закона Ома записываются уравнения, которые описывают состояние цепи

$$u_L + u_R = E, \quad (1.6)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt}, \quad u_R = Ri. \quad (1.7)$$

Подставляя в (1.6) значения (1.7) получается неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка

$$L \frac{di}{dt} + iR = E. \quad (1.8)$$

Находится общее решение неоднородного дифференциального уравнения (1.8) как сумма его частного решения и общего решения.

Частным решением неоднородного дифференциального уравнения первого порядка (1.8) является постоянный ток, который протекает после завершения переходного процесса и называется установившимся током

$$i_y = \frac{E}{R}. \quad (1.9)$$

Общее решение однородного дифференциального уравнения

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0, \quad (1.10)$$

называется *свободным током*, который равен

$$i_{св} = Ae^{pt}, \quad (1.11)$$

где p – корень характеристического уравнения

$$p = -\frac{R}{L},$$

$$L \cdot p + R = 0. \quad (1.12)$$

В этом случае общее решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка (1.8) имеет вид

$$i = i_y + i_{св} = \frac{E}{R} + A e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (1.13)$$

Для определения постоянной интегрирования A необходимо использовать закон коммутации для индуктивного элемента (1.3). В момент времени замыкания ключа $t = 0$ ток через индуктивность будет равен току до замыкания ключа S , т. е. $i(0_-) = i(0_+) = 0$.

Следовательно $0 = \frac{E}{R} + A e^{-\frac{R}{L}t}$ или $0 = \frac{E}{R} + A$, откуда $A = -\frac{E}{R}$.

Подставив это значение постоянной A в (1.13), получаем закон изменения тока в цепи (рисунок 1.2)

$$i = \frac{E}{R} (1 + e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1.14)$$

где τ – постоянной времени цепи, с, $\tau = \frac{L}{R}$.

Постоянная времени определяет скорость нарастания тока и равна времени, за которое ток i достиг бы установившегося значения $i_y = \frac{E}{R}$, если бы скорость его изменения оставалась неизменной и равной начальному значению скорости в момент $t = 0$ $\frac{di}{dt} = \frac{E}{R}$.

Обычно переходный процесс можно считать практически закончившимся через интервал времени 3τ с момента коммутации, когда ток достигнет значения $i = 0,95 \frac{E}{R}$ (рисунок 1.2).

Зная значение тока, как функцию времени можно определить значения напряжений на резистивном и индуктивном элементах

$$u_R = R_i = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad u_L = L \frac{d_i}{d_t} = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.15)$$

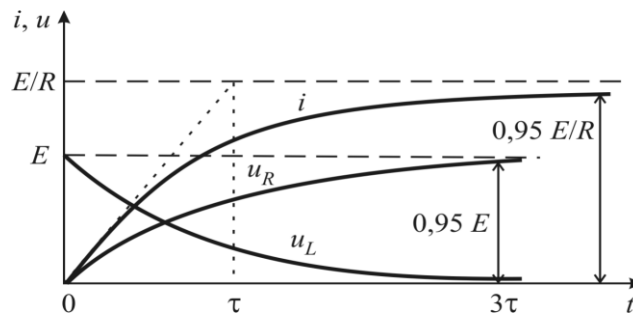


Рисунок 1.2 – Временные зависимости тока и напряжения при переходном процессе с индуктивным элементом

1.4 Переходные процессы в цепи постоянного тока с одним ёмкостным элементом

Переходный процесс, протекающий в цепи, показанной на рисунке 1.3, описывается неоднородным дифференциальным уравнением на основе второго закона Кирхгофа, закона Ома и соотношения между током и напряжением на ёмкостном элементе

$$u + u_R = E, \quad (1.16)$$

$$i = C \frac{du_C}{dt}, u_R = Ri, \quad (1.17)$$

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (1.18)$$

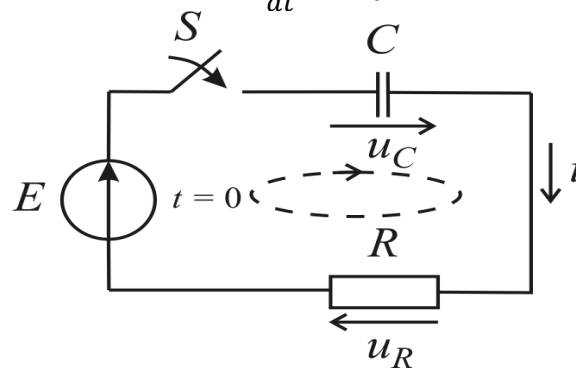


Рисунок 1.3 – Подключение источника ЭДС к цепи с последовательным соединением сопротивления и ёмкостного элемента

Общее решение уравнения (1.8) представляет собой сумму двух составляющих

$$u_C = u_{Cy} + u_{Ccb}. \quad (1.19)$$

Первая составляющая соответствует установившемуся режиму

$$u_{Cy} = E. \quad (1.20)$$

В схеме (рисунок 1.3) переходной процесс заканчивается зарядкой конденсатора до напряжения источника питания E .

и равна

$$u_{\text{CCB}} = Ae^{pt}, \quad (1.22)$$

Таким образом, общее решение уравнения (1.18) будет иметь вид

Для определения значения постоянной A в (1.23) необходимо использовать закон коммутации для ёмкостного элемента (1.4). До замыкания ключа, т. е. в момент времени $t = 0_-$, ёмкостный элемент не был заряжен. Следовательно, при $t = 0$ $u_C(t_-) = u_C(t_+) = 0$, $u_C(0) = E + A$ и $A = -E$.

$$u_c = E(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}), \quad (1.24)$$

Ток, протекающий через конденсатор равен

11

В момент коммутации, при $t = 0$, конденсатор представляет короткое замыкание, и ток ограничивается только сопротивлением R . При малом значении R в схеме может наблюдаться большой скачек тока.

1.5 Подключение последовательно соединенных элементов к источнику постоянной ЭДС

Схема подключения показана на рисунке 1.5. Для приведённой схемы

$$u_L + u_C + u_R = E, \quad (1.26)$$

или

$$L \frac{di}{dt} + u_C + iR = E. \quad (1.27)$$

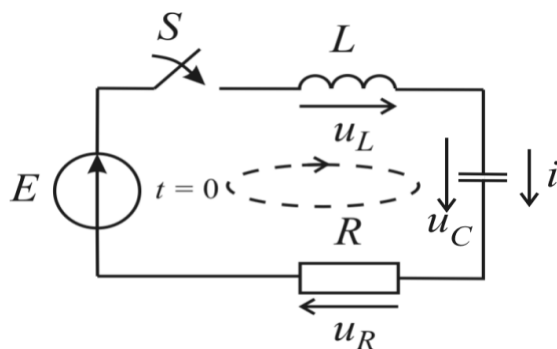


Рисунок 1.5 – Подключение источника ЭДС к цепи с последовательным соединением сопротивления индуктивности и ёмкостного элементов

Ток, протекающий через все элементы схемы, может быть выражен через напряжение на конденсаторе

$$i = C \frac{du_C}{dt}. \quad (1.28)$$

Подставив (1.18) в (1.17) получается

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (1.29)$$

Решение уравнения (1.19) состоит из наложения установившегося и свободного процессов

$$u_C = E + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (1.30)$$

Характеристическое уравнение для однородного дифференциального уравнения второго порядка имеет вид

$$LC p^2 + RC p + 1 = 0. \quad (1.31)$$

В этом уравнении искомая функция u_c заменена на единицу, $u \rightarrow 1$,
 $\frac{du_c}{dt} \rightarrow p$, $\frac{d^2u_c}{dt^2} \rightarrow p^2$.

Корни квадратного уравнения (1.31)

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{2L^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (1.32)$$

В зависимости от значений параметров цепи процесс зарядки конденсатора может быть апериодическим или колебательным.

Если $\frac{R^2}{2L^2} \geq \frac{1}{LC}$, корни (или корень) характеристического уравнения действительные, следовательно зарядка конденсатора имеет апериодический характер. Зарядка осуществляется аналогично показанному на рисунке 1.4. В противном случае имеет место колебательный режим. Корни (1.31) комплексные и сопряжённые

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0, \quad (1.33)$$

где δ – коэффициент затухания, $\delta = \frac{R}{2L}$;

ω_0 – собственная угловая частота колебательного процесса, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC - \delta^2}}$.

Для схемы, представленной рисунком 1.5, напряжение на конденсаторе до замыкания ключа равнялось нулю $u_c(0) = 0$, ток в цепи $i(0) = 0$. В соответствии с законами коммутации для $t = 0$ получаются два уравнения для определения двух постоянных A_1 и A_2

$$u_c(0) = E + A_1 + A_2, \quad (1.34)$$

$$i(0) = p_1 A_1 + p_2 A_2, \quad (1.35)$$

для которых постоянные коэффициенты будут равны

$$A_1 = \frac{p_2 E}{p_1 - p_2}, A_2 = \frac{p_1 E}{p_2 - p_1}. \quad (1.36)$$

Для колебательного режима зарядки получается напряжение на конденсаторе и зарядный ток (рисунок 1.6)

$$u_c = E - \frac{E}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi),$$

$$i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{E}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t.$$

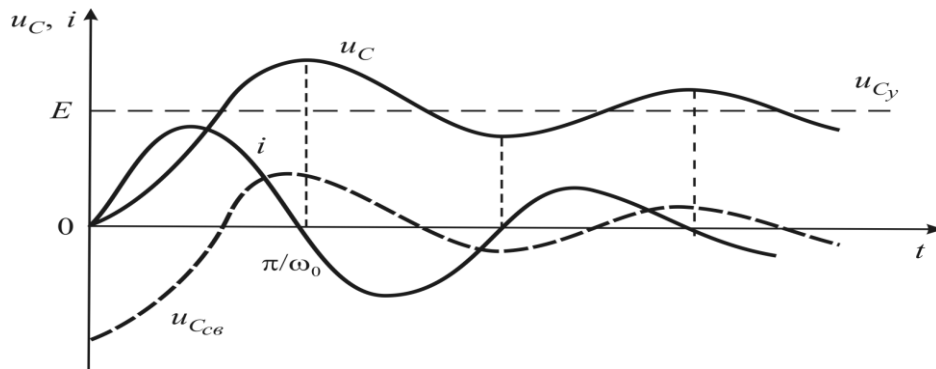


Рисунок 1.6 – Временные зависимости тока и напряжения при переходном процессе с двумя реактивными элементами

Напряжение на конденсаторе достигает наибольшего значения в момент времени $t = \frac{\pi}{\omega_o}$. Это напряжение тем больше, чем постоянная времени цепи τ

больше периода собственных колебаний $T_o = \frac{2\pi}{\omega_o}$. Это напряжение может почти

в два раза превышать установившееся напряжение. Такое перенапряжение может быть опасно для электротехнического оборудования и вывести его из строя. Для уменьшения перенапряжения, если это возможно, необходимо увеличивать сопротивление R или другими способами осуществлять переход от колебательного к апериодическому режиму, используя условие $\frac{R^2}{2L^2} \geq \frac{1}{LC}$.

1.6 Подключение последовательной RCL цепи к источнику синусоидального напряжения

При подключении цепи, показанной на рисунке 1.7, к источнику синусоидального напряжения $e = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ после достижения установившегося режима в схеме будет протекать ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi), \quad (1.37)$$

где I_m – амплитуда тока, $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$;

φ – угол между током и напряжением, $\varphi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$;

ψ_u – начальная фаза напряжения.

После замыкания ключа S возникает переходной процесс, который описывается уравнением

$$u_L + u_R = e \quad (1.38)$$

или

$$L \frac{di}{dt} + iR = e. \quad (1.39)$$

Общее решение равно сумме свободной и установившейся составляющих тока

$$i = i_y + i_{cb} = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) + A e^{\frac{-t}{\tau}}. \quad (1.40)$$

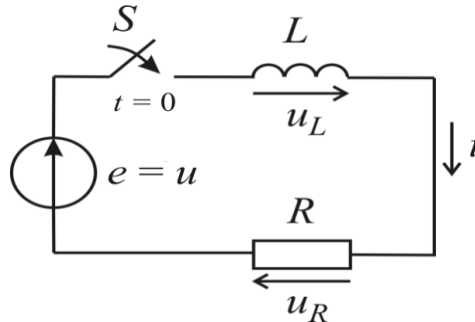


Рисунок 1.7 – Подключение источника ЭДС синусоидального напряжения к цепи с последовательным соединением сопротивления и индуктивного элемента

При $t = 0$ ток в цепи $i(0) = 0$, следовательно

$$I_m \sin(\psi_u - \varphi) + A = 0. \quad (1.41)$$

Постоянная интегрирования

$$A = -I_m \sin(\psi_u - \varphi). \quad (1.42)$$

Подставив значение постоянной A в общее решение можно найти значение напряжения от времени (рисунок 1.8)

$$i = i_y + i_{cb} = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) - I_m \sin(\psi_u - \varphi) e^{\frac{-t}{\tau}}. \quad (1.43)$$

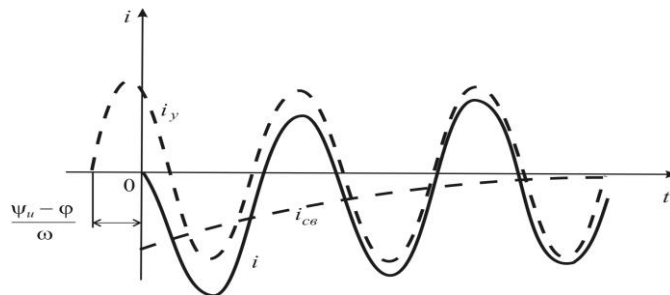


Рисунок 1.8 – Временные зависимости тока при переходном процессе при подключении синусоидального источника напряжения

Во время переходного процесса ток в цепи состоит из синусоидальной составляющей и свободной составляющей, убывающей по экспоненциальному закону. Через интервал времени 3τ после замыкания ключа свободной составляющей можно пренебречь. Если в момент коммутации $\psi_u = \varphi + \frac{\pi}{2}$, то амплитуда тока при переходном процессе будет максимальной.

При $t \approx \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ наблюдается максимум тока $I_{max} \approx 2I_m$.

1.7 Переходные процессы в системах электроснабжения

Переходные процессы возникают в системах электроснабжения при нормальной эксплуатации оборудования: включение и отключение источников питания, включение и отключение нагрузок, другие изменения в структуре системы, производство испытаний электроустановок и др. Возникают ПП и в аварийных условиях: обрыв нагруженной цепи или отдельной её фазы, короткое замыкание, выпадение электрической машины из синхронизма.

При любом переходном процессе происходит изменение электромагнитного состояния элементов системы, возникает нарушение баланса между механическим моментом на валу вращающейся электрической машины и её электромагнитным моментом. В результате этого нарушения соответственно изменяются скорости вращения машин. Некоторые машины испытывают торможение, другие – ускорение.

Переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе. Эти изменения взаимно связаны и по существу представляют собой единое целое – электромеханический ПП. Из-за большой механической инерции вращающихся машин механический переходный процесс развивается значительно медленнее, чем электромагнитный. Поэтому на начальной стадии электромеханического ПП происходят преимущественно электромагнитные изменения.

Рассмотрим, например, пуск асинхронного двигателя. С момента включения двигателя в сеть ($t_1 = 0$) до некоторого момента t_2 (момента трогания) никаких механических изменений не происходит, имеет место только электромагнитный ПП, связанный с изменением токов в обмотках статора и ротора. Затем по мере трогания и разгона ротора двигателя электромагнитный ПП дополняется механическим переходным процессом. Переходной процесс становится электромеханическим и более сложным в связи с изменением во времени взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора, в связи с перераспределением вихревых токов в сердечнике ротора и по ряду других причин.

При относительно малых возмущениях в системе (например, при коротком замыкании в точке, отделённой от турбогенератора большим сопротивлением) весь ПП можно рассматривать только как электромагнитный.

Рассмотрим, например, случай КЗ в установке с напряжением 400 В, когда $I_{кз} = 5000$ А. Если $I_{кз}$ пересчитать к стороне генераторного напряжения $U_2 = 15,75$ кВ ($P_2 = 200$ МВт), то $I_{кз}$ составит менее 1 % от номинального тока турбогенератора. Такое малое изменение тока турбогенератора не вызовет заметного нарушения механического состояния турбогенератора.

Следовательно, рассмотренный случай можно анализировать как электромагнитный переходной процесс.

Практические задачи, при решении которых инженер сталкивается с необходимостью количественной оценки тех или иных величин во время электромагнитного ПП, многочисленны и разнообразны. Однако все они

объединены единой целью: обеспечить надёжную работу отдельных элементов и СЭС в целом.

Актуальность задач возрастает по мере увеличения мощности современных электроустановок, так как их повреждения и значительные отклонения их режима работы от нормальных условий могут сопровождаться серьёзными последствиями. Нужны специальные мероприятия и средства для обеспечения работы электроустановок в аварийных ситуациях. Успех таких мероприятий зависит от глубины знаний явлений, происходящих в аварийных ситуациях. Необходима разработка приемлемых методов расчёта переходных процессов и увязка способов защиты электроустановок от повреждений с учётом этих процессов.

1.8 Режимы работы систем электроснабжения

Режим системы – совокупность процессов, характеризующих условия работы СЭС и её состояние в любой момент времени.

Количественными показателями режима являются значения мощности, напряжения, тока и других величин, связанных между собой зависимостями через соответствующие параметры элементов системы.

К параметрам элементов системы относятся сопротивления и проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени, коэффициенты усиления и другие параметры, определяемые физическими свойствами элементов и схемой их соединения.

В СЭС могут иметь место установившиеся (стационарные) и переходные (нестационарные) режимы.

Установившиеся режимы – характеризуются неизменными или медленными незначительными изменениями параметров элементов.

Переходные режимы – характеризуются быстрыми изменениями параметров во времени.

По изменению параметров элементов СЭС различают четыре вида режимов.

1. Нормальные УР – режимы, при которых значения параметров изменяются в пределах, соответствующих нормальной работе потребителей, определяемой их основными технико-экономическими характеристиками.

2. Нормальные ПР – режимы, соответствующие обычным эксплуатационным изменениям в СЭС (включение, отключение, переключение, изменение нагрузки и др.). Эти режимы характеризуются относительно быстрым и резким изменением параметров некоторых элементов СЭС при незначительных изменениях параметров в узловых точках СЭС.

3. Аварийные УР и ПР – режимы, возникающие в СЭС под действием таких изменений в системах электрических соединений, при которых значения параметров всех элементов, включая узловые точки, резко отличаются от номинальных.

4. Послеаварийные УР – режимы, которые наступают после отключения повреждённых элементов СЭС, обусловленные необходимостью ликвидации аварии. В этих режимах параметры оставшихся в работе элементов СЭС – могут быть близкими к параметрам нормального режима или значительно отличаться от них. Соответственно будет иметь место благополучный и неблагоприятный исход аварии в СЭС.

Основной задачей сохранения требуемого режима СЭС является поддержание таких параметров элементов системы, при которых обеспечивается устойчивость данного режима.

Устойчивость режима – способность СЭС при внезапных случайных возмущениях её режима сохранять допустимые значения параметров в узловых точках.

Различают статическую и динамическую устойчивость.

Динамическая устойчивость СЭС – способность системы восстанавливать после большого возмущения исходное состояние или практически близкое к исходному (допустимое по условиям эксплуатации системы).

Статическая устойчивость СЭС – способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим, очень близкий к исходному (если возмущающее воздействие не снято). Разновидностью динамической устойчивости является результирующая устойчивость.

Результирующая устойчивость СЭС – способность системы восстанавливать синхронную работу после кратковременного, допустимого по условиям эксплуатации, асинхронного режима с приемлемыми показателями качества электрической энергии.

К нарушениям динамической устойчивости СЭС может приводить такое внезапное возмущение, как отключение или включение одного из важных её элементов (одной из двухцепных ЛЭП, мощных электродвигателей и др.), существенно изменяющее режим работы других элементов СЭС. Наиболее опасным возмущением являются КЗ, под действием которых система переходит в послеаварийный режим. Если параметры режима узловых точек СЭС в послеаварийном состоянии существенно не отличаются от параметров её нормального режима, то считают, что динамическая устойчивость СЭС не нарушилась.

При нарушении статической или динамической устойчивости СЭС могут появляться различия в частотах её элементов, снижения напряжения в системе до значений, неприемлемых для большинства потребителей, что приводит к экономическому ущербу.

1.9 Причины возникновения переходных процессов

Переходные процессы в электрических системах являются следствием изменения режимов, обусловленных эксплуатационными условиями, или результатами повреждений изоляции и токоведущих частей электроустановок.

Причинами возникновения ПП могут быть многочисленные воздействия на элементы системы:

- включения, отключения и переключения источников электрической энергии, трансформаторов, ЛЭП, электроприёмников и других элементов;
- появление несимметрии токов и напряжений в результате отключения отдельных фаз, несимметричных изменений нагрузки, обрывов фаз и пр.;
- короткое замыкание в элементах системы;
- форсировка возбуждения синхронных машин и гашение их магнитного поля;
- внезапные набросы и сбросы нагрузки;
- синхронный пуск двигателей и синхронных компенсаторов;
- реверсирование асинхронных двигателей;
- асинхронный ход синхронных машин после выпадения их из синхронизма;
- атмосферно-климатические воздействия на элементы электрической системы;
- повторные включения и отключения короткозамкнутых цепей.

К нормальной эксплуатации относятся ПП, обусловленные коммутационными переключениями элементов системы, выполнением испытаний и регулированием режимов.

К аварийным условиям эксплуатации относятся КЗ, обрывы фаз, повторные включения и отключения КЗ – цепей, выпадение машин из синхронизма и прочие нарушения нормальных режимов.

Предельные значения параметров электроэнергетических установок при ПП в нормальных режимах эксплуатации обычно учитываются в ходе изготовления электрического оборудования, проектирования и сооружения СЭС, а также при обосновании эксплуатационных режимов.

В нашем курсе будем рассматривать только методы решения задач, относящихся к определению области допустимых режимов в аварийных условиях. К ним относятся:

- исследования электромагнитных ПП (расчёт токов КЗ, анализ неполнофазных режимов и др.);
- определение статической устойчивости и её запасов;
- анализ динамической устойчивости.

В элементах электрических систем аварийные условия возникают как при устойчивых, так и при неустойчивых повреждениях изоляции и токоведущих частей.

Примерами неустойчивых повреждений изоляции являются:

- в воздушных линиях – перекрытие гирлянд подвесных изоляторов, сближение проводов при определённых климатических условиях, приближение к проводам ветвей деревьев, а также набросы на провода различных предметов;
- в кабельных линиях – пробой изоляции, самоустраняемые благодаря специфическим свойствам бумажно-масляной изоляции (в разрядном промежутке создаются условия, способствующие гашению дуги);

- в распределительных устройствах – набросы или поверхностные перекрытия при повышенном увлажнении либо загрязнении.

По статистическим данным количество неустойчивых повреждений изоляции значительно превышает устойчивые. Так, в воздушных линиях напряжением от 110 кВ до 500 кВ только 16 % повреждений являются устойчивыми, а в кабельных линиях напряжением от 6 кВ до 10 кВ число устойчивых повреждений в 4-8 раз меньше, чем неустойчивых.

В КЛ повреждения развиваются постепенно. При этом 82 % относятся к пробое изоляции, а 18 % – к пробое других элементов системы.

Для сохранения работы ЛЭП при неустойчивых повреждениях в большинстве ВЛ, а также в некоторых КЛ предусматриваются устройства автоматического повторного включения (АПВ), успешное действие которых составляет от 45 % до 90 % всех отключений.

1.10 Последствия переходных процессов в системах электроснабжения

Основной причиной возникновения электромагнитных переходных процессов являются преимущественно короткие замыкания. КЗ являются результатом нарушений изоляции электрического оборудования, которые вызываются старением изоляционных материалов, перенапряжениями, недостаточно тщательным уходом за оборудованием и непосредственными механическими повреждениями (например, повреждениями кабелей при выполнении земляных работ без должной осторожности и т. п.). Бывали случаи, когда КЗ возникали из-за перекрытия токоведущих частей животными и птицами.

При осуществлении упрощённых схем электрических соединений понижающих подстанций могут использоваться специальные аппараты – короткозамыкатели (одно- и двухфазные); короткозамыкатели создают преднамеренные КЗ с целью быстрого отключения ранее возникших повреждений.

В зависимости от места возникновения и продолжительности повреждения его последствия могут иметь местный характер или, напротив, могут отражаться на всей системе.

Например, при КЗ в электрически удалённой точке сети величина тока КЗ составляет лишь незначительную долю номинального тока питающих генераторов и возникновение такого КЗ воспринимается ими как небольшое увеличение нагрузки. Сильное снижение напряжения получается вблизи места трёхфазного КЗ, в то время как в других точках системы наблюдается едва заметное снижение напряжения, причём от действия автоматического регулирования возбуждения оно быстро восстанавливается до нормального.

Аналогичная картина, но выраженная не так резко, наблюдается при пуске крупных двигателей, синхронных компенсаторов, при включении

генераторов способом самосинхронизации, а также при несинхронном включении генераторов.

Обрыв фазы слабо загруженной цепи не вызывает каких-либо существенных изменений режима в системе. Напротив, такой обрыв в цепи с большим нагрузочным током может привести к существенным изменениям токов и напряжений в системе.

Ток КЗ даже в тех случаях, когда он мал по сравнению с номинальным током генератора, обычно во много раз превышает номинальный ток самой аварийной ветви. Поэтому даже при кратковременном прохождении тока КЗ он может вызвать дополнительный нагрев токоведущих элементов выше допустимого.

Кроме теплового действия, токи КЗ создают между проводниками большие механические усилия, которые особенно велики в начальной стадии процесса КЗ, когда ток достигает максимума. При недостаточной прочности проводников и их креплений они могут быть разрушены при КЗ. Это относится и к электрическим машинам и аппаратам, надёжность которых может быть обеспечена при учёте всех проявлений КЗ.

Глубокое снижение напряжения и резкое искажение его симметрии, которые возникают при КЗ и образовании продольной несимметрии, вредно отражаются на работе потребителей. Так при понижении напряжения от 30 % до 40 % в течение 1 сек и более достаточно загруженные двигатели промышленных предприятий могут остановиться, что вызовет хозяйственный ущерб. Оставаясь включёнными в сеть, остановившиеся двигатели могут вызвать дальнейшее снижение напряжения в сети, т. е. полное нарушение нормального электроснабжения не только на данном предприятии, но и за его пределами. Следует заметить, что ряд промышленных производств вообще не допускает никаких (даже кратковременных) перерывов в подаче энергии.

При замыканиях на землю возникают неуравновешенные системы токов. Они могут создавать магнитные потоки, которые достаточны, чтобы в соседних линиях связи и сигнализации навести ЭДС, величины которых могут быть опасны для обслуживающего персонала и аппаратуры этих линий. При продольной несимметрии в системе возникают также заметные мешающие влияния на линии связи.

При задержке отключения КЗ сверх допустимой продолжительности может произойти нарушение устойчивости электрической системы, что является в сущности одним из наиболее опасных последствий КЗ, так как оно отражается на работе всей системы.

1.11 Классификация электромеханических переходных процессов

Электромеханические переходные процессы условно можно разделить на три основных вида.

1. Переходные процессы при больших кратковременных возмущениях и малых изменениях скорости (это случаи, когда велика вероятность нарушения

динамической устойчивости СЭС, например КЗ в одной из цепей линии электропередачи, а также случаи больших качаний роторов генераторов и др.).

2. Переходные процессы при больших возмущениях и больших изменениях скорости – это случаи нарушения режима синхронной работы синхронного генератора или двигателя, а также связанные с ними процессы ресинхронизации после нарушения результирующей устойчивости; процессы при автоматическом повторном включении и при асинхронном пуске двигателей и пр.

3. Переходные процессы при малых возмущениях и малых изменениях скорости – это случаи нарушения установившегося режима СЭС при перегрузке двигателей, при снижении питающих напряжений и т. п. В этих случаях возникает необходимость в анализе статической устойчивости СЭС, в выборе способов автоматического регулирования возбуждения генераторов и т. п.

Контрольные вопросы

1. Что такое законы коммутации?
2. Что представляет классический метод расчета переходных процессов?
3. Какие переходные процессы возникают в цепи постоянного тока с одним реактивным элементом?
4. Что происходит при подключении источника ЭДС к цепи с последовательным соединением сопротивления и индуктивного элемента?
5. Что происходит при подключении источника ЭДС к цепи с последовательным соединением сопротивления и емкостного элемента?
6. Как протекают переходные процессы в цепи постоянного тока с одним емкостным элементом?
7. Как протекают переходные процессы при подключении последовательно соединенных элементов индуктивности, конденсатора и сопротивления к источнику постоянной ЭДС?
8. Что происходит при подключении последовательной RCL цепи к источнику синусоидального напряжения?
9. Что происходит при переходных процессах в системах электроснабжения?
10. Какие бывают режимы работы систем электроснабжения?
11. Какие причины возникновения переходных процессов?
12. Какие бывают последствия переходных процессов в системах электроснабжения?

2 Токи трёхфазного короткого замыкания

Трёхфазное короткое замыкание соответствует симметричному режиму СЭС, поэтому с точки зрения расчёта и анализа этот аварийный режим

наиболее простой. Рассмотрев его подробно, можно далее переходить к анализу и расчётам более сложных аварийных режимов – несимметричных КЗ в СЭС.

Короткое замыкание на зажимах генератора приводит к возникновению на нём переходного процесса, обусловленного уменьшением сопротивления короткозамкнутой цепи по сравнению с её сопротивлением в нормальном режиме.

Переход электрической цепи из одного состояния в другое сопровождается появлением апериодического (свободного) тока, который накладывается на периодический (принужденный) ток, генерируемый источником питания.

На рисунке 2.1 показаны для одной из фаз трёхфазного генератора без АРВ (автоматической регулировки возбуждения) полный ток i_k и его составляющие при КЗ.

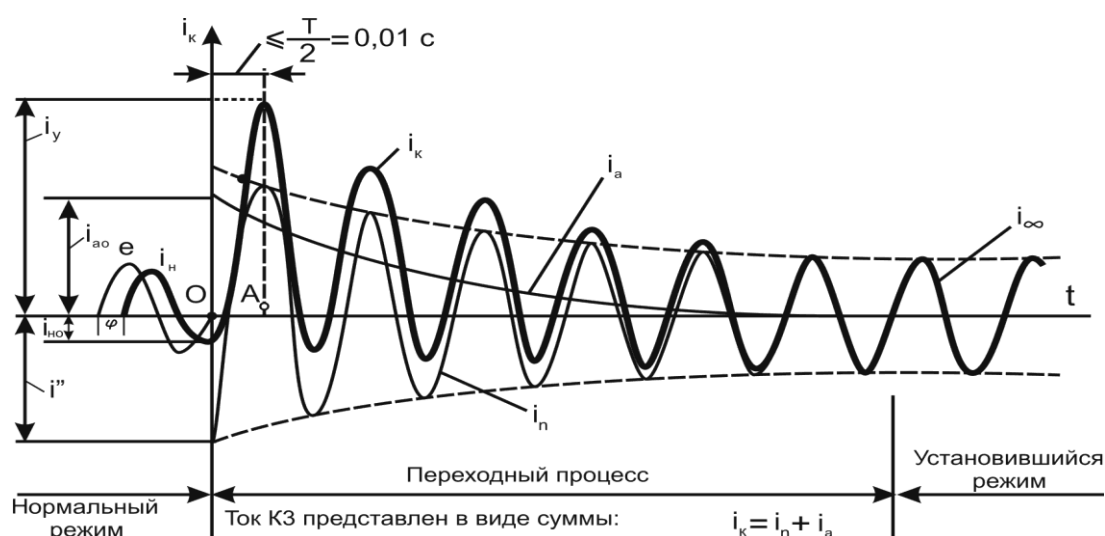


Рисунок 2.1 – Полный ток и его составляющие при коротком замыкании

До возникновения КЗ (точка 0) генератор работал в нормальном режиме, при котором в цепи нагрузки был ток i_H , отстающий от ЭДС e по фазе на угол φ . В момент времени, когда ток принял значение i_{HO} , произошло КЗ и начался переходный процесс, характеризующийся увеличением тока.

Ток нагрузки i_{HO} и периодическую составляющую тока КЗ для момента $t = 0$ можно определить по формулам

$$i_{HO} = \frac{U_{max}}{Z_H} \sin(\alpha - \varphi_H) \quad i_{no} = \frac{U_{max}}{Z_K} \sin(\alpha - \varphi_K), \quad (2.1)$$

где U_{max} – максимальное значение напряжения на зажимах генератора в момент КЗ;

Z_H, Z_K – полные сопротивления цепи при нормальной нагрузке и КЗ;

φ_H, φ_K – углы соответствуют фазам тока в тех же режимах;

α – начальная фаза КЗ (фаза включения на КЗ).

Поскольку $i_{ko} = i_{no}$, т. е. $i_{no} + i_{ao} = i_{no}$, то апериодическая составляющая (при $t = 0$)

$$i_{ao} = i_{no} - i_{no}.$$

При КЗ на зажимах генератора или вблизи расположенных точек сети преобладающее значение имеет индуктивное сопротивление цепи, поэтому активным сопротивлением можно пренебречь. При этом φ_k близок к 90° и всегда больше φ_n .

Начальные значения апериодических составляющих зависят от фазы включения цепи на КЗ. Максимальное из них значение зависит как от фазы включения, так и от предшествующего тока нагрузки i_{no} поврежденной цепи.

При $\varphi_k \approx 90^\circ$ максимум апериодической составляющей тока КЗ получается при нулевой фазе включения на КЗ и отсутствии предшествующего тока в цепи (рисунок 2.2).

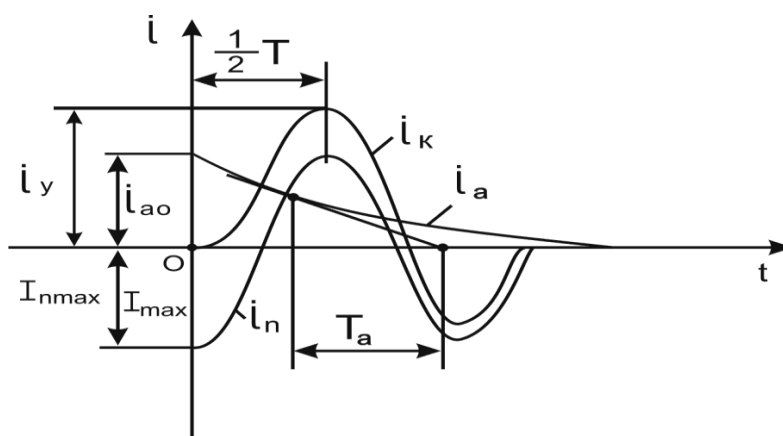


Рисунок 2.2 – Апериодическая составляющая тока короткого замыкания

В этом случае значение i_{ao} оказывается равным амплитуде периодической составляющей, т. е.

$$i_{ao} = |i_{no}| = I_{nmax} = \sqrt{2}I'' = i''. \quad (2.2)$$

Таким образом, ток КЗ во время переходного процесса состоит из периодической и апериодической составляющих. Мгновенное значение полного тока КЗ в любой момент времени t

$$i_{kt} = i_{nt} + i_{at}. \quad (2.3)$$

Периодическая составляющая тока КЗ (при условии неизменности напряжения источника в течение ПП) остаётся неизменной по амплитуде и определяется выражением

$$i_{nt} = \frac{U_{max}}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k). \quad (2.4)$$

Поскольку генератор является источником конечной мощности и работает без АРВ, напряжение на его зажимах, а, следовательно, и периодическая составляющая тока КЗ с течением времени уменьшаются.

По мере затухания свободных токов, наведенных в начальный момент КЗ в обмотке возбуждения, демпферных обмотках и в массиве ротора, поток реакции статора при неизменном токе возбуждения ослабляет результирующий магнитный поток в воздушном зазоре генератора. Это приводит к уменьшению ЭДС, наводимой в обмотке статора, и снижению напряжения на зажимах генератора.

На рисунке 2.1 показан i_n в виде синусоиды с затухающей амплитудой. Следует обратить внимание на то, что длительность ПП превышает время затухания апериодической составляющей тока КЗ, а также на то, что начальный ток КЗ $I' > I_\infty$ (действующее значение тока КЗ в установившемся режиме).

Апериодическая составляющая i_a в любой момент времени t определяется исходя из экспоненциального закона

$$i_a(t) = i_{ao} e^{-\frac{t}{T_a}} = i_{ao} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) = i_{ao} \gamma, \quad (2.5)$$

где γ – коэффициент затухания апериодической составляющей

$$\gamma = \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) = \frac{i_a(t)}{i_{ao}},$$

T_a – постоянная времени затухания, $T_a = \frac{x}{\omega r}$;

r и x – активное и индуктивное сопротивления КЗ цепи.

При частоте тока $f = 50$ Гц круговая частота $\omega = 2\pi f = 314 \frac{1}{с}$, $T_a = \frac{x}{314}$ с. Среднее значение составляет $T_a = 0,05$ с, а время затухания апериодической составляющей тока при КЗ на зажимах генератора составляет от 0,1 с до 0,2 с.

Апериодические составляющие токов КЗ в фазах А, В, С разные. Из-за апериодической составляющей полный ток КЗ изменяется по закону, отличному от синусоидального

$$i_k(t) = i_n(t) + i_{ao} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right). \quad (2.6)$$

Наибольшее мгновенное значение полного тока КЗ называют ударным током и обозначают i_y . Он возникает при первом наибольшем значении периодической составляющей, совпадающей по знаку с апериодической составляющей тока КЗ. Этот момент наступает примерно через полпериода после возникновения КЗ ($t = 0,01$ с). При этом условии

$$i_y = |i_{no}| + i_{ao} \exp\left(\frac{-0,01}{T_a}\right), \quad (2.7)$$

где $T_a = \frac{x_k}{\omega r_k}$.

С учётом (2.2)

$$i_y = I_{n\max} + I_{n\max} \exp\left(\frac{-0,01}{T_a}\right) = I_{n\max} \left(1 + \exp\left(\frac{-0,01}{T_a}\right)\right) = K_y \sqrt{2} I'', \quad (2.8)$$

где K_y – ударный коэффициент, характеризующий превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ

$$K_y = 1 + \exp\left(\frac{-0,01}{T_a}\right). \quad (2.9)$$

K_y зависит от $T_a = \frac{x_k}{314 r_k}$. При $\frac{x_k}{r_k} = 0$ $K_y = 1$, а при $\frac{x_k}{r_k} \rightarrow \infty$ $K_y \rightarrow 2$, т. е. значения K_y изменяются в пределах от 1 до 2.

Действующее значение полного тока КЗ в произвольный момент времени t переходного процесса определяют, как среднее квадратичное значение тока за период T , в середине которого находится рассматриваемый момент, поскольку в течение всего ПП полный ток представляет собой несинусоидальную кривую. При этом считают, что за рассматриваемый период амплитуда i_n и величина i_a неизменны и равны их средним значениям в момент t .

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ I_y приходится на первый период переходного процесса. I_y определяется в предположении, что i_a в течение этого периода равна ее мгновенному значению в середине периода, т. е. при $t = 0,01$ с, а амплитуда i_n равна своему начальному значению, т. е. i_{no}

$$I_y = \sqrt{i_{no}^2 \frac{1}{2} + (i_{ao} \exp(\frac{-0,01}{T_a}))^2}. \quad (2.10)$$

Считается, что $i_{ao} = I_{n\max} = \sqrt{2} I''$, тогда получается

$$I_y = \sqrt{(I'')^2 + (\sqrt{2} I'' \exp(\frac{-0,01}{T_a}))^2}.$$

Учитывая, что согласно (2.9) $\exp\left(-\frac{0,01}{T_a}\right) = K_y - 1$, тогда

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}. \quad (2.11)$$

При изменении K_y в пределах от 1 до 2 отношение $\frac{I_y}{I''}$ изменяется в пределах от 1 до $\sqrt{3}$, а отношение $\frac{i_y}{I_y}$ имеет максимальное значение $\sqrt{3}$ при $K_y = 1,5$.

Ввиду быстрого затухания аperiodической составляющей полный ток КЗ для времени $t \geq 0,15$ с после начала ПП можно считать практически равным периодической составляющей, которая представляет собой установившийся ток КЗ. Мгновенное и действующее значения установившегося тока КЗ обозначают i_∞ и I_∞ соответственно.

2.1 Короткое замыкание на зажимах генератора с автоматической регулировкой возбуждения

Назначение АРВ состоит в поддержании на зажимах генератора номинального напряжения при всех возможных режимах работы генератора. В случае понижения напряжения (например, из-за КЗ) АРВ увеличивает ток возбуждения генератора, а, следовательно, и напряжение на различных элементах сети.

В начальный момент КЗ из-за инерции магнитных потоков, сцепленных с обмотками генератора, АРВ практически не влияет на переходный процесс. В дальнейшем действие АРВ сказывается на увеличении тока возбуждения и связанных с ним составляющих токов статора и демпферных обмоток. Но этот процесс протекает сравнительно медленно, так что изменяются в основном только ЭДС генератора и обусловленная ею периодическая составляющая тока обмотки статора.

Повышение напряжения генератора благодаря АРВ начинается не в момент КЗ ($t = 0$), а через некоторое время, которое необходимо для срабатывания АРВ. Этот временной интервал определяется временем понижения напряжения до значения, при котором вступает в действие АРВ, и собственным временем срабатывания АРВ. Поэтому ток КЗ до вступления в действие АРВ уменьшается так же, как и без АРВ, а затем начинает увеличиваться и достигает установившегося значения, соответствующего возросшему напряжению генератора за счет действия АРВ (рисунок 2.3).

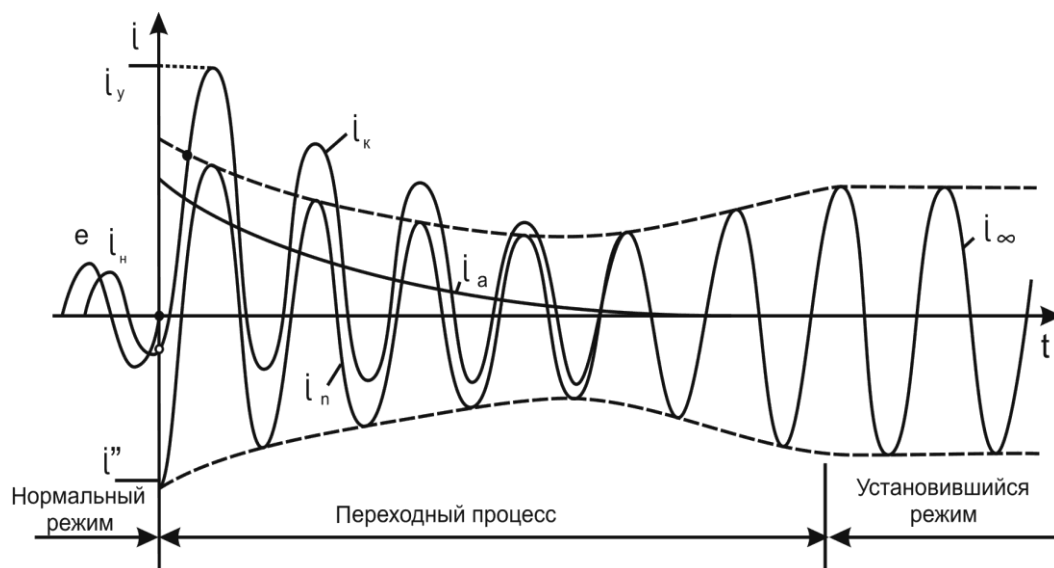


Рисунок 2.3 – Действие автоматического регулирования возбуждения

В связи с тем, что действие АРВ проявляется через несколько периодов после появления КЗ, начальные значения полного тока КЗ и его составляющих, а также ударный ток КЗ остаются такими же, как и при отключенном АРВ.

Таким образом, при АРВ затухание свободных токов статора и обмотки возбуждения, возникших при внезапном КЗ, в некоторой степени компенсируется увеличением тока КЗ за счёт действия АРВ.

В зависимости от соотношения между значениями этих токов и от характера их изменения кривая полного тока КЗ приобретает разный вид.

При этом апериодическая составляющая i_{at} остается практически такой же, как и при отсутствии АРВ. Действующее значение периодической составляющей в зависимости от соотношения между начальным током КЗ и установившимся током КЗ при предельном токе возбуждения может возрасти, уменьшиться или остаться неизменным.

На рисунке 2.4 показаны $I_n(t)$ при разных I_{np} возбуждения и постоянной времени обмотки возбуждения $T_e = 0$.

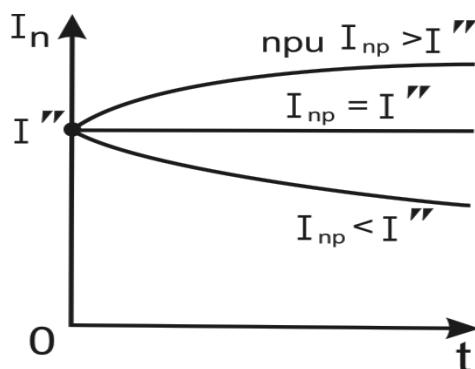


Рисунок 2.4 – Зависимость тока возбуждения при различных условиях

Если под действием АРВ напряжение генератора достигает предельного значения (может принимать также номинальное значение), то ток КЗ в дальнейшем остается неизменным.

Изменения действующего значения периодической составляющей тока статора и апериодических составляющих тока в обмотке возбуждения и тока в продольной демпферной обмотке при КЗ на зажимах генератора показаны на рисунке 2.5.

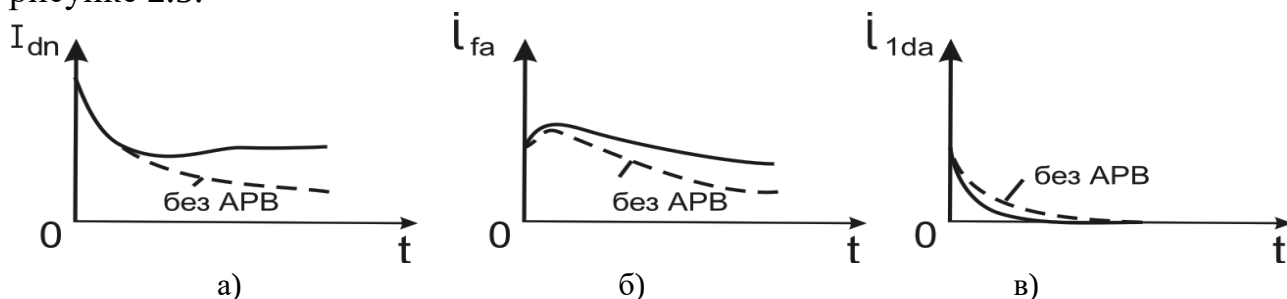


Рисунок 2.5 – Изменение действующего значения периодической составляющей тока статора

Из рисунков видно, что в начале переходного процесса действие АРВ незначительно, а с течением времени оно проявляется всё в большей мере. При

достижении предела (потолка) АРВ токи в обмотках генератора принимают свои конечные установившиеся значения.

Предельное возбуждение синхронных машин нормировано по напряжению возбуждения U [отн. ед.] и скорости нарастания напряжения возбуждения $\frac{dU}{dt}$ [отн. ед./с].

2.2 Короткие замыкания в удалённых точках системы электроснабжения

При КЗ в элементах СЭС токи КЗ в обмотках генератора будут меньше, чем в случае КЗ на зажимах генератора, так как результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи увеличивается. Вследствие этого уменьшается влияние КЗ в СЭС на работу генератора, уменьшаются пределы изменения тока КЗ в течение переходного процесса, которые зависят от удалённости точки КЗ относительно источника и будут тем меньше, чем дальше находится точка КЗ. При КЗ в удалённых точках периодическая составляющая тока во время переходного процесса в генераторе практически не изменяется. Удалённой точкой называют такую точку СЭС при КЗ, в которой ток генераторов электростанции изменяется настолько незначительно, что изменением ЭДС генераторов можно пренебречь и считать напряжение на их зажимах неизменным и равным номинальному. При этом ток КЗ может значительно превышать номинальный и быть опасным для участка СЭС, где расположена удалённая точка КЗ.

Если при КЗ в удалённой точке ЭДС генератора и напряжение на его зажимах не изменились, то и периодическая составляющая тока также останется неизменной и с самого начального момента КЗ равно установившемуся значению

$$I'' = I_n(t) = I_\infty. \quad (2.12)$$

Апериодическая составляющая тока возникает при любой удалённости точки КЗ от источника, поскольку всякая цепь обладает индуктивным сопротивлением. Апериодическая составляющая тока затухает тем быстрее, чем больше активное сопротивление КЗ-цепи. В протяженных кабельных линиях (КЛ) и сетях до 1 кВ, где преобладает активное сопротивление, апериодическая составляющая тока затухает от 0,15 с до 0,2 с.

Внешнее сопротивление цепи генератора $x_{вн}$ при КЗ, за которым сверхпереходный ток I'' и установившийся ток I_∞ одинаковы ($I'' = I_\infty$), можно найти, выразив их через соответствующие ЭДС и сопротивления, из равенства

$$\frac{E_q''}{x_d'' + x_{вн}} = \frac{E_{qn}}{x_d + x_{вн}}, \quad (2.13)$$

где E_q'' – ЭДС генератора в начальный момент КЗ;
 E_{qn} – ЭДС генератора в установившемся режиме;
 x_d'' – сверхпереходное сопротивление генератора;
 x_d – синхронное сопротивление генератора.

Из формулы (2.13) получается

$$x_{вн}'' = \frac{E_q'' x_d - E_{qn} x_d''}{E_{qn} - E_q''}. \quad (2.14)$$

Зависимость $\frac{I''}{I_\infty}$ от внешнего сопротивления $x_{вн}$ показана на рисунке 2.6. Видно, что без АРВ это отношение всегда больше единицы. При АРВ отношение $\frac{I''}{I_\infty}$ сначала уменьшается до минимального значения от 0,6 до 0,8, а затем начинает возрастать, стремясь к единице.

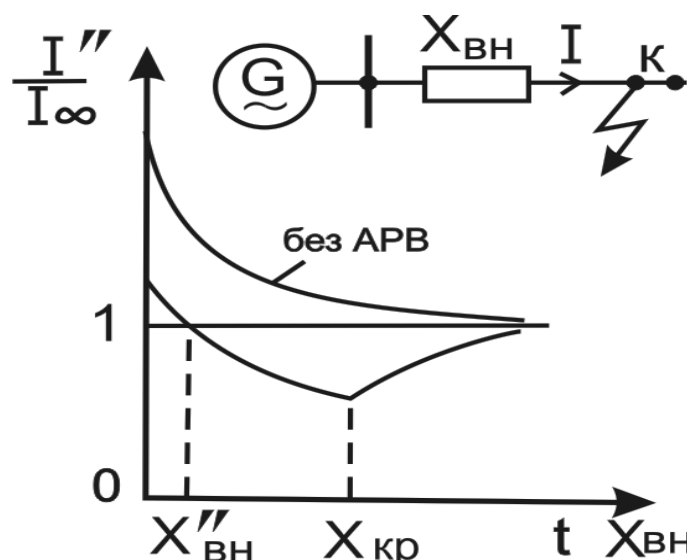


Рисунок 2.6 – Зависимость отношения сверхпереходного тока к установившемуся току от сопротивления

Предельное значение $x_{вн}$, при котором $\frac{I''}{I_\infty}$ в КЗ-цепи генератора с АРВ в СЭС начинает возрастать, называют критическим сопротивлением и обозначают $x_{кр}$. Значение $x_{кр}$ зависит от параметров синхронной машины и от предшествующего режима её работы.

На рисунке 2.7 показаны изменения действующих значений периодической составляющей тока статора и напряжения генератора в функции времени при включенном АРВ (сплошные линии) и отключенном АРВ (штриховые линии) и разных удалённостях точек КЗ ($x_{вн} = 0$; $x_{вн} = x_{кр}$; $x_{вн} > x_{кр}$).

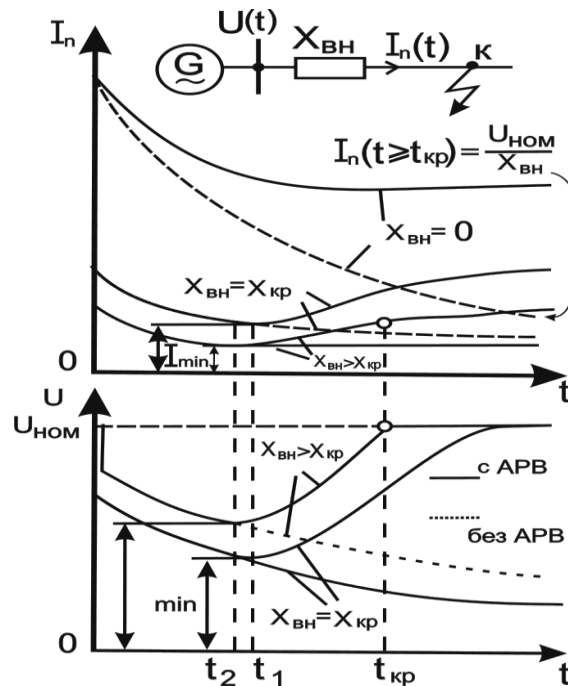


Рисунок 2.7 – Изменения действующих значений периодической составляющей тока статора

Сравнение полученных зависимостей показывает, что с увеличением удаленности точки КЗ кривая тока $I_n(t)$ сначала спадает до некоторого минимума, а затем начинает возрастать, достигая конечного установившегося тока, значение которого может превышать значение начального тока.

Напряжение генератора при $x_{vh} > x_{kp}$ достигает (за счёт действия АРВ) номинального значения к некоторому моменту времени t_{kp} и далее остаётся неизменным. При этом ток КЗ для $t \geq t_{kp}$ также остаётся неизменным и определяется выражением

$$I_n(t) = \frac{U_{ном}}{x_{vh}}. \quad (2.15)$$

Критическим временем t_{kp} называется продолжительность повышения напряжения генератора до номинального значения (под действием АРВ).

Минимальное значение тока или напряжения зависит от параметров генератора и от x_{vh} . С увеличением x_{vh} время наступления минимума уменьшается, достигая в пределе $t = 0$.

2.3 Начальный ток короткого замыкания

Периодическая составляющая начального тока КЗ может быть определена, исходя из принципа сохранения первоначального результирующего потокосцепления ротора при внезапном нарушении режима работы генератора.

Поскольку в момент внезапного нарушения нормального режима потокосцепление ротора остаётся неизменным, наведённая в статоре ЭДС в начале переходного процесса также не меняется.

На основе этого получены соотношения для нахождения значений сверхпереходной E_q'' и переходной ЭДС E_q' в начальный момент времени переходного процесса при внезапном нарушении режима работы генератора

$$E_{q0}' = E_q'(0) = U_q(0) + I_d(0)x_d', \quad (2.16)$$

или приближенно

$$E_{q0}' \approx U(0) + I(0)x_d' \sin \varphi(0), \quad (2.17)$$

$$E_{q0}'' = E_q''(0) = U_q(0) + I_d(0)x_d'', \quad (2.18)$$

или приближенно

$$E_{q0}'' \approx U(0) + I(0)x_d'' \sin \varphi(0), \quad (2.19)$$

где f_0 – соответствует параметру режима f в начальный момент времени переходного процесса;

$f(0)$ – параметр f в момент, непосредственно предшествующий началу переходного процесса, где $f(0)$ определяется из рассмотрения предшествующего установившегося режима.

Начальный переходный ток определяется выражением

$$I_{d0}' = \frac{E_{q0}'}{x_d' + x_{вн}}. \quad (2.20)$$

Для СМ с демпферными обмотками начальный сверхпереходный ток

$$I_{d0}'' = \frac{E_{q0}''}{x_d'' + x_{вн}}. \quad (2.21)$$

Для машин мощностью до 100 МВт при их полной нагрузке, номинальном напряжении и $\cos \varphi = 0,8$ (до возникновения КЗ) средние значения параметров в относительных единицах приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Средние значения параметров в относительных единицах

Генераторы	x_{d*}'	x_{d*}''	$E_q'(0)_*$	$E_q''(0)_*$
Турбо	0,2	0,13	1,12	1,078
Гидро	0,35	0,25	1,15	1,21

Поскольку переходная и сверхпереходная ЭДС близки к единице, в приближенных практических расчётах при любых значениях нагрузки, предшествующей КЗ, часто принимают $E'_{*q}(0) = 1$ и $E''_{*q}(0) = 1$.

В тех случаях, когда нагрузку предшествующего режима машины требуется учесть, для определения ЭДС используют (2.17) или (2.18) и (2.19) или (2.20).

Начальный ток КЗ рассчитывают в следующем порядке:

- составляют схему замещения КЗ цепи с ЭДС E'_q (для СМ без демпферных контуров) или с E''_q (для СМ с демпферными контурами), а значения E'_{q0} и E''_{q0} определяют по (2.17) и (2.19);
- преобразуют схему замещения относительно точки КЗ и находят начальный ток в месте КЗ;
- определяют токораспределение в схеме при КЗ в заданной точке.

2.4 Ток короткого замыкания в произвольный момент времени

В связи с размагничивающим действием реакции статора, затуханием свободных токов и действием АРВ ток КЗ СМ изменяется во времени. Действующее значение периодической составляющей тока основной частоты определяется выражением

$$I_n(t) = \sqrt{I_{dn}^2(t) + I_{qn}^2(t)}. \quad (2.22)$$

В литературе для определения периодических составляющих тока КЗ СМ по осям d и q предлагаются формулы

$$I_{dn}(t) = \frac{E_q(0)}{x_d} + \left(\frac{E'_q(0)}{x'_{d1d}} - \frac{E_q(0)}{x_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \left(\frac{E''_q(0)}{x''_d} - \frac{E'_q(0)}{x'_{d1d}} \right) \exp\left(-\frac{t}{T''_d}\right) + \\ + \Delta I_{np} F_d(t) = I_\infty + (I' - I_\infty) \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + (I'' - I') \exp\left(-\frac{t}{T''_d}\right) + \frac{E_{qnp} - E_q(0)}{x_d} F_d(t), \quad (2.23)$$

$$I_{qn}(t) = \left(\frac{U_d(0)}{x''_q} - \frac{U_d(0)}{x_q} \right) \exp\left(-\frac{t}{T''_q}\right), \quad (2.24)$$

где I_∞, I', I'' – соответственно составляющие установившегося, переходного, сверхпереходного токов КЗ;

T – постоянные времени затухания токов обмоток СМ.

В этом же литературном источнике показано, что полный ток КЗ фазных обмоток статора состоит из периодической составляющей, апериодической составляющей и составляющей двойной частоты, обусловленной несимметрией ротора и наличием апериодической составляющей тока статора.

Например, ток фазы А

$$\begin{aligned}
i_A = i_{nA} + i_{aA} + i_{2A} = i_{nA} - \\
- (U_q(0) \cos \gamma(0) + U_d \sin \gamma(0)) \frac{x''_d + x''_q}{2x''_d x''_q} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \\
- (U_q(0) \cos(2\omega t - \gamma(0)) - \\
- U_d(0) \sin(2\omega t + \gamma(0))) \frac{x''_q - x''_d}{2x''_d x''_q} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right),
\end{aligned} \quad (2.25)$$

где T_A – сопротивление обратной последовательности

$$\begin{aligned}
T_A &= \frac{x_2}{r}, \\
x_2 &= \frac{2x''_q x''_d}{x''_d + x''_q}.
\end{aligned}$$

Это выражение показывает, что точный расчёт токов КЗ в произвольный момент времени в сложных СЭС, содержащих, кроме источников питания, мощные нагрузки, затруднителен. Учитывая это для вычисления токов КЗ, в произвольный момент времени используют, приближённые методы расчёта.

2.5 Установившийся режим короткого замыкания

Установившимся режимом называют стадию переходного процесса, когда все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи в СМ затухли (практически) и полностью закончен подъём тока возбуждения I_f под действием АРВ.

Обычно считают, что УР наступает уже через несколько секунд после возникновения КЗ. При этом предполагается, что скорость вращения синхронной машины сохраняется без изменения.

Параметры КЗ-цепи при УР можно определить на основе характеристики холостого хода [XXX – это $E_q(I_f)$], характеристики короткого замыкания [ХКЗ – это $I_{нкз}(I_f)$], продольного синхронного сопротивления x_d , поперечного синхронного сопротивления x_q , сопротивления рассеяния статора x_δ и предельного тока возбуждения I_{fnp} («потолок» возбуждения).

Синхронное продольное сопротивление определяется выражением

$$x_{*d} = \frac{C}{K_c}, \quad (2.26)$$

где C – относительное значение ЭДС по ненасыщенной XXX при $I_{*f} = 1$;

K_c – относительный установившийся ток КЗ $I_{*нкз}$ при $I_{*f} = 1$ «отношение КЗ». Обычно C от 1,05 до 1,2.

Поперечное синхронное сопротивление $x_q \approx x_d$ (у неявнополюсных СМ), а у явнополюсных СМ $x_q \approx 0,6x_d$.

Для упрощения расчетов токов КЗ характеристику ХХ спрямляют. При этом E_q прямо пропорциональна току I_f , отсюда следует соотношение для относительных величин

$$x_{*d} \approx \frac{1}{K_c} \quad (2.27)$$

и соотношение

$$E_{*q} = I_{*f}. \quad (2.28)$$

Если ток возбуждения СМ при рассматриваемой нагрузке машины не задан, то его можно определить приближенно на основе векторной диаграммы явнополюсной СМ (рисунок 2.8)

$$I_{*f} = E_{*q} \approx \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2}. \quad (2.29)$$

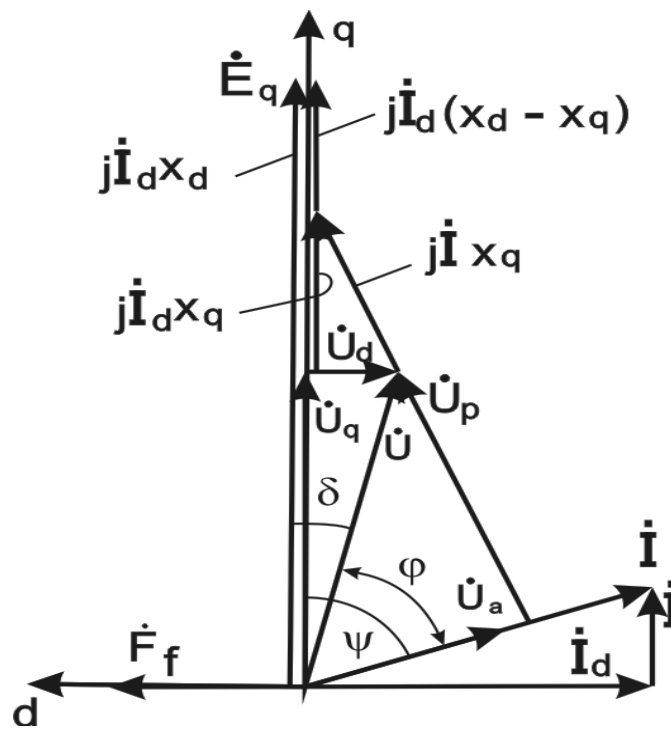


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма

Это выражение вытекает из ВД в предположении, что $x_q = x_d$ и активное сопротивление обмотки статора 0.

Величина предельного тока возбуждения I_{fnp} зависит от системы возбуждения и её параметров, а также от типа СМ. При электромашином возбуждении I_{fnp} от 3 до 5, что примерно вдвое больше I_{*f} при номинальной нагрузке.

Из векторной диаграммы рисунок 2.8 также следует

$$E_q = U_q + I_d x_d = I_d (x_{вн} + x_d) + I_q r_{вн},$$

$$I_q = I_d \operatorname{ctg} \psi = \frac{I_d r_{\text{вн}}}{x_{\text{вн}} + x_q}.$$

Решая совместно эти уравнения, получается

$$I_d = \frac{E_q (x_q + x_{\text{вн}})}{(x_d + x_{\text{вн}})(x_q + x_{\text{вн}}) + r_{\text{вн}}^2}, \quad (2.30)$$

$$I_q = \frac{E_q r_{\text{вн}}}{(x_d + x_{\text{вн}})(x_q + x_{\text{вн}}) + r_{\text{вн}}^2}, \quad (2.31)$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \frac{E_q \sqrt{(x_q + x_{\text{вн}})^2 + r_{\text{вн}}^2}}{(x_d + x_{\text{вн}})(x_q + x_{\text{вн}}) + r_{\text{вн}}^2}. \quad (2.32)$$

В случае неявнополюсных СМ ($x_q = x_d$) получается

$$I = \frac{E_q}{\sqrt{(x_d + x_{\text{вн}})^2 + r_{\text{вн}}^2}}. \quad (2.33)$$

Практические расчёты токов КЗ показывают, что токи I явнополюсных и неявнополюсных СМ отличаются незначительно и приближенно их можно определять по формуле (2.33).

В зависимости от удалённости точки КЗ возможны 2 режима работы генераторов.

1. Режим номинального напряжения, характеризующийся следующими соотношениями параметров

$$E_q \leq E_{qnp}; U_{\text{с}} = U_{\text{с.ном}}; I_{\text{с}} \leq I_{\text{кр}}; x_{\text{вн}} \geq x_{\text{кр}}, \quad (2.34)$$

где $I_{\text{кр}}$ и $x_{\text{кр}}$ – критические ток и сопротивление.

При КЗ в точке, соответствующей $x_{\text{кр}}$, генератор работает с предельным возбуждением, когда напряжение на его зажимах равно номинальному, а ток соответствует критическому значению $I_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{x_{\text{кр}}}$.

2. Режим предельного возбуждения, при котором

$$E_q = E_{qnp}; U_{\text{с}} \leq U_{\text{с.ном}}; I_{\text{с}} \geq I_{\text{кр}}; x_{\text{вн}} \leq x_{\text{кр}}. \quad (2.35)$$

Критическое сопротивление можно найти из равенства

$$\frac{E_{qnp} - U_{\text{с.ном}}}{x_d} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{x_{\text{кр}}}, \text{ откуда получается } x_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{E_{qnp} - U_{\text{с.ном}}} x_d. \quad (2.36)$$

Если при определении установившегося тока короткого замыкания учитывают обобщенную нагрузку, то её обычно выражают в относительных единицах при полной рабочей мощности нагрузки и среднем номинальном напряжении питающей сети. В этом случае $x_{*H} = 1,2$; $E_{*H} = 0$.

Контрольные вопросы

1. Что такое токи трехфазного короткого замыкания?
2. Когда появляется апериодическая составляющая свободного тока?
3. Какое сопротивление преобладает на зажимах генератора?
4. Как называется наибольшее мгновенное значение полного тока короткого замыкания?
5. Как протекает процесс короткого замыкания на зажимах генератора с автоматической регулировкой возбуждения?
6. Какие процессы протекают при коротком замыкании в удаленных точках системы электроснабжения?
7. Как определить значение начального тока короткого замыкания?
8. Как рассчитать значение начального тока короткого замыкания в произвольный момент времени?
9. Чем характеризуется установившийся режим короткого замыкания?
10. Как выглядит векторная диаграмма короткого замыкания?

3 Короткие замыкания в системах электроснабжения

3.1 Виды, причины и последствия коротких замыканий

В процессе эксплуатации СЭС одной из основных причин нарушения нормального режима работы отдельных электроустановок и системы в целом являются возникающие КЗ, которые представляют собой любое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек ЭУ между собой или с землей.

В месте КЗ может появляться электрическая дуга с переходным сопротивлением, которое при сравнительно больших токах КЗ является практически активным и неизменным.

Замыкания в глухозаземлённых или эффективно-заземлённых сетях через дугу либо непосредственные соединения (металлические соединения) ЭУ называются короткими замыканиями.

Замыкания в незаземленных или резонансно-заземленных сетях относят к простым замыканиям, которые обычно называют замыканиями.

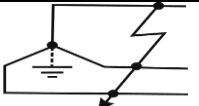
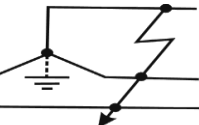
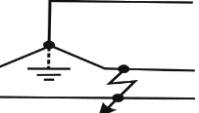
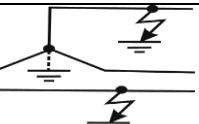
В зависимости от режима нейтралей в электрических сетях могут быть различные виды коротких замыканий (таблица 3.1).

В количественном отношении КЗ в электрических сетях распределяются по видам следующим образом

$$K^{(3)} \approx 5 \% ; K^{(2)} \approx 10 \% ; K^{(1)} \approx 65 \% ; K^{(1,1)} \approx 10 \% ; K^{(1+1)} \approx 10 \% ;$$

$$K^{(1,1)} + K^{(1+1)} \approx 20 \% .$$

Таблица 3.1 – Различные виды коротких замыканий

Схема замыкания	Режим нейтрали сети			
	Глухо или эффективно-заземлённая		Незаземленная или резонансно-заземлённая	
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
	Трёхфазное КЗ	$K^{(3)}$	Трёхфазное КЗ	$K^{(3)}$
	Трёхфазное КЗ на землю	$K^{(1,1,1)}$	Трёхфазное КЗ на землю (имеет контакт с землей)	$K^{(3,3)}$
	Двухфазное КЗ	$K^{(2)}$	Двухфазное КЗ	$K^{(2)}$
	Двухфазное КЗ на землю	$K^{(1,1)}$	Двухфазное КЗ на землю (имеет контакт с землей)	$K^{(2,3)}$
	Однофазное КЗ	K^1	Однофазное замыкание на землю	3^1
	Двойное КЗ на землю	$K^{(1+1)}$	Двойное замыкание на землю	$3^{(1+1)}$

Статистика показывает, что относительная частота различных видов КЗ существенно зависит от напряжения электрической сети (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Относительная частота различных видов коротких замыканий

Обозначение КЗ	Относительная частота КЗ в % для сетей напряжением, кВ					
	6-20 (распределительная сеть)	6-20 (сеть блоков)	35	110	220	330
$K^{(1)}$	61	60	67	83	88	91
$K^{(2)}$	17	20	18	5	3	4
$K^{(1,1)}$	11	15	7	8	7	4
$K^{(3)}$	11	5	8	4	2	1

Из статистических исследований мощной энергетической системы следует также, что относительная частота различных видов КЗ на элементах системы неодинакова. Наибольшая относительная частота КЗ приходится на ЛЭП и подстанции – 47 %, на электрическую часть электростанций – 19,1 %, на силовую часть электростанций – 26,2 % и на другие элементы системы – 7,7 %.

Короткие замыкания возникают в результате нарушений изоляции ЭУ, являющихся следствием разных причин:

- старения изоляции в ходе эксплуатации электрооборудования (ЭО);
- перенапряжений;
- прямых ударов молнии;
- механических повреждений;
- набросов посторонних предметов на токоведущие части;
- неудовлетворительного ухода за ЭО;
- ошибочного действия обслуживающего персонала.

Последствиями КЗ являются:

- недопустимый нагрев ЭО и его термическое повреждение из-за значительного увеличения токов (в 10-15 раз и более);
- появление больших механических усилий между токоведущими частями, которые могут привести к механическому повреждению и разрушению ЭО;
- снижение напряжения и искажение его симметрии, что отрицательно сказывается на работе потребителей. Так, при понижении напряжения от 30 % до 40 % в течение времени более 1 с останавливаются электродвигатели, в результате возможны нарушения технологического цикла на предприятиях, появление брака продукции и др.;
- наведение при несимметричных КЗ ЭДС в соседних линиях связи и сигнализации, опасных для обслуживающего персонала аппаратуры связи напряжения;
- нарушение устойчивости работы отдельных элементов и режима СЭС в целом, приводящее к возникновению аварийных ситуаций с отключением большого количества потребителей электрической энергии;
- возгорание ЭУ.

Наиболее опасные последствия проявляются в элементах системы, прилегающих к месту возникновения КЗ. Если КЗ появилось на большой электрической удалённости от источника питания, то увеличение тока воспринимается генератором так же, как некоторое повышение нагрузки, а сильное снижение напряжения происходит только вблизи места трёхфазного КЗ.

Чтобы обеспечить безаварийное электроснабжение всех потребителей, необходимо проектировать и сооружать СЭС с учётом возможных КЗ, строго соблюдать правила технической эксплуатации ЭУ, повышать технический уровень и качество изготовления, применяемого ЭО. Для исключения опасных последствий от КЗ в СЭС и обеспечения устойчивости нагрузки вводят быстродействующие релейные защиты отдельных элементов, применяют специальные схемы автоматического включения резерва (АВР), предусматривают разделение во времени процессов самозапуска различных групп двигателей, устанавливают регулирующие устройства возбуждения и т. д.

3.2 Назначение расчётов коротких замыканий

Расчёт электромагнитных переходных процессов в СЭС при КЗ предусматривает определение токов и напряжений в той или иной КЗ цепи при заданных (расчётных) условиях. Он имеет важное значение при проектировании и эксплуатации СЭС.

Расчёты токов КЗ необходимы для следующих конечных целей:

- выявление условий работы потребителей при возможных КЗ и определения допустимости того или иного режима;
- выбора электрических аппаратов электроустановок по условиям термической и электродинамической стойкости;
- проектирования и настройки средств релейной защиты и автоматики СЭС;
- сопоставления, оценки, выбора схем электрических соединений СЭС;
- координации и оптимизации значений токов КЗ;
- оценки устойчивости работы СЭС и ее узлов нагрузки;
- проектирования заземляющих устройств;
- определения влияния токов КЗ на линии связи;
- выбора разрядников;
- анализа аварий в ЭУ;
- проведения различных испытаний в СЭС.

Точность расчёта КЗ зависит от его целевого назначения.

Для выбора и проверки электрических аппаратов точность расчёта может быть ниже, чем для решения других задач. При выборе средств релейной защиты и автоматики точность расчёта аварийных режимов должна быть значительно выше. В таком случае необходимо определить наибольшие и наименьшие значения токов и напряжений, возможный сдвиг между ними в отдельных фазах либо между их симметричными составляющими и т. п.

3.3 Математические допущения при расчётах токов короткого замыкания

Расчёт токов КЗ в современных крупных СЭС представляет собой сложную и трудоёмкую задачу. При решении большинства практических задач принимают ряд упрощающих допущений, не вносящих существенных погрешностей в точность расчётов.

При расчёте цепей напряжением выше 1 кВ основные допущения следующие:

- пренебрегают насыщением магнитных систем всех элементов цепи КЗ (генераторов, трансформаторов и электродвигателей);
- все нагрузки представляют постоянными индуктивными сопротивлениями;

- пренебрегают активными сопротивлениями элементов схемы, если отношение результирующих сопротивлений от источника до точки КЗ $\frac{r_{\text{рез}}}{x_{\text{рез}}} \leq \frac{1}{3}$

(активные сопротивления учитывают только при определении степени затухания апериодических составляющих токов КЗ);

- пренебрегают ёмкостными проводимостями на землю ВЛ напряжением 220 кВ (для КЛ напряжением 110 кВ и выше ёмкостные проводимости надо учитывать);

- не учитывают сдвиг по фазе ЭДС источников энергии, входящих в расчетную схему;

- считают, что все элементы СЭС симметричны, а нарушение симметрии происходит только в месте КЗ;

- приближенно учитывают затухание апериодической составляющей тока КЗ в схемах с несколькими независимыми контурами;

- учитывают в виде обобщенных нагрузок центров питания все электроприёмники, за исключением мощных электродвигателей, подключенных непосредственно в месте КЗ или на небольшом электрическом удалении от него;

- пренебрегают различием значений сверхпереходных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям СМ;

- пренебрегают токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов.

Электрические сети напряжением до 1 кВ являются в основном распределительными, разветвленными, содержат значительное количество силовых элементов, устройств, аппаратов контроля и управления. Как правило, они питаются от одного мощного источника, для которого в аварийных режимах (КЗ) можно полагать $U_c = const$.

Расчеты токов КЗ в этих сетях выполняют с теми же допущениями, что и в сетях напряжением свыше 1 кВ, но с учётом активных сопротивлений силовых элементов сети. В расчётную схему короткозамкнутой цепи необходимо дополнительно включать и учитывать:

- сопротивления элементов РУ (проводников, кабелей и шин длиной от 10 м до 15 м и более, токовых катушек расцепителей автоматических выключателей, первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока, переходных сопротивлений контактов, коммутационных аппаратов);

- переходные сопротивления в месте КЗ;

- не симметрию сопротивлений фаз (например, при установке трансформаторов тока не во всех фазах).

Для этих сетей в полном сопротивлении КЗ-цепи, как правило, преобладает активная составляющая и при $r_{рез} \geq \frac{1}{3}x_{рез}$ индуктивной можно пренебречь.

3.4 Расчётные схемы и параметры их элементов

На первом этапе расчёта аварийных режимов с КЗ составляют расчётную схему на основе принципиальной схемы СЭС. Принципиальная схема должна соответствовать предшествующему нормальному режиму эксплуатации с

наибольшим числом включенных источников питания и подпиткой точек КЗ в последующих аварийных режимах.

Расчётная схема соответствует аварийным режимам СЭС и на ней в однолинейном изображении показывают источники СЭС, точки КЗ и все силовые элементы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих, т. е. генераторы, синхронные компенсаторы, статические источники реактивной мощности (ИРМ), малоудалённые от точек КЗ обобщенные нагрузки, силовые трансформаторы, автотрансформаторы, реакторы, ВЛ и КЛ, связывающие источники питания с током КЗ. В расчётной схеме учитывают электродвигатели как источники подпитки точек КЗ при их небольшой электрической удалённости и суммарной мощности (или каждого в отдельности) 1000 кВ·А и более.

Под электрической удалённостью точки КЗ от источника питания или подпитки понимают приведенное к номинальной мощности и номинальному напряжению источника суммарное сопротивление КЗ-цепи в относительных единицах (при его значении, большем трёх, КЗ считается удалённым, а при значении, меньшем или равном трём, КЗ считается малоудалённым). Удалённость точки КЗ можно оценить отношением тока источника в начальный момент времени КЗ к его номинальному току. КЗ малоудалённое, если это отношение равно или больше 1. КЗ удалённое, если это отношение меньше 1.

В зависимости от постановки задачи на схеме намечают несколько расчетных точек КЗ и указывают виды КЗ. Конечной целью расчётов может быть определение как максимальных (для проверки ЭО на стойкость к точкам КЗ), так и минимальных (для проверки релейной защиты) значений аварийных токов, а также остаточных напряжений в различных точках сети. Поэтому на этапе составления расчётной схемы выясняют расчётные условия:

- какие её элементы должны быть включены;
- где должны быть расположены точки КЗ;
- каков вид КЗ, таким и должен быть принят расчётный момент времени

КЗ для получения соответствующих значений параметров расчётного аварийного режима.

Каждый элемент расчётной схемы характеризуется расчётными параметрами. Для синхронного генератора – это номинальная полная мощность $S_{ном}$ (МВ·А) или активная мощность $P_{ном}$ (МВт); номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$, номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ); сверхпереходное реактивное сопротивление x''_d ; реактивное сопротивление обратной последовательности x''_{*2} ; постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трехфазного КЗ $T_d(c)$. Значения этих параметров приводятся в паспортных данных турбогенераторов и гидрогенераторов. Эквивалентный источник питания может быть получен объединением нескольких генераторов с суммарной номинальной мощностью $S_{\Sigma ном}$ и результирующим сверхпереходным сопротивлением x''_{*c} .

Если СЭС питается от мощной ЭЭС, то связь с ней может быть задана током КЗ или мощностью КЗ. При отсутствии этих данных выполняют

приближенный расчёт по предельному току отключения выключателей, установленных на шинах связи с ЭЭС, считая что ток или мощность при трёхфазном КЗ непосредственно за выключателем равны соответственно его номинальному отключаемому току $I_{откл.ном}$ или номинальной отключаемой мощности $S_{откл.ном}$ при заданном напряжении. Если в рассматриваемом узле находится местная станция, которая создает при КЗ ток $I''_{ст}$ или мощность $S''_{ст}$, следует исходить из значения тока $I_{откл.ном} - I''_{ст}$ или мощности $S_{откл.ном} - S''_{ст}$. На основе этих параметров находят сопротивление энергетической системы x_c .

Генераторы, синхронные компенсаторы и обобщенные нагрузки с большой электрической удалённостью целесообразно заменять эквивалентным источником с неизменной по амплитуде ЭДС. Действующее значение ЭДС такого источника можно считать равным среднему номинальному напряжению ступени трансформации, на которой он связан с остальной частью расчётной схемы. Его сопротивление равно суммарному сопротивлению соответствующей части СЭС.

Параметрами синхронного компенсатора являются: номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ·А); номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ); сверхпереходное сопротивление x''_{*d} ; сопротивление обратной последовательности x_{*2} ; постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трёхфазного КЗ T_a (с).

Синхронный двигатель задается параметрами: номинальная полная мощность $S_{ном}$ (МВ·А) или номинальная активная мощность $P_{ном}$ (МВт); номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$; номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ); КПД η (%); сверхпереходное реактивное сопротивление x''_{*d} или кратность пускового момента $M_{*пуск}$, причём

$$x''_{*d} \approx \frac{1}{I_{*пуск}} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{*пуск}}{I_{*пуск}}\right)^2}. \quad (3.1)$$

Параметры асинхронного двигателя: номинальная активная мощность $P_{ном}$ (МВт); номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ); номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$; КПД η (%); кратность пускового тока $I_{*пуск}$; кратность пускового момента $M_{*пуск}$; кратность максимального момента M_{*max} .

Обобщенная нагрузка включает в себя осветительную нагрузку, питание электродвигателей, печей, выпрямителей и т.п. Для обобщенной нагрузки сверхпереходная ЭДС $E''_{*н} = 0,85$. Среднее значение сопротивления нагрузки, приведенное к среднему номинальному напряжению ступени трансформации в месте подключения нагрузки и к полной мощности нагрузки, $x''_{*н} = 0,35$, для $t = 0$ и $x''_{*н} = 1,2$ для $t > 0$.

При определении начального тока КЗ обычно учитывают обобщенную нагрузку, которая непосредственно связана с точкой КЗ или незначительно электрически удалена от неё.

При определении начального тока трёхфазного КЗ синхронные генераторы и конденсаторы, мощные синхронные и асинхронные двигатели,

подключенные непосредственно в месте КЗ или на небольшом электрическом удалении от него, а также обобщенные нагрузки необходимо отражать на расчётной схеме сверхпереходными значениями ЭДС E''_d и сопротивления x''_d .

Двухобмоточный трансформатор задаётся параметрами: номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ·А); номинальные высшее и низшее напряжения обмоток $U_в$ и $U_н$ (кВ); напряжение КЗ $U_к$ (%); потери КЗ $P_к$ (кВт) или отношение $\frac{x_1}{r_1}$.

Трёхобмоточный трансформатор (автотрансформатор) имеет параметры: $S_{ном}$ (МВ·А); номинальные напряжения обмоток $U_в$, $U_с$ и $U_н$ (кВ); напряжения КЗ $U_{кв-с}$, $U_{кв-н}$, $U_{кс-н}$ (%); потери КЗ $P_{кв-с}$, $P_{кв-н}$, $P_{кс-н}$ (кВт).

Двухобмоточный трансформатор с расщеплённой обмоткой низшего напряжения: номинальная мощность обмотки высшего напряжения $S_в$ или номинальная мощность обмотки НН $S_{Н1(Н2)} = 0,5S_в$ (МВ·А); номинальное напряжение обмоток $U_в$, $U_{Н1(Н2)}$ (кВ); напряжение КЗ между обмотками $U_{кв-Н1(Н2)}$, $U_{кН1-Н2}$ (%); потери КЗ $P_к$ (кВт) или отношение $\frac{x_1}{r_1}$.

Реактор имеет параметры: $U_{ном}$ (кВ), номинальное индуктивное сопротивление $x_{ном}$ в Ом или %; коэффициент связи $k_{св}$ (для сдвоенного реактора); номинальный ток $I_{ном}$ (А); номинальные потери мощности $P_{ном}$ (кВт) или отношение $\frac{x_{ном}}{r}$.

Воздушная линия имеет параметры: длина (км); количество параллельных цепей; индуктивное сопротивление прямой последовательности x_1 ($\frac{Ом}{км}$); сопротивление нулевой последовательности x_0 ($\frac{Ом}{км}$); активное сопротивление прямой последовательности r_1 ($\frac{Ом}{км}$) или отношение $\frac{x_1}{r_1}$; активное сопротивление нулевой последовательности r_0 ($\frac{Ом}{км}$). Значения сопротивлений x_1 и r_1 даются в справочниках в зависимости от марки провода и усредненного значения среднего геометрического расстояния между проводами, средние расчётные значения x_1 следующие: $0,4 \frac{Ом}{км}$, для ВЛ напряжением 6-220 кВ; $0,33 \frac{Ом}{км}$ для ВЛ напряжением 330 кВ (два провода на фазу) и $0,3 \frac{Ом}{км}$ для ВЛ 500 кВ (три провода на фазу). Сопротивление x_0 зависит от сечения проводов, расстояний между фазами, наличия или отсутствия заземлённых тросов и соседних параллельных цепей.

Кабельная линия имеет параметры: длина (км); количество кабелей в линии; индуктивное сопротивление прямой последовательности x_1 ($\frac{Ом}{км}$); сопротивление нулевой последовательности x_0 ($\frac{Ом}{км}$); активное сопротивление прямой последовательности r_1 ($\frac{Ом}{км}$) или отношение $\frac{x_1}{r_1}$; активное сопротивление нулевой последовательности r_0 ($\frac{Ом}{км}$). Значения сопротивлений КЛ зависят от типов кабелей и изменяются в широких пределах. Средние расчётные значения

x_1 в случае трёхжильных КЛ следующие: $0,12 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ для КЛ напряжением 35 кВ; $0,08 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ для КЛ 6 и 10 кВ; $0,07 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ для КЛ 3 кВ.

Значения сопротивлений x_0 и r_0 зависят от способов прокладки кабелей и от их типов. В случае трёхжильных КЛ приближенно можно считать, что $x_0 = (3,5-4,6) \cdot x_1$; $r_0 = 10r_1$.

3.5 Схемы замещения и их преобразования

Схему замещения СЭС составляют на основе расчётной схемы для начального момента переходного процесса (источники замещаются сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями). Её komponуют для каждой точки КЗ и в неё включают элементы расчётной схемы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих к данной точке КЗ.

Переход от расчётной схемы к схеме замещения сводится к замене расчётной схемы эквивалентной электрической цепью, включающей в себя источники ЭДС и неизменные сопротивления, и к приведению параметров элементов и ЭДС различных ступеней СЭС к базисным условиям (к одной ступени напряжения, выбранной за основную).

Схема замещения СЭС представляет собой совокупность схем замещения отдельных элементов СЭС, соединённых между собой в той же последовательности, что и на расчётной схеме (таблица 3.3). Трансформаторные связи в расчётной схеме при этом заменяют электрическими (элементы с магнитно-связанными цепями вводят в схему замещения в виде соответствующих эквивалентных электрических сопротивлений). Целесообразно обозначать сопротивления в виде дроби: в числителе обозначать порядковый номер элемента арабскими цифрами, в знаменателе – значение его сопротивления. На схеме замещения указывают точку КЗ.

Сопротивления элементов, ЭДС источников питания, а также токи ветвей и напряжения в любых точках схемы замещения могут быть выражены в именованных или относительных единицах.

При расчёта в относительных единицах выполняют приведение одним из указанных способов [11].

Составленная схема замещения СЭС путём эквивалентных преобразований приводится к простейшему виду для определения результирующего сопротивления КЗ-цепи.

При этом используются известные из курса ТОЭ методы преобразования, применяемые при расчёте линейных электрических цепей (последовательное и параллельное сложение сопротивлений; замена нескольких источников с разными ЭДС и сопротивлениями, присоединённых к общей точке сети, одним эквивалентным источником; преобразования треугольника в эквивалентную звезду и наоборот; преобразование многолучевой звезды в эквивалентный многоугольник с диагоналями; преобразование звезды в эквивалентный

многоугольник с диагоналями; преобразование звезды с ЭДС в лучах в треугольник с ЭДС в сторонах и др.).

Таблица 3.3 – Схема замещения систем электроснабжения

Наименование элемента	Расчётная схема	Схема замещения
Синхронный генератор, Синхронный компенсатор		
Эквивалентный источник системы		
Синхронный двигатель		
Асинхронный двигатель		
Обобщённая нагрузка		
Двухобмоточный трансформатор		
Трёхобмоточный трансформатор		
Трёхфазный автотрансформатор		
Реактор		
Трёхобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщеплённой на две части		
Группа однофазных автотрансформаторов с обмоткой НН, расщеплённой на 2 части		
Сдвоенный реактор		

Продолжение таблицы 3.3

Воздушная линия		
Кабельная линия		

Используя коэффициенты токораспределения, можно сложную схему замещения СЭС с несколькими источниками (рисунок 3.1а) преобразовать в многолучевую схему замещения с генерирующими лучами и точкой КЗ в узле лучей (рисунок 3.1в). При этом наряду с упрощением схемы можно выявить роль каждого источника в питании точки КЗ.

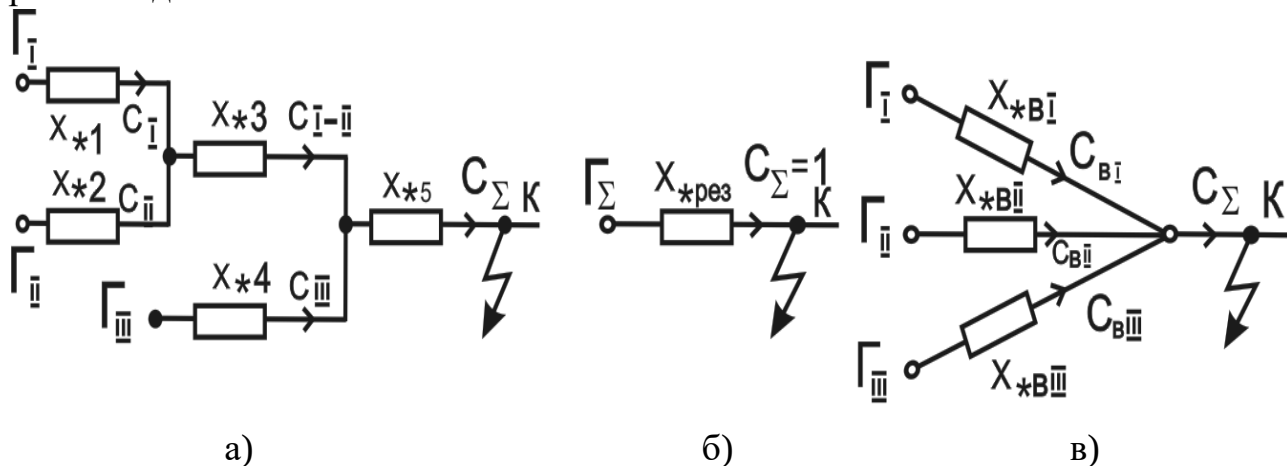


Рисунок 3.1 – Схемы замещения систем электроснабжения

Выполняя преобразования в рассматриваемом примере, руководствуются следующими правилами: условно полагают ток в месте КЗ равным единице ($C_{\Sigma} = 1$); приравнивают коэффициенты токораспределения (они показывают относительную долю тока КЗ, протекающего в ветви) в генерирующих ветвях исходной схемы замещения (рисунок 3.1) и в соответствующих ветвях новой схемы замещения (рисунок 3.1, в).

Следовательно $C_I = C_{BI}$; $C_{II} = C_{BII}$; $C_{III} = C_{BIII}$ (при этом выполняются тождества $C_I + C_{II} + C_{III} = C_{\Sigma}$; $C_{BI} + C_{BII} + C_{BIII} = 1$); преобразуют исходную схему к простейшему виду (рисунок 3.1, б), объединяя нулевые точки источников питания $\Gamma_I, \Gamma_{II}, \Gamma_{III}$, при этом $x_{*рез} = x_{*5} + \frac{x_{*4}(x_{*3} + \frac{x_{*1}x_{*2}}{x_{*1}+x_{*2}})}{x_{*4} + (x_{*3} + \frac{x_{*1}x_{*2}}{x_{*1}+x_{*2}})}$; считается, что коэффициенты токораспределения в параллельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей

$$C_{III} = C_{\Sigma} \frac{(x_{*3} + \frac{x_{*1}x_{*2}}{x_{*1}+x_{*2}})}{x_{*4} + (x_{*3} + \frac{x_{*1}x_{*2}}{x_{*1}+x_{*2}})}; C_{I-II} = C_{\Sigma} \frac{x_{*4}}{x_{*4} + (x_{*3} + \frac{x_{*1}x_{*2}}{x_{*1}+x_{*2}})}; \quad (3.2)$$

$$C_I = C_{I-II} \frac{x_{*2}}{x_{*1}+x_{*2}}; C_{II} = C_{I-II} - C_I; \quad (3.3)$$

по найденным $x_{*рез}$ и $C_{BI}, C_{BII}, C_{BIII}$ определяют сопротивления лучей новой схемы замещения

$$x_{*BI} = \frac{C_{\Sigma} x_{*рез}}{C_{BI}}; x_{*BII} = \frac{C_{\Sigma} x_{*рез}}{C_{BII}}; x_{*BIII} = \frac{C_{\Sigma} x_{*рез}}{C_{BIII}}. \quad (3.4)$$

Контрольные вопросы

1. Как в количественных соотношениях распределяются КЗ в электрических сетях по видам замыканий?
2. Как относительная частота различных видов КЗ зависит от напряжения электрической сети?
3. Какие меры необходимо предпринимать для снижения безаварийного электроснабжения при проектировании систем электроснабжения?
4. Какое техническое назначение имеет расчётов токов коротких замыканий?
5. Какие математические допущения применяются при расчётах токов короткого замыкания?
6. С чем связаны математические допущения, которые применяются при расчётах токов короткого замыкания?
7. Как строятся расчётные схемы и выбираются параметры их элементов?
8. Как преобразуются схемы замещения?
9. Как сложную схему замещения СЭС с несколькими источниками напряжения можно преобразовать в многолучевую схему замещения? С какой целью проводятся такие преобразования?
10. Какими правилами руководствуются при расчётах токов короткого замыкания?

4 Несимметричные аварийные режимы систем электроснабжения

Режим трёхфазной системы электроснабжения называется симметричным, если выполняются два условия:

- модули векторов напряжений (токов) в любом месте СЭС для всех трёх фаз равны;
- углы сдвига фаз между этими векторами составляют 120° .

Режим трёхфазной СЭС называется несимметричным, если не выполняются условия симметрии: первое или второе или первое и второе и.

Несимметричный режим может быть вызван продольной или поперечной несимметрией СЭС.

Продольная несимметрия связана с нарушением симметрии какого-либо элемента (участка) электрической сети СЭС (например, когда в одном из элементов электрической сети произошёл обрыв одной или двух фаз).

Поперечная несимметрия связана с нарушением симметрии нагрузок или с возникновением несимметричной КЗ.

Примером поперечной несимметрии являются:

- двухфазное (междуфазное) КЗ;
- однофазное и двухфазное КЗ на землю в электрических сетях с заземлённой нейтралью;
- однофазное КЗ на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью.

Теоретической основой для исследований несимметрических режимов СЭС может служить метод симметричных составляющих [13].

4.1 Поперечная несимметрия СЭС в аварийных режимах

В общем виде поперечная несимметрия в произвольном месте трёхфазной системы может быть представлена присоединением в этом месте к шинам электрической сети неодинаковых сопротивлений Z_A, Z_B, Z_C (рисунок 4.1).

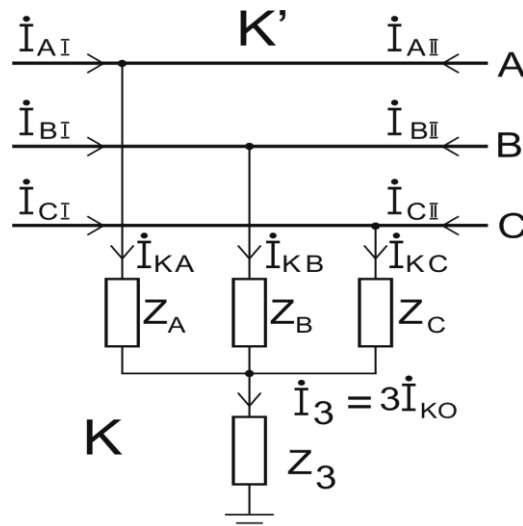


Рисунок 4.1 – Изображение поперечная несимметрии в произвольном месте трёхфазной сети

При проведении расчётов для упрощения считается, что результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ чисто реактивные (сами схемы отдельных последовательностей приведены к элементарному виду относительно точки КЗ, т. е. найдены E_Σ , $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$).

При записи граничных условий принимается, что фаза А является собой, т. е. находится в условиях, отличных от условий двух других фаз. В связи с этим при описании несимметричных аварийных режимов методом симметричных составляющих считается, что при однофазном КЗ или обрыве одной фазы повреждение происходит в фазе «А», а при междуфазном КЗ и двухфазном КЗ на землю повреждение происходит в фазах «В» и «С».

Схемы замещения и режимы для отдельных симметричных составляющих можно рассматривать независимо друг от друга, но при этом

учитывать в месте возникновения не симметрии необходимые граничные условия (обусловленные этой не симметрией).

Для облегчения записи расчётных соотношений будем опускать индексы вида КЗ в промежуточных выкладках и обращаем внимание, что все расчёты ведутся в векторной форме.

Приняв фазу А за особую, записываются следующие уравнения для контуров в схемах замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

$$\left. \begin{aligned} U_{A1} &= E_{A\Sigma} - jI_{A1}X_{1\text{рез}}, \\ U_{A2} &= 0 - jI_{A2}X_{2\text{рез}}, \\ U_{A0} &= 0 - jI_{A0}X_{0\text{рез}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Записываются токи и напряжения в месте КЗ как суммы соответствующих симметричных составляющих

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}, \\ I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0}, \\ I_C &= a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_{A0}, \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U_{A1} + U_{A2} + U_{A0}, \\ U_B &= a^2 U_{A1} + a U_{A2} + U_{A0}, \\ U_C &= a U_{A1} + a^2 U_{A2} + U_{A0}. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Надо иметь в виду, что уравнения (4.2) и (4.3) можно использовать при определении токов в любом элементе схемы и напряжений в любом её узле. Для этого следует предварительно определить значения симметричных составляющих токов в рассматриваемом элементе и симметричных составляющих напряжений в рассматриваемом узле.

Девять уравнений (4.1)-(4.3) содержат двенадцать неизвестных

$$(I_{A1}, I_{A2}, I_{A0}, U_{A1}, U_{A2}, U_{A0}, I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C).$$

Известными величинами являются: ЭДС $E_{A\Sigma}$ и результирующие сопротивления схем прямой, обратной и нулевой последовательностей ($X_{1\text{рез}}$, $X_{2\text{рез}}$ и $X_{0\text{рез}}$). Для однозначного решения (4.1)-(4.3) не хватает трёх уравнений. Недостающие три уравнения можно получить из рассмотрения граничных условий соответствующего вида несимметричного КЗ.

Для примера рассматривается симметричное трехфазное КЗ. Для наглядности и удобства в рассмотрении граничных условий следует, что КЗ вынесено в сторону от шин на ответвления. На электрический режим такое

представление схемы не повлияет, т. к. сопротивление проводников ответвлений равно нулю, рисунок 4.2.

При трёхфазном КЗ напряжение каждой из фаз в месте КЗ равно нулю

$$U_{kA}^{(3)} = 0, U_{kB}^{(3)} = 0, U_{kC}^{(3)} = 0. \quad (4.4)$$

Подставляя эти граничные условия в уравнения (4.3) и решая совместно, получается результат: $U_{A1} = 0, U_{A2} = 0, U_{A0} = 0$. Из уравнений (4.1) следует

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{E_{A\Sigma}}{jX_{1\text{рез}}}, I_{A2}^{(3)} = 0, I_{A0}^{(3)} = 0. \quad (4.5)$$

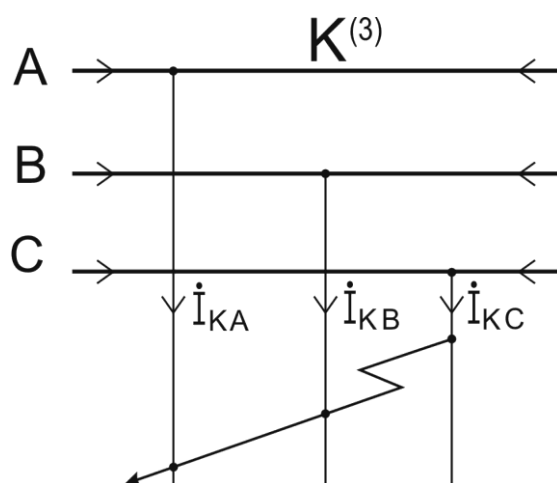


Рисунок 4.2 – Схема симметричного трёхфазного короткого замыкания

Токи в поврежденных фазах находятся из уравнений (4.2)

$$I_{kA}^{(3)} = I_{A1}^{(3)}, I_{kB}^{(3)} = a^2 I_{A1}^{(3)}, I_{kC}^{(3)} = a I_{A1}^{(3)}. \quad (4.6)$$

Коэффициент, связывающий значения тока аварийной фазы и тока прямой последовательности фазы А

$$m^{(3)} = \frac{I_{kA}^{(3)}}{I_{A1}^{(3)}} = 1. \quad (4.7)$$

Расчёт токов и напряжений при рассматриваемом несимметричном КЗ, по существу, сводится к вычислению их симметричных составляющих. Как только симметричные составляющие найдены, фазные значения токов I_A, I_B, I_C и напряжений U_A, U_B, U_C определяются по (4.2) и (4.3).

4.2 Межфазное короткое замыкание (двухфазное КЗ)

Представляя КЗ как замыкание между фазами В и С (рисунок 4.3), записываются следующие граничные условия

$$I_{kA}^{(2)} = 0, \quad (4.8)$$

$$I_{kB}^{(2)} = -I_{kC}^{(2)}, \quad (4.9)$$

$$U_{kB}^{(2)} = U_{kC}^{(2)}. \quad (4.10)$$

Так как сумма фазных токов равна нулю (т. е. $I_{kA}^{(2)} + I_{kB}^{(2)} + I_{kC}^{(2)} = 0$), то система является уравновешенной и, следовательно, $I_{kAO}^{(2)} = 0$ (симметричная составляющая токов нулевой последовательности отсутствует). При этом из (4.2) следует, что ток фазы А будет равен $I_{kA}^{(2)} = I_{kA1}^{(2)} + I_{kA2}^{(2)} = 0$ или (если опустить часть индексов) $I_A = I_{A1} + I_{A2} = 0$, откуда получается, что

$$I_{A1} = -I_{A2}. \quad (4.11)$$

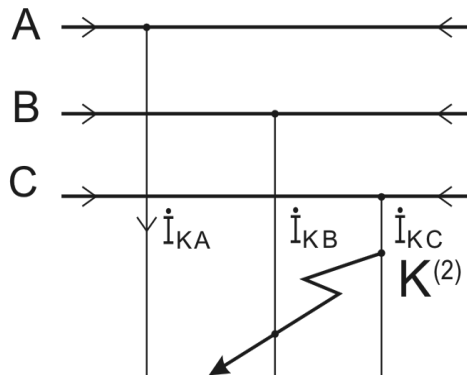


Рисунок 4.3 – Замыкание между фазами В и С

Подставив U_B и U_C из (4.3) в уравнение (4.10), получается

$$U_{A1} = U_{A2}. \quad (4.12)$$

При подстановке U_{A1} и U_{A2} из (4.1) в (4.12) получается $E_{A\Sigma} - jI_{A1}X_{1pez} = -jI_{A2}X_{2pez}$ и с учётом (4.11) выходит выражение для определения тока прямой последовательности при междуфазном КЗ

$$I_{A1} = I_{kA1}^{(2)} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(X_{1pez} + X_{2pez})}. \quad (4.13)$$

Определяют теперь токи в повреждённых фазах В и С на основе (4.2) при условии (4.11)

$$I_{kB}^{(2)} = a^2 I_{A1} + a I_{A2} = (a^2 - a) I_{A1} = -j\sqrt{3} I_{A1}. \quad (4.14)$$

Из (4.9) следует

$$I_{kC}^{(2)} = -I_{kB}^{(2)} = j\sqrt{3} I_{A1}. \quad (4.15)$$

Коэффициент взаимосвязи токов

$$m^{(2)} = \frac{I_{kB}^{(2)}}{I_{A1}^{(2)}} = \frac{I_{kC}^{(2)}}{I_{A1}^{(2)}} = \sqrt{3}. \quad (4.16)$$

Таким образом, абсолютное значение полного тока при междуфазном КЗ

$$I_K^{(2)} = \sqrt{3} I_{A1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} E_{A\Sigma}}{X_{1pez} + X_{2pez}}. \quad (4.17)$$

На основании (4.17) в момент появления КЗ получается

$$I_k^{(2)''} = \frac{\sqrt{3} E_{A\Sigma}''}{\sqrt{3} (X_{1pez} + X_{2pez})} = \frac{E_{A\Sigma}''}{X_{1pez} + X_{2pez}}, \quad (4.18)$$

где $E_{A\Sigma}''$ – междуфазная сверхпереходная результирующая ЭДС;

$\frac{E_{A\Sigma}''}{\sqrt{3}}$ – фазная сверхпереходная результирующая ЭДС.

При питании от электроэнергетической системы (ЭЭС)

$$I_k^{(2)''} = \frac{U_{cp}}{X_{1pez} + X_{2pez}}, \quad (4.19)$$

где U_{cp} – междуфазное среднее номинальное напряжение системы.

Для нахождения симметричных составляющих напряжения нужно выразить $U_B^{(2)}$ и $U_C^{(2)}$ через симметричные составляющие из (4.3) и подставить в (4.10). Получится $(a^2 - a)(U_{A1} - U_{A2}) = 0$, откуда следует $U_{A2} = U_{A1}$; далее из (4.1) с учётом (4.11)

$$U_{A1} = U_{A2} = j I_{A1} X_{2pez}, \quad (4.20)$$

(с учётом всех индексов $U_{kA1}^{(2)} = U_{kA2}^{(2)} = j I_{kA1}^{(2)} X_{2pez}$).

При нахождении напряжения $U_{AO}^{(2)}$ следует учитывать, что в системах с заземлённой нейтралью ($X_{0\text{рез}}$ имеет конечное значение) напряжение $U_{AO}^{(2)} = 0$ при $I_{AO}^{(2)} = 0$, на основе (4.1). В системах с изолированной нейтралью ($X_{0\text{рез}} = \infty$) $I_{AO}^{(2)} = 0$. Следовательно, на основе (4.1) $U_{AO}^{(2)} = \infty \cdot 0$ неопределённо.

Таким образом, напряжение $U_{AO}^{(2)}$ может иметь произвольное значение, так как в рассматриваемом виде КЗ смещение нейтрали системы относительно земли не влияет на величины токов.

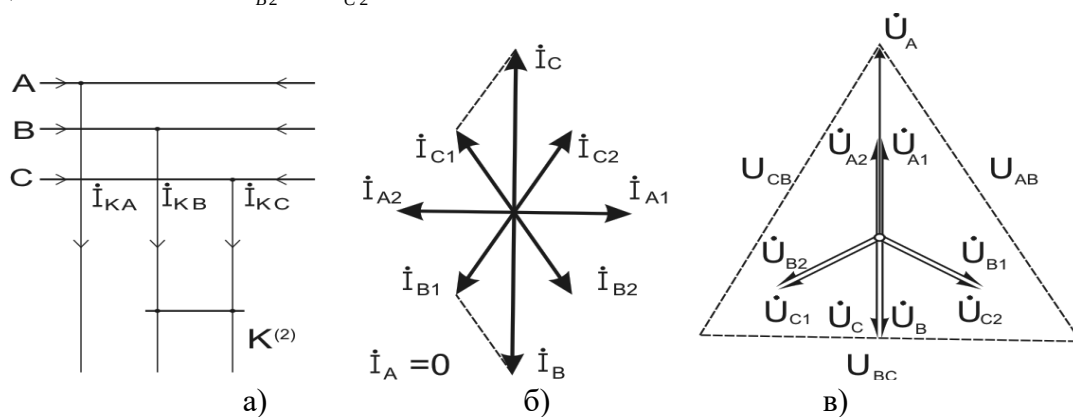
На основе найденных симметричных составляющих напряжений находятся фазные напряжения в месте КЗ. Выбрав значение $U_{AO} = 0$, из (4.3) с учётом (4.20) получается

$$U_{kA}^{(2)} = U_{A1} + U_{A2} = 2U_{A1} = j2I_{A1}X_{2\text{рез}} \quad (4.21)$$

и с учётом (4.10)

$$U_{kB}^{(2)} = U_{kC}^{(2)} = a^2 U_{A1} + a U_{A2} = (a^2 + a)U_{A1} = -U_{A1} = -\frac{U_{kA}^{(2)}}{2}. \quad (4.22)$$

Построить векторную диаграмму токов и напряжений (рисунок 4.4) в месте КЗ. Построение можно начать, например, с вектора I_{A1} , достраивая затем векторы других фаз прямой последовательности I_{B1} и I_{C1} . На основе (4.11) строится вектор I_{A2} и достраиваются векторы других фаз обратной последовательности I_{B2} и I_{C2} .



а – схема места КЗ; б – векторная диаграмма токов; в – ВД напряжений

Рисунок 4.4 – Векторные диаграммы токов и напряжений

Учитывается, что $I_{A0} = I_{B0} = I_{C0} = 0$. Получаются векторы фазных токов, суммируя соответствующие векторы симметричных составляющих $I_B = I_{B1} + I_{B2}$; $I_C = I_{C1} + I_{C2}$; $I_A = I_{A1} + I_{A2} = 0$.

Далее строятся векторы U_{A1} и U_{A2} на основе (4.20), достраиваются остальные векторы симметричных составляющих U_{B1} , U_{C1} , U_{B2} , U_{C2} . Принимая

$U_{A0} = U_{B0} = U_{C0} = 0$, $U_{AO} = U_{BO} = U_{CO} = 0$, получают вектор $U_B = U_{B1} + U_{B2}$ и вектор $U_C = U_{C1} + U_{C2}$.

4.3 Учёт переходного сопротивления в месте короткого замыкания

При расчётах КЗ в распределительных сетях особое значение имеет учёт переходных сопротивлений и контактных соединений в месте КЗ.

Обычно в этом месте образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой. Электрическая дуга возникает либо с самого начала повреждения, как, например при перекрытии или пробое изоляции, либо через некоторое время, когда перегорит элемент, вызвавший КЗ. При КЗ между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги.

В ряде случаев переходные сопротивления столь малы, что практически ими можно пренебречь. Естественно, что при прочих равных условиях ток при таком КЗ больше, чем при наличии переходного сопротивления. Поэтому, когда требуется найти возможные наибольшие значения токов, исходят из наиболее тяжёлых условий, считая, что в месте КЗ никаких переходных сопротивлений нет. Рассмотрим учёт переходного сопротивления при междуфазном КЗ, предполагая, что переходное сопротивление в основном определяется сопротивлением электрической дуги, которое в первом приближении можно считать активным сопротивлением r_d .

Пусть КЗ между фазами В и С (рисунок 4.5) произошло через сопротивление дуги r_d . Его можно представить как глухое междуфазное КЗ на ответвлении, фазы которого имеют одинаковые сопротивления $0,5r_d$. Таким приёмом несимметричный участок трёхфазной цепи приведён к симметричному, что облегчает применение метода симметричных составляющих. Введение сопротивления $0,5r_d$ в фазу А не меняет условий рассматриваемого КЗ, поскольку на данном участке ток отсутствует.

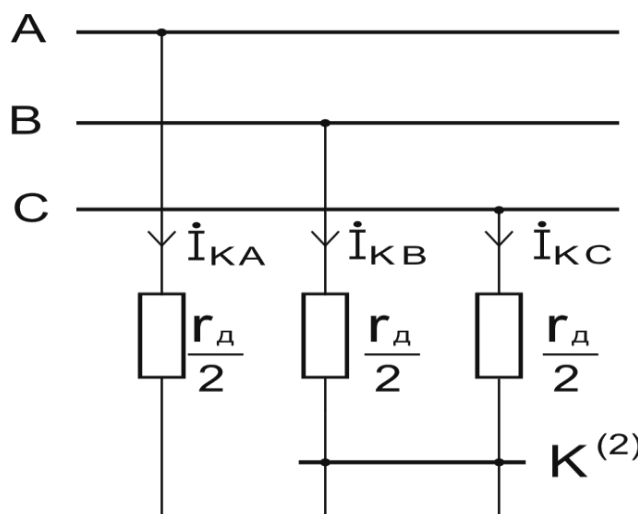


Рисунок 4.5 – Короткое замыкание между фазами В и С

Считая остальную часть схемы чисто индуктивной, по аналогии с (4.13) записывается ток прямой последовательности в месте КЗ в виде

$$I_{kA1}^{(2)} = \frac{E_{A\Sigma}}{\left(\frac{r_D}{2} + jX_{1pez}\right) + \left(\frac{r_D}{2} + jX_{2pez}\right)} = \frac{E_{A\Sigma}}{r_D + j(X_{1pez} + X_{2pez})}. \quad (4.23)$$

Напряжение обратной последовательности за сопротивлением дуги r_D с учетом (4.11) и (4.20)

$$U_{kA2}^{(2)} = I_{kA1}^{(2)}(r_D + jX_{2pez}), \quad (4.24)$$

а напряжение прямой последовательности в этой же точке определяется уравнением (4.12), т. е. $U_{kA1}^{(2)} = U_{kA2}^{(2)}$.

4.4 Однофазное короткое замыкание

На рисунке 4.6 показана схема ответвлений в точке однофазного КЗ. Граничными условиями для однофазного КЗ являются соотношения

$$U_{kA}^{(1)} = 0; U_{kB}^{(1)} = 0; U_{kC}^{(1)} = 0. \quad (4.25)$$

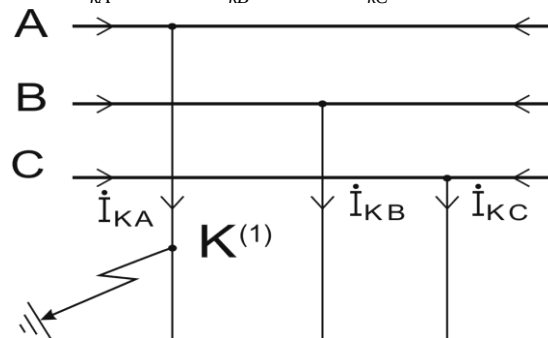


Рисунок 4.6 – Схема ответвлений в точке однофазного КЗ

Вычитая из второго уравнения третье в системе (4.2) и учитывая ГУ (4.25), получается $0 = (a^2 - a)I_{A1} + (a - a^2)I_{A2}$ и в итоге

$$I_{A1} = I_{A2}. \quad (4.26)$$

Складывая второе и третье уравнения (4.2) с учётом (4.25) и (4.26), получим

$$\begin{aligned} 0 &= (a^2 + a)I_{A1} + (a^2 + a)I_{A2} + 2I_{A0}, \\ (a^2 + a)I_{A1} + I_{A0} &= 0, \\ -I_{A1} + I_{A0} &= 0, \end{aligned}$$

В ИТОГЕ

$$I_{A0} = I_{A1} = I_{A2}. \quad (4.27)$$

С учётом (4.27) переписываются уравнения (4.1)

$$U_{A1} = E_{A\Sigma} - jI_{A1}X_{1pez}, \quad U_{A2} = -jI_{A1}X_{2pez}, \quad U_{A0} = -jI_{A1}X_{0pez}. \quad (4.1')$$

Из (4.25) следует $U_A = U_{A1} + U_{A2} + U_{A0} = 0$; $U_{A1} = -(U_{A2} + U_{A0})$; с учётом этого $U_{A1} = jI_{A1}(X_{2pez} + X_{0pez})$. В итоге из первого уравнения получается

$$E_{A\Sigma} = jI_{A1}(X_{1pez} + X_{2pez} + X_{0pez}).$$

Отсюда определяется симметричная составляющая прямой последовательности тока фазы А

$$I_{A1}^{(1)} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(X_{1pez} + X_{2pez} + X_{0pez})}. \quad (4.28)$$

Ток фазы А в аварийном режиме (рисунок 4.6) с учётом (4.27)

$$I_{kA}^{(1)} = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = \frac{3E_{A\Sigma}}{j(X_{1pez} + X_{2pez} + X_{0pez})}. \quad (4.29)$$

Коэффициент взаимосвязи токов в случае однофазного КЗ

$$m^{(1)} = \frac{I_{kA}^{(1)}}{I_{A1}^{(1)}} = 3. \quad (4.30)$$

Для начального момента времени ($t = 0$) переходного процесса абсолютное значение тока однофазного КЗ (т. е. сверхпереходный ток) определяется по аналогии с (4.29)

$$I_k^{(1)''} = \frac{3 \cdot \frac{E_{A\Sigma}''}{\sqrt{3}}}{X_{1pez} + X_{2pez} + X_{0pez}} = \frac{\sqrt{3}E_{A\Sigma}''}{X_{1pez} + X_{2pez} + X_{0pez}}, \quad (4.31)$$

где $\frac{E_{A\Sigma}''}{\sqrt{3}}$ – фазная сверхпереходная результирующая ЭДС.

При питании от электроэнергетической системы (ЭЭС) со средним линейным, номинальным напряжением UCP

$$I_k^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{cp}}{X_{1pez} + X_{2pez} + X_{0pez}}. \quad (4.32)$$

Действительные напряжения в месте КЗ находятся на основе уравнений (4.1'), (4.3), (4.25)

$$U_{kA}^{(1)} = 0, U_{kB}^{(1)} = a^2 jI_{A1}(X_{2pez} + X_{0pez}) - ajI_{A1}X_{2pez} - jI_{A1}X_{0pez}, \quad (4.33)$$

$$U_{kC}^{(1)} = ajI_{A1}(X_{2pez} + X_{0pez}) - a^2 jI_{A1}X_{2pez} - jI_{A1}X_{0pez}. \quad (4.34)$$

Построить векторные диаграммы токов (рисунок 4.7). Построение проводим в следующем порядке. В произвольном направлении (например, направо горизонтально) откладываем вектор I_{A1} . Учитывая равенство (4.27), так же откладываем векторы I_{A2} и I_{A0} , а затем и вектор $I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$.

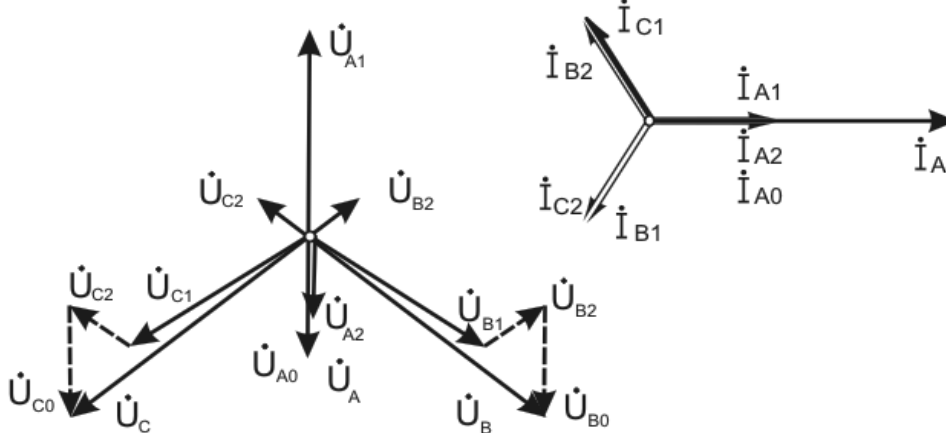


Рисунок 4.7 – Векторные диаграммы токов

К вектору I_{A1} достраиваются векторы I_{B1} и I_{C1} , а к вектору I_{A2} – векторы I_{B2} и I_{C2} . Векторы $I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0} = 0$, $I_C = I_{C1} + I_{C2} + I_{C0} = 0$ т. к. $I_{B0} = I_{C0} = I_{A0}$.

Далее строятся векторы U_{A2} и U_{A0} на основе формул (4.1'), затем достраивается U_{B2} и U_{C2} . Вектор $U_{A1} = -(U_{A2} + U_{A0})$, к нему достраивается U_{B1} и U_{C1} .

В итоге определяются векторы фазных напряжений U_A, U_B, U_C и $U_A = 0$.

Допускается теперь, что фаза А замкнулась на землю через сопротивление дуги $r_{\dot{A}}$ (рисунок 4.8). Чтобы сохранить симметрию рассматриваемого участка трёхфазной цепи, принимаем, что такие же сопротивления есть в двух других фазах. Это допустимо, так как не нарушает граничных условий: $I_{kB}^{(1)} = I_{kC}^{(1)} = 0$ (как и в схеме, рисунок 4.6).

При наличии дуги результирующее сопротивление каждой последовательности увеличивается на r_d . Следовательно, по аналогии с (4.28) можно найти в месте КЗ

$$I_{A1}^{(1)} = \frac{E_{A\Sigma}}{(r_d + jX_{1pez}) + (r_d + jX_{2pez}) + (r_d + jX_{0pez})} = \frac{E_{A\Sigma}}{3r_d + j(X_{1pez} + X_{2pez} + X_{0pez})}.$$

Напряжение прямой последовательности за сопротивлением (точка $K^{(1)}$)

$$U_{A1}^{(1)} = [(3r_d + j(X_{2pez} + X_{0pez}))] I_{A1}^{(1)}. \quad (4.36)$$

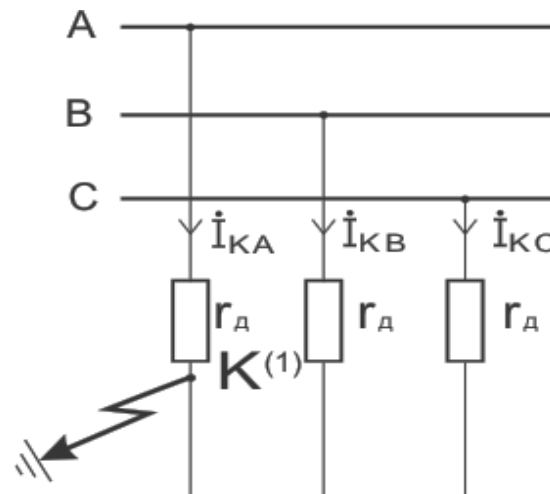


Рисунок 4.8 – Замыкание на землю фазы А

Если сравнить формулы для определения симметричной составляющей прямой последовательности тока фазы А, то можно сделать следующее обобщение: формулы (4.5), (4.13) и (4.28) можно записать в виде

$$I_{A1}^{(n)} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(X_{1pez} + X_{\Delta}^{(n)})}, \quad (4.37)$$

где $X_{\Delta}^{(n)}$ – добавочное сопротивление в КЗ – ветви в случае КЗ типа (n).

При $n = 3$ (трёхфазное КЗ) $X_{\Delta}^{(3)} = 0$, при $n = 2$ $X_{\Delta}^{(2)} = X_{2pez}$ при $n = 1$ $X_{\Delta}^{(1)} = X_{2pez} + X_{0pez}$.

4.5 Соотношения между токами несимметричных коротких замыканий и трёхфазного короткого замыкания

Рассматривая выражения для симметричных составляющих токов и направлений в месте несимметричного КЗ, можно заметить, что токи обратной

и нулевой последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ, прежде всего, состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

Структура выражений (4.5), (4.13) и (4.28) показывает, что ток прямой последовательности особой фазы (А, например) при любом (n) виде несимметричных КЗ можно выразить в общем виде

$$I_{A1}^{(n)} = \frac{E_{A\Sigma}}{jX_{1pez} + Z_{\Delta}^{(n)}}, \quad (4.38)$$

где $Z_{\Delta}^{(n)}$ – добавочное сопротивление, величина которого для каждого вида КЗ (n) определяется по своей формуле.

Например,

$$Z_{\Delta}^{(3)} = 0; \quad Z_{\Delta}^{(1)} = 3r_{\Delta} + j(X_{2pez} + X_{0pez}); \quad Z_{\Delta}^{(2)} = r_{\Delta} + jX_{2pez}; \quad Z_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{jX_{2pez}(3r_{\Delta} + jX_{0pez})}{j(X_{2pez} + X_{0pez}) + 3r_{\Delta}}. \quad (4.39)$$

Кроме того, следует учесть, что фазные токи в месте КЗ также пропорциональны току прямой последовательности. Модуль фазного тока в месте любого (n) несимметричного КЗ в общем виде можно найти как

$$I_{KA}^{(n)} = m^{(n)} I_{A1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент взаимосвязи токов.

Обобщённая запись формулы (4.38) с учётом (4.39) позволила сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности: ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определён как ток при трёхфазном КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на добавочное сопротивление $Z_{\Delta}^{(n)}$, которое не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки схемы, а также в общем случае сопротивлением возникшей дуги.

При этом напряжение $U_{K1}^{(n)}$ на месте КЗ можно найти в общем виде как

$$U_{K1}^{(n)} = Z_{\Delta}^{(n)} I_{K1}^{(n)}. \quad (4.40)$$

Установленная эквивалентность указывает, что все полученные ранее выражения для тока трёхфазного КЗ можно распространить на случаи

несимметричного КЗ. Это относится и к постоянным времени затухания, связанным с рассматриваемым током.

Правило эквивалентности прямой последовательности и определенные значения $X_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ позволяют достаточно просто сравнить различные виды КЗ. Сравнивая их для условий, при которых КЗ – цепь чисто индуктивная ($Z_{\Delta}^{(n)} = X_{\Delta}^{(n)}$).

Предположительно, что КЗ разных видов происходит поочередно в одной и той же точке системы и при одних и тех же условиях. Из их анализа можно установить следующие неравенства

$$X_n^{(1)} > X_{\Delta}^{(2)} > X_{\Delta}^{(1,1)} > X_{\Delta}^{(3)} = 0, \quad (4.41)$$

$$I_{K1}^{(1)} < I_{K1}^{(2)} < I_{K1}^{(1,1)} < I_K^{(3)}, \quad (4.42)$$

$$U_{K1}^{(1)} > U_{K1}^{(2)} > U_{K1}^{(1,1)} > U_K^{(3)} = 0. \quad (4.43)$$

С практической точки зрения интересно знать пределы, в которых могут находиться значения токов при несимметричных КЗ в сравнении со значениями токов трёхфазного КЗ, возникающего в той же точке системы. Знание этих пределов позволяет по известному значению тока трёхфазного КЗ оценить в первом приближении возможные наибольшие и наименьшие значения токов при несимметричных КЗ.

На основе (4.38) и (4.39) отношение тока в месте несимметричного КЗ к току трёхфазного КЗ при тех же условиях можно записать

$$K_{(n-3)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = \frac{m^{(n)} E_{\Sigma}^{(n)}}{E_{\Sigma}^{(3)} \left(1 + \frac{X_{\Delta}^{(n)}}{X_{1рез}}\right)}. \quad (4.44)$$

Это выражение относится к произвольному моменту времени. В зависимости от того, каким реактивным сопротивлением представлен генератор в схеме прямой последовательности, должна быть принята соответствующая ЭДС $E_{\Sigma}^{(3)}$.

Рассматриваемые предельные соотношения справедливы для токов только в месте КЗ и их нельзя распространять на токи остальных ветвей рассматриваемой схемы.

Контрольные вопросы

1. Что такое несимметричные аварийные режимы систем электроснабжения?
2. Что такое поперечная несимметрия систем электроснабжения в аварийных режимах?

3. Что такое межфазные токи короткого замыкания?
4. Как выглядит векторная диаграмма токов в месте короткого замыкания?
5. Как выглядит векторная диаграмма напряжений в месте короткого замыкания?
6. Каким образом учитывается переходное сопротивление в месте короткого замыкания?
7. В чем состоят особенности однофазного короткого замыкания на землю?
8. Как выглядит векторная диаграмма токов в месте однофазного короткого замыкания?
9. Как выглядит векторная диаграмма напряжений в месте однофазного короткого замыкания?
10. Какие соотношения между токами несимметричных коротких замыканий и трёхфазного короткого замыкания?

Библиографический список

1. Касаткин, А.С. Электротехника: учебник / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – Москва : Издат. центр «Академия», 2003. – 544 с.
2. Винославский, В.Н. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебник / В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др. – Киев : Выща школа, 1989. – 422 с.
3. Ивашкин, В.И. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие / В.И. Ивашкин, Ю.А. Юдаев. – Рязань : Изд-во РГРТУ, 2012. – 128 с.
4. Гамазин, С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой: учебное пособие / С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – Москва : Изд-во МЭИ, 1997. – 422 с.
5. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебное пособие / В.А. Веников. – Москва : Высшая школа, 1970. – 472 с.
6. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях: учебное пособие / Под ред. В.А. Веникова. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
7. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник / С.А. Ульянов. – Москва : Энергия, 1970. – 520 с.
8. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / Ю.А. Куликов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 284 с.
9. Строев, В.А. Математическое моделирование элементов электрических систем: учебное пособие / В.А. Строев, С.В. Шульженко. – Москва : Изд-во МЭИ, 2002. – 56 с.
10. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник / И.П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2006. – 608 с.
11. Электротехнический справочник. Том 3. Книга первая. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 656 с.
12. Зевеке, Г.В. Основы теории цепей: учебное пособие / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
13. Юдаев, Ю.А. Численные методы решения дифференциальных уравнений и программирование в среде Турбо Бейсик: учебное пособие / Ю.А. Юдаев. – Рязань : Изд-во РГРТА, 1996. – 60 с.
14. Шуп, Т. Прикладные численные методы в физике и технике: Пер. с англ. – Москва : Высшая школа, 1990. – 254 с.

Учебное издание

Юдаев Юрий Алексеевич

**Переходные и аварийные режимы
в системах электроснабжения**

Часть 1

Учебное пособие

Подписано в печать _____. Тираж 5 экз.
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета
390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53