

Г.А. Мелешкин

**Электромагнитные переходные процессы
в электроэнергетических системах**

Санкт-Петербург
2005

УДК 53
ББК 22.3
П 37

Мелешкин Г.А.

Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: Монография. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2005. – 376 с.

Рассмотрены основные электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах с учетом главных физических параметров последних с применением необходимого математического аппарата. Большое внимание уделено иллюстрации переходных процессов числовыми примерами расчетов.

Книга предназначена для слушателей учебных центров повышения квалификации, инженерно-технических работников электроэнергетических предприятий, для студентов старших курсов электроэнергетических специальностей высших учебных заведений.

При написании книги автор учитывал требования Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки «Электроэнергетика» для дипломированных специалистов, обучающихся по специальностям «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», а также по специальности «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» в части переходных процессов в автономных энергетических установках.

УДК 53
ББК 22.3
П 37

Научный редактор д.т.н., проф. Г.В. Меркурьев
Редактор О.В. Шитова

Утверждено Научно-методическим Советом НОУ «Центр подготовки кадров энергетики» 25.05.2005 г.

ISBN 5-98408-052-4

© Г.А. Мелешкин, 2005
© НОУ «Центр подготовки кадров
энергетики», 2005

**Electromagnetic transient performance
of electric power systems**

by
Georg A. Meleshkin
professor

St. Petersburg
2005

Мелешкин Георгий Александрович

Профессор НОУ «Центр подготовки кадров энергетики».
Профессор Северо-Западного государственного заочного
технического университета.

Почетный работник высшего образования России.

Работает в области переходных процессов в электроэнергетических системах.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах происходят при нарушении равновесного состояния электромагнитных полей электрооборудования. Основное влияние на характер протекания этих процессов оказывают синхронные генераторы, компенсаторы и мощные синхронные и асинхронные двигатели.

Принято, что в генераторных агрегатах мощных энергосистем, вследствие различного времени протекания электромагнитных, электромеханических и механических переходных процессов, эти процессы можно рассматривать отдельно друг от друга, хотя имеет место единый переходный процесс при нарушении установившегося режима агрегатов.

В этой монографии автор, следуя принятой концепции об отдельном рассмотрении переходных процессов, излагает теоретические основы электромагнитных переходных процессов на основе общих математических зависимостей, описывающих переходные режимы при условии постоянства частоты в сети.

При написании книги автор использовал фундаментальные исследования по электромагнитным переходным процессам, опубликованные в монографиях А.А. Горева, Н.Н. Щедрина, Р.А. Лютера, П.С. Жданова, С.А. Ульянова, И.А. Сыромятникова, R. Rudenberg, J. Laibl, В. Adkins, Ch. Concordia, E. Kimbark и др. [1-14].

В основу методической структуры книги положен принцип предварительного изложения общей теории переходных процессов в элементах электрооборудования с последующим рассмотрением отдельных характерных процессов. Причем, эти процессы рассматриваются на основе главных параметров электрооборудования, что позволяет легко получать качественную картину процесса и применять общую теорию для анализа и расчета более сложных режимов на практике.

Общее направление изложения материала книги – практическое направление для решения задач по переходным режимам.

В книге решение дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в линейном плане, производится при помощи операторного метода – преобразования P.S. Laplace. Поэтому вначале излагаются основы этого метода с целью облегчения знакомства читателя с математическим описанием различных видов переходных процессов.

Несимметричные режимы в схемах электроснабжения описываются при помощи общей системы алгебраических уравнений, представленных на основе метода симметричных составляющих C.L. Fortescue.

Переходные процессы в основном элементе электрической системы – синхронном генераторе – изложены на основе теории R.H. Park-A.A. Горева: представленная общая система уравнений используется для анализа и расчета отдельных процессов в синхронной машине и влияния этих процессов на систему электроснабжения.

Полученные результаты анализа переходных режимов в книге сопровождаются числовыми примерами расчетов, облегчающих, по мнению автора, применение расчетных зависимостей для решения других, подобных задач.

В книге применяются общепринятые в технической литературе условные обозначения физических величин; на электрических схемах, выполненных в качестве пояснительных рисунков, применяются условные обозначения в виде первых букв русских наименований элементов схем.

При написании монографии автор опирался на свой многолетний опыт по исследованию переходных процессов в электроустановках и на опыт преподавания курса «Переходные процессы в электроэнергетических системах» в высшей школе.

Автор выражает глубокую благодарность члену-корреспонденту Международной Энергетической Академии, д.т.н., профессору Г.В. Меркурьеву за внимание и полезные советы при подготовке книги к изданию.

Все замечания и пожелания просьба направлять по адресу:
194223, Санкт-Петербург, а/я 44.

РАЗДЕЛ I

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Глава 1

Задачи изучения и математический аппарат для исследования переходных процессов

§ 1.1. Задачи изучения и расчета переходных процессов в системах электроснабжения; принимаемые допущения

Переходные процессы возникают в электрической или механической системах тогда, когда в них происходит перераспределение энергии между элементами. Например, при включении электродвигателя в сеть возникает переходный процесс, связанный с переходом этой электромеханической системы от состояния покоя к вращению. Процесс сопровождается накоплением электромагнитной энергии в обмотках статора и ротора, а также накоплением кинетической энергии в роторе электродвигателя и во вращающихся частях рабочего механизма.

Состояние любой динамической системы называется **установившимся (стационарным)**, если величины, описывающие ее поведение, не меняются во времени или являются периодическими функциями времени, т. е. имеет место колебательное движение системы.

Динамическая система находится в **переходном (не стационарном)** состоянии, если изменяются ее энергетические условия.

Переходные процессы могут быть вредными и полезными. Например, пуск асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором от синхронного генератора или от трансформатора соизмеримой мощности сопровождается резким снижением (провалом) напряжения, которое отрицательно влияет на работу остальных потребителей энергии. Это вредный переходный процесс. В качестве примера полезного переходного процесса может служить процесс, возникающий при пробое разрядника, который предотвращает появление грозовых перенапряжений на электроустановках.

Целью изучения переходных процессов является правильный выбор параметров электрических схем и конструкций, обеспечивающих или ослабление вредного влияния процесса, или, наоборот, усиление его полезного действия.

Переходные процессы в энергосистемах, в системах электрообеспечения изучаются для правильного выбора элементов установок, их параметров и конструкций; правильность настройки релейной защиты, автоматических устройств также зависит от точного исследования и расчета переходных процессов.

Вообще в электрической установке режимы, связанные с переходными процессами, могут быть условно разделены на процессы, возникающие при нормальной эксплуатации (синхронизация, самосинхронизация генераторов, включение мощной нагрузки, включение трансформатора и т. д.), и процессы при аварийных режимах (короткие замыкания, сброс нагрузки, отключение защитой турбогенератора, трансформатора и т. д.), представляющие особую опасность в силу своей внезапности.

Переходный процесс в динамической электрической системе представляет собой совокупность взаимосвязанных явлений электромагнитного, электромеханического и механического характера. Например, включение генератора в сеть методом самосинхронизации сопровождается изменением электромагнитных полей машины, т. е. изменениями электрических параметров и величины электромагнитных моментов, действующих на вал машины, а также нарушением вращательного механического движения генератора вместе с его энергетическим двигателем.

Указанные изменения форм энергии проявляются в различной степени, что зависит от соотношения параметров в динамической системе и характера нарушения режима. Например, при пуске электродвигателя от генератора большой мощности явно выражены электромагнитный и электромеханический процессы в электродвигателе, в то время как в генераторе изменения параметров практически незаметно. Наоборот, пуск электродвигателя от генератора соизмеримой мощности характерен в первую очередь резким изменением напряжения генератора и скорости вращения (частоты) его энергетического двигателя.

Особенности протекания переходных процессов в реальных динамических системах позволяют исследовать их с преимущественным выделением основного процесса. Вот почему курс в высшей школе «Переходные процессы в электроэнергетических системах» состоит из двух частей: первая часть посвящена изучению электромагнитных переходных процессов [3], а вторая часть - изучению электромеханических процессов [6, 16].

В любой энергетической системе при известных постоянных параметрах переходный процесс определяется источником энергии. В электроустановках основным источником энергии является син-

хронный генератор. Синхронный компенсатор, синхронный электродвигатель, а также асинхронный электродвигатель, обладающие запасом электромагнитной и механической энергии, являются источниками энергии в системах электроснабжения.

Изучение переходных процессов, какую бы роль они не играли и в каком бы виде не проявлялись, представляет собой технически важную задачу, решение которой всегда связано с преодолением «математических трудностей», поскольку возникающие физические явления не всегда поддаются точному описанию.

Арсенал математических средств достаточен, чтобы произвести описание процесса хотя бы в первом приближении, но для того, чтобы правильно описать переходные процессы в математической форме, следует правильно представлять физическую картину происходящих явлений. Иными словами, при исследовании конкретного переходного процесса физические свойства элементов системы и их взаимное влияние должны быть настолько хорошо изучены, чтобы составляемая математическая форма правильно отражала изучаемую систему.

Составить интегрально-дифференциальные уравнения, правильно описывающие исследуемый переходный процесс, - это главная часть задачи. Не менее важная часть - решение этих уравнений. Здесь могут появиться непреодолимые трудности. Если изучаемый процесс описывается линейной системой дифференциальных уравнений, то решение практически не вызывает затруднений, но в случае появления нелинейных зависимостей задача становится непростой. Поэтому изучение переходных процессов начинают с простых динамических систем, поведение которых может быть описано линейными дифференциальными уравнениями. Такие системы называют линейными системами.

Линейная система, линейный элемент - понятия условные, ибо эти свойства не сохраняются в неограниченном интервале изменения координат. Например, электрическое сопротивление проводника сохраняется неизменным до наступления определенной величины тока.

До этого момента $r = \frac{U}{I} = \text{const}$, а затем проводник перегорает. Другой пример: пружина сохраняет жесткость неизменной до наступления определенной величины растягивающего усилия $c = \frac{F}{l} = \text{const}$, а затем приобретает остаточную деформацию – вытягивается.

Таким образом, в определенных пределах воздействия физические элементы могут сохранять свои свойства неизменными и поэтому могут называться линейными, ибо координаты движения у них линейно зависят от прилагаемых сил. Для указанных примеров эта линейность соответственно выражается формулами: $U = rI$, $F = cl$.

Динамическая линейная система всегда поддается анализу при помощи линейных дифференциальных уравнений. Решение последних находится простыми способами и допускает применение принципа наложения.

Математический анализ существенно нелинейных систем, т. е. таких систем, которые не могут быть представлены линейными уравнениями без искажения их важнейших характеристик, весьма затруднен. Например, процесс изменения тока катушки с ферромагнитным сердечником (обмотка трансформатора) не может быть описан линейным дифференциальным уравнением, так как потокосцепления такой катушки ψ не пропорциональны току, ибо коэффициент самоиндукции является функцией тока $L(i)$ в соответствии с кривой намагничивания сердечника $\psi = L(i)i$.

Изучение нелинейных систем более успешно выполняется экспериментальными, а не математическими методами. Однако, что очень важно, почти все физические системы, поддающиеся в настоящее время анализу, могут быть представлены в первом приближении линейными системами.

Таким образом, из вышеизложенного следует:

1. Многие реальные динамические системы характеризуются линейными свойствами и поэтому могут быть представлены в виде совокупности линейных элементов. Перераспределение электроэнергии между такими элементами (переходный процесс) описывается линейными интегрально-дифференциальными уравнениями.

2. В реальных динамических системах переходный процесс может отражать перераспределение либо электромагнитной, либо электромеханической, либо механической энергии. Поэтому может быть выделен основной процесс, который определяет поведение системы в данных конкретных условиях.

§ 1.2. Этапы исследования переходных процессов. Преобразование Лапласа

Решение конкретно поставленной задачи по переходным процессам динамической системы, в том числе в электрических цепях и в электромеханических конструкциях, состоит из трех этапов:

- 1) изучение физических свойств элементов системы;
- 2) составление интегрально-дифференциальных уравнений, отражающих в математической форме физические свойства элементов системы и их взаимосвязь;
- 3) решение интегрально-дифференциальных уравнений и анализ полученного результата.

Любая электрическая цепь состоит из активных и пассивных элементов. Активные элементы – это источники энергии; пассивные – элементы в цепи тока, такие, как сопротивления, катушки индуктивности, конденсаторы. На рис. 1.1 показана цепь, которая включается на источник напряжения. Свойства каждого элемента этой цепи при прохождении тока описываются математической зависимостью.

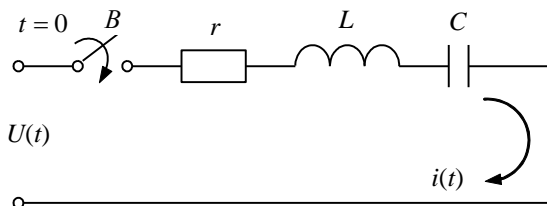


Рис. 1.1. Электрическая цепь с сосредоточенными параметрами r, L, C , включаемая на источник напряжения

Сопротивление r – элемент, в котором происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в тепловую. Для линейного элемента $r = \text{const}$. Падение напряжения на этом элементе при прохождении тока описывается формулой

$$U_r(t) = ri(t). \quad (1.1)$$

Индуктивность L – резервуар электромагнитной энергии, в котором она накапливается. Падение напряжения на этом элементе при прохождении тока равно

$$U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (1.2)$$

Емкость C – резервуар электрической энергии, в котором происходит накопление электрической энергии. При прохождении тока электрический заряд равен $\int_0^t i(t) dt$ и падение напряжения на обкладках конденсатора определяется зависимостью

$$U_C(t) = U_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt. \quad (1.3)$$

Необходимо помнить, что как идеальные элементы r , L , C , так и идеальные источники напряжения и тока – математические фикции. Например, в зависимости от частоты питающей сети влияние на общее сопротивление катушки имеют и L , и r , и C .

Чтобы узнать характер изменения тока в указанной электрической цепи, следует составить дифференциальное уравнение этой цепи. В данном случае это уравнение составляется при помощи известных законов Кирхгофа, а именно:

первый закон – для любого узла цепи

$$\sum i(t) = 0, \quad (1.4)$$

второй закон – для любого замкнутого контура

$$\sum U(t) = 0. \quad (1.5)$$

Составление дифференциальных уравнений переходных процессов зависит от подготовки исследователя. Главное при этом – знать физические свойства элементов схемы и конструкции исследуемой динамической системы, уметь правильно определить взаимосвязь между ними и описать ее математически.

Итак, если для цепи (см. рис. 1.1) необходимо установить характер изменения тока при включении выключателя В, то необходимо знать:

- 1) параметры этой цепи r , L , C ;
- 2) закон изменения во времени напряжения источника питания $U(t)$ (может быть $U(t) = U = \text{const}$ или $U(t) = U_m \sin \omega t$ и т. д.);
- 3) начальное значение запаса энергии $i(0)$, $U_C(0)$, т. е. начальное значение тока и напряжения в этой цепи соответственно в катушке индуктивности и на обкладках конденсатора в момент включения выключателя В.

Интегрально-дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс в этой цепи от момента $t = 0$ (от момента включения выключателя), в соответствии со вторым законом Кирхгофа (1.5), на

основании физических свойств элементов цепи (1.1-1.3) и начальных условий будет иметь вид

$$U_r(t) + U_L(t) + U_C(t) = U(t), \quad (1.6)$$

т. е.

$$ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = U(t). \quad (1.7)$$

Решение этого уравнения может быть осуществлено двумя способами: классическим, при помощи которого интегрируют уравнение, и операторным, при помощи которого производят функциональное преобразование уравнения.

Наиболее просто линейные дифференциальные уравнения решаются операторным методом. Существует три операторных метода: Коши-Хевисайда, Фурье, Карсона и Лапласа.

Наиболее удобным, строгим и перспективным методом для дальнейшего развития является метод Лапласа, который и будет здесь применяться*.

Преобразование Лапласа

Метод преобразования Лапласа применяется для упрощения решения линейных интегрально-дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Прямое преобразование заданного уравнения приводит к более простому уравнению - алгебраическому. Последнее уравнение решается относительно некоторой промежуточной функции, а затем, после обратного преобразования Лапласа, находится искомое решение. На практике прямые и обратные преобразования выполняются при помощи таблиц.

Прямое преобразование Лапласа функции $f(t)$ записывается так

$$\int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt = F(s). \quad (1.8)$$

При помощи этого уравнения оригинал-функция $f(t)$, выражающая совокупность интегрально-дифференциальных зависимостей [(см. например, уравнение (1.7)], преобразуется в алгебраическую функцию $F(s)$ -изображение.

Обратное преобразование Лапласа записывается в виде уравнения

* Laplace P.S. Theorie analytique des probabilités. Bd.1.2. Paris, 1820.

$$\frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s) e^{st} ds (=) f(t), t \geq 0. \quad (1.9)$$

Сокращенная запись прямого (1.8) и обратного (1.9) преобразования Лапласа (\mathcal{L} -преобразования) представляется, соответственно, так

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s), \quad \mathcal{L}^{-1}[F(s)] (=) f(t). \quad (1.9, a)$$

Прямое преобразование является однозначной, а обратное - многозначной операцией, поэтому в уравнении обратного преобразования стоит знак ограниченного равенства (=). Две функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ могут совпадать там, где обе они непрерывны, и не совпадать в точках разрыва непрерывности. Изображения $F(s)$ таких двух функций будут равны между собой, но оригинал изображения, т. е. $\mathcal{L}^{-1}[F(s)]$ может соответствовать как функции $f_1(t)$, так и функции $f_2(t)$. Такая возможность указывается знаком (=).

\mathcal{L} -преобразование применяется в теории переходных процессов для преобразования функций вещественной переменной в функции комплексной переменной, а также для преобразования операций дифференцирования и интегрирования в вещественной области в более простые операции, выполняемые в комплексной области. Строго говоря, в преобразовании Лапласа интеграл должен определяться с помощью предельной операции, т. е.

$$\int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f(t) e^{-st} dt.$$

Однако в практических задачах этот переход к пределу не выполняется в явном виде. Примеры прямого \mathcal{L} -преобразования функций приведены ниже.

Постоянная величина. Единица

Такая величина рассматривается как функция $f(t)$, равная постоянному числу 1 при всех конечных значениях t . По формуле прямого \mathcal{L} -преобразования (1.8) получают

$$\int_0^{\infty} 1 \cdot e^{-st} dt = \frac{1}{-s} e^{-st} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{s} (e^{-s \cdot 0} - e^{-s \cdot \infty}) dt = \frac{1}{s},$$

т. е. $\mathcal{L}[1] = \frac{1}{s}.$

Показательная функция

Изображение функции $f(t) = e^{-\alpha t}$ на основании формулы (1.8) имеет вид

$$\int_0^{\infty} e^{-\alpha t} e^{-st} dt = \int_0^{\infty} e^{-(s+\alpha)t} dt = \frac{1}{s+\alpha} [e^{-(s+\alpha)0} - e^{-(s+\alpha)\infty}] = \frac{1}{s+\alpha}.$$

Синусоидальная функция

Изображение функции $f(t) = \sin \omega t$ находится также по (1.8), но $\sin \omega t$ представляется по формуле Эйлера

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[\sin \omega t] &= \int_0^{\infty} \sin \omega t e^{-st} dt = \int_0^{\infty} \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} e^{-st} dt = \\ &= \frac{1}{2j} \int_0^{\infty} [e^{-(s-j\omega)t} - e^{-(s+j\omega)t}] dt = \frac{1}{2j} \left[\frac{1}{s-j\omega} - \frac{1}{s+j\omega} \right] = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}. \end{aligned}$$

Подобным образом находится изображение косинусоидальной функции

$$\mathcal{F}[\cos \omega t] = \frac{s}{s^2 + \omega^2}.$$

Экспоненциальная зависимость

Изображение функции вида $f(t) = (1 - e^{-\alpha t})$ определяется с учетом предыдущих преобразований

$$\mathcal{F}[(1 - e^{-\alpha t})] = \int_0^{\infty} 1 \cdot e^{-st} dt - \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} e^{-st} dt = \frac{1}{s} - \frac{1}{s+\alpha} = \frac{\alpha}{s(s+\alpha)}.$$

Результаты четырех вышеуказанных преобразований могут быть сведены в табл. 1.1. В подобную таблицу заносятся изображения всех функций, встречающихся при расчете переходных процессов динамических систем. Такие таблицы помещены в [17], [18].

Оригиналы и изображения функций, преобразованных по Лапласу

$f(t)$	$F(s)$
1	$\frac{1}{s}$
$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{s + \alpha}$
$1 - e^{-\alpha t}$	$\frac{\alpha}{s(s + \alpha)}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$Ae^{-\alpha t} + B \sin(\omega t + \psi)$ $A = \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2}$ $B = \frac{1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}$ $\psi = -\arg \operatorname{tg} \frac{\omega}{\alpha}$	$\frac{1}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)}$
$Ae^{-\alpha t} + B \sin(\omega t + \psi)$ $A = \frac{a_0 - \alpha}{\alpha^2 + \omega^2}$ $B = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{a_0^2 + \omega^2}{\alpha^2 + \omega^2}}$ $\psi = \arg \operatorname{tg} \frac{\omega}{a_0} - \arg \operatorname{tg} \frac{\omega}{\alpha}$	$\frac{s + a_0}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)}$
$\frac{1}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t$ $\alpha = \frac{b_1}{2}; \beta = \sqrt{b_0 - \left(\frac{b_1}{2}\right)^2}$	$\frac{1}{s^2 + b_1 s + b_0}$

$f(t)$	$F(s)$
$1(t-a)$	$\frac{1}{s}e^{-as}$
$(t-a)1(t-a)$	$\frac{1}{s^2}e^{-as}$
Ступенчатые функции	
$f(q)$	$F(s)$
Импульс $p(q) = 1(q) - 1(q-1)$	$p(s)$
Функция $\int U(q)$	$U(s)$
Смещение на единицу $\int U(q+1)$	$e^s[U(s) - U(0)p(s)]$
1	$\frac{e^s p(s)}{e^s - 1}$
$\int a^q$	$\frac{e^s p(s)}{e^s - a}$
$\int \frac{a^q - 1}{a - 1}$	$\frac{e^s p(s)}{(e^s - 1)(e^s - a)}$

На практике, как будет видно ниже, таблицей оригиналов и изображений чаще всего пользуются в обратном порядке, т. е. по изображению функции отыскивают ее оригинал. В справочной литературе такие таблицы составлены с учетом этого обстоятельства.

Теоремы \mathcal{L} -преобразования

Теорема 1. Линейность прямого и обратного преобразования Лапласа

1. Если функция $f(t)$ преобразуема по Лапласу и a - постоянная или переменная величина, не зависящая от t или s , то имеет место равенство

$$\mathcal{L}[af(t)] = a \mathcal{L}[f(t)] = aF(s). \quad (1.10)$$

И, наоборот, если $F(s)$ является изображением функции $f(t)$ и a - постоянная или переменная величина, не зависящая от s или t , то справедливо выражение

$$\mathcal{L}^{-1}[aF(s)] (=) af(t). \quad (1.10, a)$$

2. Если функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$ преобразуемы по Лапласу и изображаются соответственно как $F_1(s)$ и $F_2(s)$, то имеет место равенство

$$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s). \quad (1.11)$$

И, наоборот, если $F_1(s)$, $F_2(s)$ являются изображениями функций $f_1(t)$ и $f_2(t)$, то справедливо выражение

$$\mathcal{L}^{-1}[F_1(s) \pm F_2(s)] (=) f_1(t) \pm f_2(t). \quad (1.11, a)$$

Теорема 2. Дифференцирование в области вещественной переменной

Если функция $f(t)$ и ее производная $\frac{d}{dt}f(t)$ преобразуемы по Лапласу и $f(t)$ имеет своим изображением $F(s)$, то

$$\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0). \quad (1.12)$$

Подобным образом, если высшие производные функции $f(t)$ допускают преобразование Лапласа, то справедливы выражения

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[f''(t)] &= s^2F(s) - f(0)s - f'(0); \\ \mathcal{L}[f'''(t)] &= s^3F(s) - f(0)s^2 - f'(0)s - f''(0). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Теорема 3. Интегрирование в области вещественной переменной

Если функция $f(t)$ преобразуема по Лапласу и имеет своим изображением $F(s)$, то ее интеграл

$$\int f(t) dt = \int_0^t f(t) dt + f^{(-1)}(0)$$

также преобразуем по Лапласу

$$\mathfrak{L} \left[\int f(t) dt \right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{f^{(-1)}(0)}{s}. \quad (1.14)$$

Преобразование интегралов высших порядков записывается так

$$\mathfrak{L} \left[\int f^{(-2)}(t) \right] = \frac{F(s)}{s^2} + \frac{f^{(-1)}(0)}{s^2} + \frac{f^{(-2)}(0)}{s}. \quad (1.15)$$

Теперь можно решить задачу о переходном процессе в цепи (см. рис. 1.1). Представляет интерес случай включения этой цепи на постоянное напряжение $U(t) = U = \text{const}$. Дифференциальное уравнение переходного процесса запишется подобно уравнению (1.7)

$$ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = U. \quad (1.16)$$

Прямое преобразование Лапласа каждого члена этого уравнения на основании теоремы 1 (формула 1.11) дает:
по формуле (1.10)

$$\mathfrak{L} [ri(t)] = r \mathfrak{L} [i(t)] = rI(s);$$

по формуле (1.10) и (1.12)

$$\mathfrak{L} \left[L \frac{di(t)}{dt} \right] = L \mathfrak{L} \left[\frac{di(t)}{dt} \right] = L[sI(s) - i(0)];$$

по формуле (1.10) и (1.14)

$$\mathfrak{L} \left[\frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \right] = \frac{1}{C} \mathfrak{L} \left[\int_0^t i(t) dt \right] = \frac{1}{C} \left[\frac{I(s)}{s} + \frac{q(0)}{s} \right];$$

по формуле (см. табл. 1.1) для постоянной величины U

$$\mathfrak{L} [U] = \frac{U}{s}.$$

Таким образом, дифференциальное уравнение (1.16), преобразованное по Лапласу, примет вид

$$rI(s) + L[sI(s) - i(0)] + \frac{1}{C} \left[\frac{I(s)}{s} + \frac{q(0)}{s} \right] = \frac{U}{s}. \quad (1.17)$$

Это алгебраическое уравнение, которое должно быть решено относительно изображения тока $I(s)$. Но прежде следует установить значения начальных условий: примем, что до включения выключателя ток в цепи (см. рис. 1.1) отсутствовал, а на обкладках конденсатора заряда не было. Тогда в уравнении (1.17) значения $i(0)$ и $q(0)$ равны нулю.

Решая это уравнение относительно изображения тока, предварительно обозначим

$$b_1 = \frac{r}{L}, \quad b_0 = \frac{1}{LC}, \quad (1.18)$$

тогда

$$I(s) = \frac{U}{L} \frac{1}{s^2 + b_1 s + b_0}. \quad (1.19)$$

Остается выполнить обратное преобразование по формуле (1.9, а), т. е. получить оригинал $i(t)$ - искомую функцию

$$i(t) = \mathcal{E}^{-1} [I(s)].$$

Это преобразование выполняется либо при помощи таблиц обратного преобразования Лапласа [17] и [18], либо, если таблиц недостаточно, при помощи теорем обратного \mathcal{E} -преобразования. Из табл. 1.1 следует

$$i(t) = \frac{U}{\beta L} e^{-\alpha t} \sin \beta t. \quad (1.20)$$

После подстановки параметров цепи r, L, C значения α, β примут следующий вид: $\alpha = \frac{r}{2L}$ - декремент затухания переходного процесса,

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} - \text{угловая частота затухания колебаний.}$$

График изменения тока в цепи – график переходного процесса – строится по формуле (1.20), из которой видно, что изменение тока в рассматриваемой цепи представляет собой затухание по экспоненциальному закону ($e^{-\alpha t}$) колебаний ($\sin \beta t$) с периодом $T_\beta = \frac{2\pi}{\beta}$. Поэтому

на графике (рис.1.2) сначала строятся огибающие затухающих колебаний $\pm \frac{U}{\beta L} e^{-\alpha t}$, а затем синусоидальные колебания с периодом T_{β} .

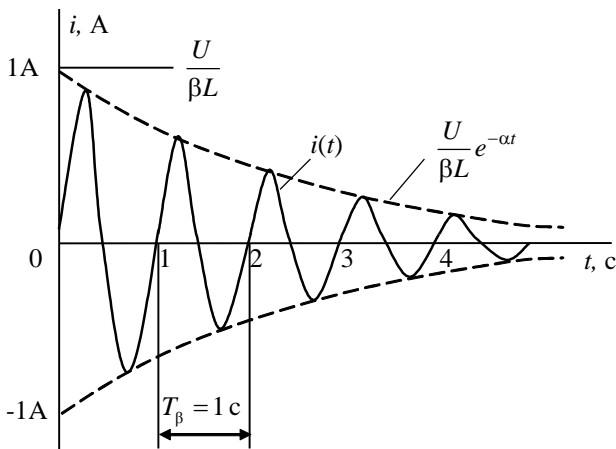


Рис. 1.2. График переходного процесса – изменение тока – в цепи с последовательным соединением элементов $r = 1$ Ом, $L = 1$ Гн, $C = 0,025$ Ф при включении на постоянное напряжение $U = 6,28$ В

Глава 2 Переходный процесс в трехфазной цепи при коротком замыкании

§ 2.1. Составление дифференциального уравнения переходного процесса

В этой главе рассматривается переходный процесс в цепи переменного тока при симметричном коротком замыкании с источником ЭДС постоянной амплитуды и частоты. В качестве такого источника можно принять синхронный генератор, включенный на шины (рис. 2.1) при следующих условиях:

1) амплитуда синусоидальной ЭДС и скорость вращения генератора постоянны в течение всего переходного процесса, т. е. $E = \text{const}$, $\omega_c = \text{const}$;

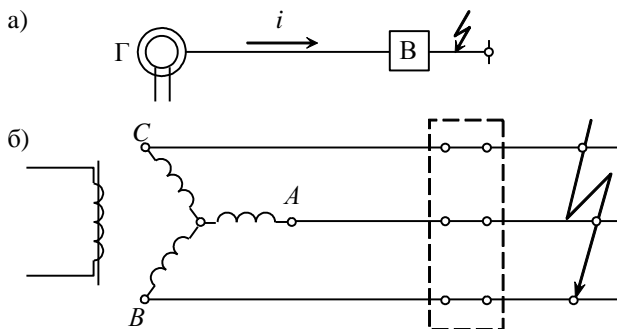


Рис.2.1. Цепь синхронного генератора:
а – однолинейная схема; б – трехфазная схема

2) индуктивность генератора L – величина постоянная, принимаемая для ненасыщенного железа статора генератора.

Синхронный генератор при этих условиях может быть представлен трехфазной схемой замещения с сосредоточенными постоянными, как показано на рис. 2.2. На схеме индексы у параметров фаз A , B , C заменены для удобства дальнейшего рассмотрения на цифровые индексы 1, 2, 3.

Короткое замыкание в этой цепи может произойти, как показано на рис. 2.3, в любой момент времени, т. е. либо в момент прохождения синусоидальной ЭДС через ноль, либо через максимальное значение, либо, наконец, в промежутке между этими значениями. Этот момент короткого замыкания в каждой фазе может быть зафиксирован величиной угла γ . Например, для фазы A $e_1(t) = E_{m1} \sin(\omega t + \gamma)$.

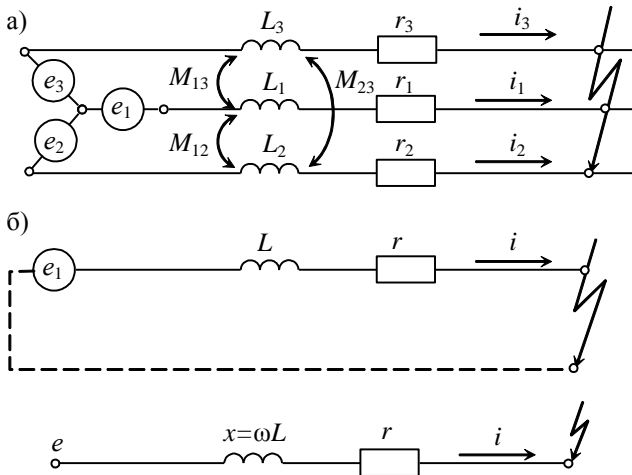


Рис.2.2. Схема замещения синхронного генератора:
а - трех фаз; б - одной фазы

Действительно, при $\gamma = 0$ в момент к.з. ($t = 0$), что соответствует прохождению ЭДС через ноль,

$$e_1(0) = E_{m1} \sin(\omega 0 + 0) = 0,$$

при $\gamma = \frac{\pi}{2}$ ЭДС в момент к.з. имеет амплитудное значение

$$e_1(0) = E_{m1} \sin(\omega 0 + \frac{\pi}{2}) = E_{m1}.$$

Дифференциальное уравнение относительно тока в этой схеме (см. рис. 2.2) для каждого контура составляется на основе свойств элементов цепи (1.1, 1.2) и второго закона Кирхгофа (1.5). Так, для фазы *A* записывается сумма падений напряжения от тока i_1 в фазе $L_1 \frac{di_1}{dt}$ и $r_1 i_1$, а также от токов других фаз: $M_{12} \frac{di_2}{dt}$, $M_{13} \frac{di_3}{dt}$, уравновешенных величиной ЭДС $e_1(t)$, т. е.

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \gamma).$$

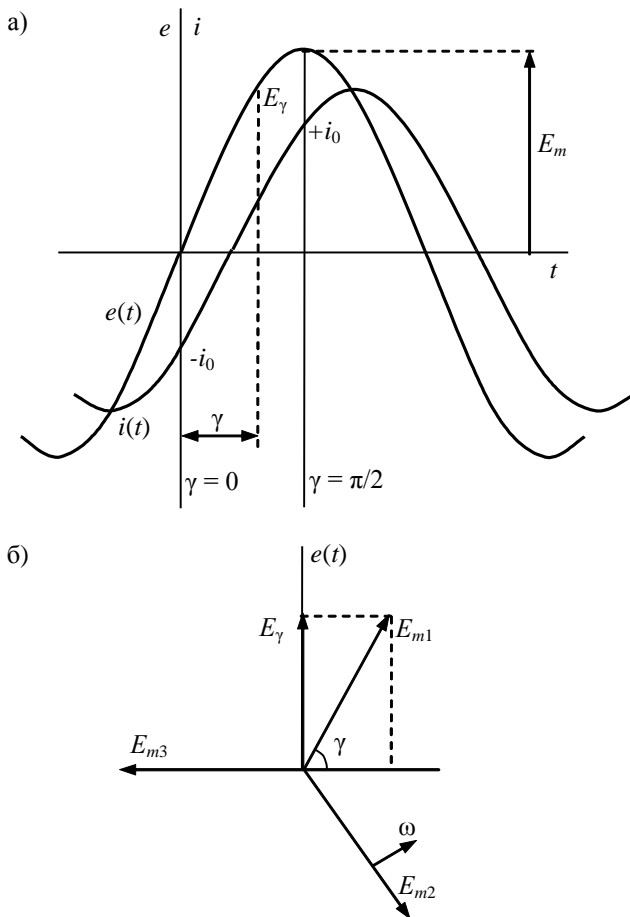


Рис. 2.3. Величина ЭДС для различных моментов возникновения короткого замыкания:
 а – график ЭДС первой фазы – фазы А; б – векторная диаграмма ЭДС трех фаз

Подобным образом записываются уравнения для двух других фаз, в которых действуют синусоидальные ЭДС.

Система дифференциальных уравнений всех фаз с момента к.з. имеет вид

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} &= E_{m1} \sin(\omega t + \gamma); \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + r_2 i_2 + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} &= E_{m2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \gamma); \\ L_3 \frac{di_3}{dt} + r_3 i_3 + M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} &= E_{m3} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \gamma). \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

В синхронном генераторе обмотки фаз статора идентичны и поэтому

$$L_1 = L_2 = L_3, \quad r_1 = r_2 = r_3, \quad M_{12} = M_{21}, \quad M_{13} = M_{31}, \quad M_{23} = M_{32}, \\ M_{12} = M_{13} = M_{23} = M.$$

Тогда переходный процесс в любой фазе, например в фазе A , может быть представлен уравнением

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 + M \left(\frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} \right) = E_{m1} \sin(\omega t + \gamma).$$

Поскольку рассматриваемая трехфазная система симметрична, т. е. для нее справедливо $i_1 + i_2 + i_3 = 0$, то для этой фазы дифференциальное уравнение переходного процесса примет вид

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 - M \frac{di_1}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \gamma).$$

Обозначив $L = L_1 - M$ и опустив индексы фазы A , имеем

$$L \frac{di}{dt} + ri = E_m \sin(\omega t + \gamma). \quad (2.2)$$

Таким образом, переходный процесс в любой фазе генератора (см. рис. 2.2, б) с учетом момента возникновения симметричного короткого замыкания может быть описан этим дифференциальным уравнением.

§ 2.2. Решение уравнения переходного процесса. Оценка начальных условий

Для получения ответа на поставленный вопрос о том, как изменяется ток в рассматриваемой цепи при коротком замыкании, следует решить уравнение (2.2) относительно тока фазы статора.

Прямое преобразование Лапласа этого уравнения дает

$$L[sI(s) - i(0)] + rI(s) = E_m \left(\cos \gamma \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} + \sin \gamma \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right). \quad (2.3)$$

Здесь $i(0)$ - начальное значение тока фазы статора в момент короткого замыкания. Если до к.з. генератор имел нагрузку, то ее величина, выражаемая через ток статора в момент к.з., должна быть равна $i(0) = \pm i_0$.

Знак перед током i_0 зависит от момента возникновения к.з., от вида нагрузки и будет уточнен ниже при рассмотрении конкретных условий короткого замыкания.

Разделив левую и правую части равенства (2.3) на L и введя условные обозначения:

$$\alpha = \frac{r}{L}, \quad a_1 = \frac{E_m \sin \gamma}{L}, \quad a_2 = \frac{E_m \omega \cos \gamma}{L}, \quad (2.4)$$

из равенства (2.3) можно получить следующую зависимость

$$I(s) = \frac{\pm i_0}{s + \alpha} + \frac{a_1 s + a_2}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)}, \quad (2.5)$$

что является изображением тока фазы цепи при коротком замыкании. Оригинал функции $I(s)$ отыскивается при помощи обратного преобразования Лапласа либо по теоремам обратного преобразования рациональных алгебраических дробей, либо по таблицам соответствия преобразования подобных табл. 1.1. Видно, что обратное преобразование первого члена зависимости (2.5) соответствует простой экспоненциальной функции; обратное преобразование второго члена облегчается,

если ввести обозначение $a_0 = \frac{a_2}{a_1}$. Тогда оригинал выражения (2.5) по

табл.1.1 будет иметь вид

$$i(t) = \pm i_0 e^{-\alpha t} + A_0 e^{-\alpha t} + B_0 \sin(\omega t + \psi), \quad (2.6)$$

где

$$A_0 = a_1 \frac{a_0 - \alpha}{\alpha^2 + \omega^2}, \quad B_0 = \frac{a_1}{\omega} \sqrt{\frac{a_0^2 + \omega^2}{\alpha^2 + \omega^2}}, \quad \psi = \arctg \frac{\omega}{a_0} - \arctg \frac{\omega}{\alpha}.$$

Подставив в эти формулы значения условных обозначений (2.4), получим

$$A_0 = \frac{a_2 - a_1 \alpha}{\alpha^2 + \omega^2} = E_m \frac{\omega L \cos \gamma - r \sin \gamma}{r^2 + \omega^2 L^2} = I_m \frac{\omega L \cos \gamma - r \sin \gamma}{z};$$

$$B_0 = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{a_2^2 + a_1^2 \omega^2}{\alpha^2 + \omega^2}} = \frac{E_m \omega}{\omega} \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma}{r^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{E_m}{z} = I_m;$$

$$\psi = \arctg \frac{\omega a_1}{a_2} - \arctg \frac{\omega}{\alpha} = \arctg \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} - \arctg \frac{\omega L}{r} = \gamma - \arctg \frac{x}{r}.$$

Следовательно, формула (2.6) после подстановки полученных соотношений запишется так

$$i(t) = \left(\pm i_0 + \frac{x \cos \gamma - r \sin \gamma}{z} I_m \right) e^{-\frac{t}{T_a}} + I_m \sin \left(\omega t + \gamma - \arctg \frac{x}{r} \right), \quad (2.7)$$

где I_m – амплитуда тока короткого замыкания,

$$I_m = \frac{E_m}{z} = \frac{E_m}{\sqrt{r^2 + x^2}}; \quad (2.8)$$

T_a – постоянная времени цепи при коротком замыкании,

$$T_a = \frac{1}{\alpha} = \frac{L}{r}. \quad (2.9)$$

В рассматриваемой цепи соотношение индуктивного и активного сопротивлений таково, что следует считать $x \gg r$ или $r = 0$ по сравнению с x .

При этом условии зависимость (2.7) примет вид

$$i(t) = (\pm i_0 + I_m \cos \gamma) e^{-\frac{t}{T_a}} + I_m \sin \left(\omega t + \gamma - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.10)$$

Эта формула отражает изменение тока короткого замыкания в фазе статора синхронного генератора при условии постоянства ЭДС по амплитуде и частоте и при малом значении активного сопротивления по сравнению с индуктивным.

§ 2.3. Анализ решения и построение графика переходного процесса

Как указывалось выше, короткое замыкание в рассматриваемой цепи может наступить и в момент прохождения ЭДС через ноль ($e = 0$), и в момент прохождения ЭДС через амплитудное значение ($e = E_m$). Рассмотрим эти два случая.

Короткое замыкание в момент прохождения ЭДС через ноль
($e = 0$, т. е. $\gamma = 0$)

Если генератор имел индуктивную нагрузку, то в момент к.з., как следует из рис. 2.3, а, начальное значение тока соответствовало величине $-i_0$. Тогда из формулы (2.10) для $\gamma = 0$ следует

$$i(t) = (-i_0 + I_m) e^{-\frac{t}{T_a}} + I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.11)$$

Очевидно, что в этом случае полный ток короткого замыкания $i(t)$ состоит из аperiodической составляющей

$$i_a(t) = (I_m - i_0) e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (2.12)$$

и из периодической составляющей

$$i_n(t) = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.13)$$

т. е.

$$i(t) = i_a(t) + i_n(t). \quad (2.14)$$

Из формулы (2.11) следует, что для момента возникновения к.з. при $t = 0$

$$i(0) = (-i_0 + I_m) \cdot 1 - I_m \cdot 1 = -i_0,$$

что соответствует начальным условиям.

Для установившегося режима короткого замыкания после затухания переходного процесса, т. е. для $t = \infty$

$$i(\infty) = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Таким образом, аperiodическая составляющая затухает, а периодическая представляет собой установившийся ток короткого замыкания.

Графики изменения обеих составляющих тока к.з. и полного тока к.з. строятся по зависимостям (2.12), (2.13) и (2.14), причем, согласно последней формуле, ординаты графиков составляющих суммируются с учетом знака для каждого момента времени.

Графики процесса построены на рис. 2.4, а, из которых видно, что через половину периода (через 0,01 с) при частоте 50 Гц полный ток к.з., вследствие сложения аperiodической и периодической составляющих, достигает своего максимального значения i_y , называемого ударным током короткого замыкания.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока к.з., вычисляемое по формуле (2.8), называется начальным сверхпереходным током и обозначается следующим образом:

$$I'' = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

При отсутствии тока i_0 начальное значение аperiodической составляющей тока, как видно из рис. 2.4, будет совпадать с начальным сверхпереходным током.

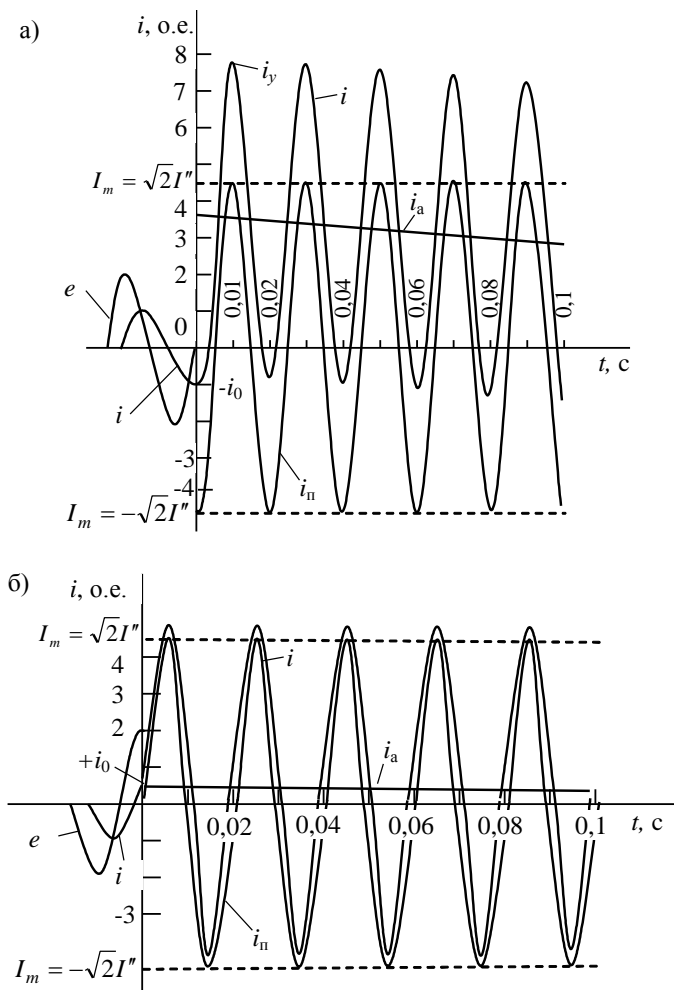


Рис. 2.4. Графики изменения полного тока короткого замыкания и его составляющих:

а – для короткого замыкания в момент прохождения ЭДС через нулевое значение ($\gamma = 0$); б – для короткого замыкания в момент

прохождения ЭДС через амплитудное значение ($\gamma = \frac{\pi}{2}$)

Короткое замыкание в момент прохождения ЭДС
через амплитудное значение ($e = E_m$, т. е. $\gamma = \frac{\pi}{2}$)

В этом случае, подставляя в формулу (2.10) значение $\gamma = \frac{\pi}{2}$, а также учитывая, что для индуктивной нагрузки $i(0) = +i_0$ (см. рис. 2.3, а), имеем

$$i(t) = +i_0 e^{-\frac{t}{T_a}} + I_m \sin \omega t, \quad (2.15)$$

причем, значение I_m рассчитывается по формуле (2.8).

График изменения тока короткого замыкания показан на рис. 2.4, б. Видно, что при отсутствии начального тока ($i_0 = 0$) в цепи сразу устанавливается ток $I_m = \sqrt{2}I''$.

Сравнивая графики а и б (см. рис. 2.4), видим, что наибольший ток короткого замыкания, ударный ток, достигающий примерно двойного значения тока $\sqrt{2}I''$, имеет место при $\gamma = 0$. Этот случай и принимается в расчетах токов короткого замыкания для выбора и проверки элементов цепей на электродинамическую и термическую стойкость к токам короткого замыкания.

§ 2.4. Характерные величины переходного процесса. Расчетные условия

Рассмотренный переходный процесс при коротком замыкании в трехфазной цепи с постоянным значением амплитуды и частоты синусоидальной ЭДС принципиально отражает начальную фазу подобного процесса в реальном синхронном генераторе, так как ЭДС E'' последнего, как будет видно ниже, в начальный момент к.з. остается постоянной. Однако с течением времени эта ЭДС E'' , называемая ЭДС за сверхпереходным индуктивным сопротивлением, уменьшается, а вследствие этого уменьшается и периодическая составляющая тока к.з. В этом случае затухает не только аperiodическая составляющая тока к.з., но и периодическая. График их изменения показан на рис. 2.5. Здесь, так же, как и на рис. 2.4, а, отмечены начальный сверхпереходный ток к.з. $\sqrt{2}I''$, ударное значение тока к.з. i_y и, кроме того, установившееся значение тока к.з. $\sqrt{2}I_\infty$, соответствующее новому установившемуся режиму (режиму установившегося короткого замыкания) после окончания переходного процесса.

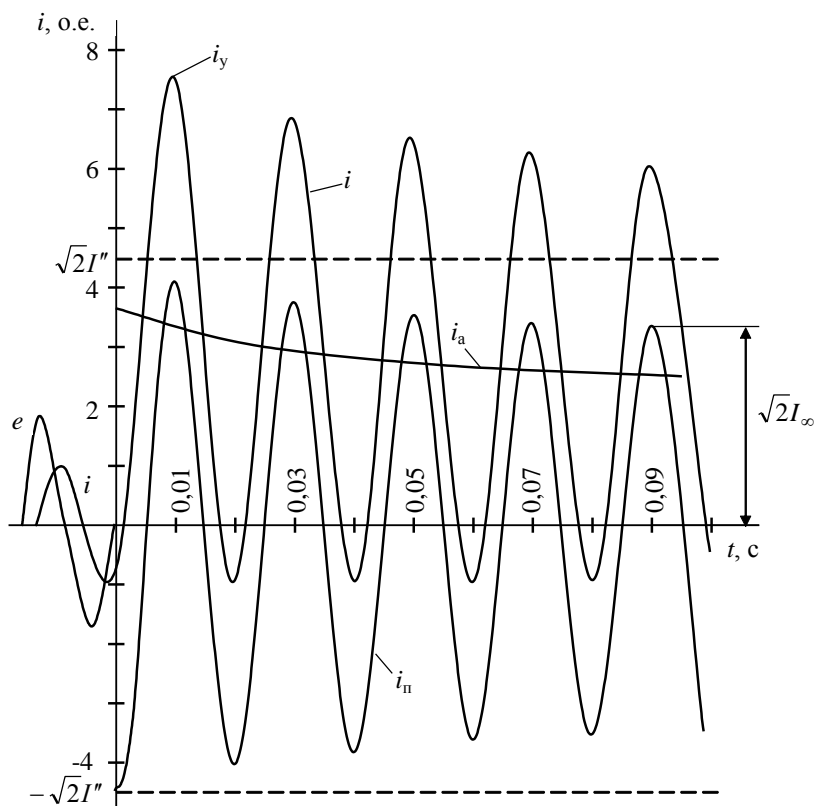


Рис. 2.5. Графики изменения полного тока короткого замыкания и его составляющих в синхронном генераторе

Ударный ток короткого замыкания, как следует из графиков рис. 2.4, а и 2.5, соответствует максимальному мгновенному значению полного тока короткого замыкания.

Его величина определяется по формуле (2.11) для момента времени $t = 0.01$ с при условии $i_0 = 0$

$$i_y = I_m e^{-\frac{0,01}{T_a}} + I_m = \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) I_m;$$

величина в скобках называется ударным коэффициентом

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}. \quad (2.16)$$

Таким образом, формулу для ударного тока можно записать так

$$i_y = \sqrt{2} k_y I''. \quad (2.17)$$

Ударный коэффициент вычисляется либо по формуле (2.16), либо по графикам зависимостей $k_y(T_a)$, $k_y\left(\frac{x_k}{r_k}\right)$ (см. рис. 4.10).

Начальный сверхпереходный ток I'' вычисляется по формуле (2.8), по известной величине ЭДС генератора $E_m = \sqrt{2}E''$ и по значению сопротивления цепи между точкой приложения ЭДС и точкой к.з.

$$I'' = \frac{E''}{x_d'' + \Delta x}, \quad (2.18)$$

где x_d'' - сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси; Δx - дополнительное сопротивление цепи от зажимов генератора до точки короткого замыкания.

Величина ЭДС синхронного генератора E'' - сверхпереходная ЭДС или ЭДС за сверхпереходным индуктивным сопротивлением в продольной оси x_d'' - определяется из векторной диаграммы синхронной машины, как показано в § 13.2.

Значения ударного коэффициента лежат в пределах $1 \leq k_y \leq 2$. При исчезающей малой индуктивности цепи постоянная времени T_a близка к нулю и поэтому из формулы (2.16) следует, что $k_y = 1$; при весьма большом значении индуктивности цепи T_a стремится к бесконечной величине и тогда $k_y = 2$.

В установках высокого напряжения постоянная T_a имеет небольшое значение и аperiodическая составляющая затухает через 0,1-0,3 с; в установках низкого напряжения влияние аperiodической составляющей практически незаметно.

Ударный ток короткого замыкания является максимальным током, по величине которого проверяются элементы схем электроснабжения на электродинамическую стойкость току короткого замыкания.

Для проверки элементов схем электроснабжения на термическую стойкость току короткого замыкания и для проверки выключателей по отключающей способности необходимо знать действующее значение тока короткого замыкания. Для сложной зависимости тока к.з.,

определяемой формулой (2.10), его действующее значение за период рассчитывается по формуле для несинусоидальных токов

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i^2(t) dt}.$$

Поскольку зависимость $i(t)$ сложная (особенно в случае затухания периодической составляющей) и вычисление по этой формуле трудоемко, для облегчения расчетов принимается, что в течение рассматриваемого периода тока T его составляющие не изменяются.

Для заданного момента времени t , который находится в середине периода T , по кривой, огибающей периодическую составляющую, определяется величина I_{nm} , как показано на рис. 2.6, и тогда действующее значение

$$I_{\Pi} = \frac{I_{nm}}{\sqrt{2}}. \quad (2.19)$$

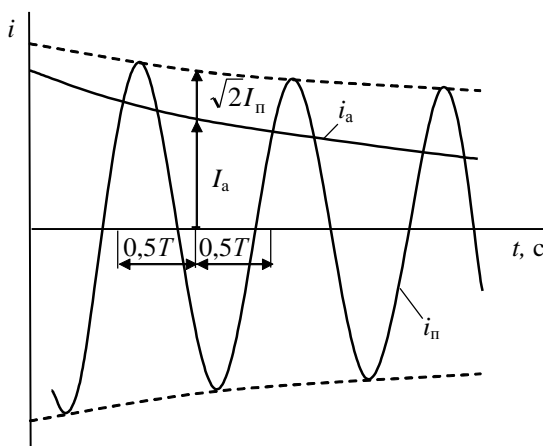


Рис. 2.6. Определение действующих значений периодической и аperiodической составляющих тока короткого замыкания

В этот же момент времени мгновенное значение тока аperiodической составляющей считается равным действующему значению I_a за данный период времени T .

Действующее значение полного тока в момент t за период T определяется по формуле

$$I_t = \sqrt{I_{пр}^2 + I_{ар}^2} . \quad (2.20)$$

Изменение периодической и аperiodической составляющих тока короткого замыкания может быть представлено в другом виде, удобном для оценки коммутационных характеристик выключателей. На рис. 2.7 представлены такие графики [19].

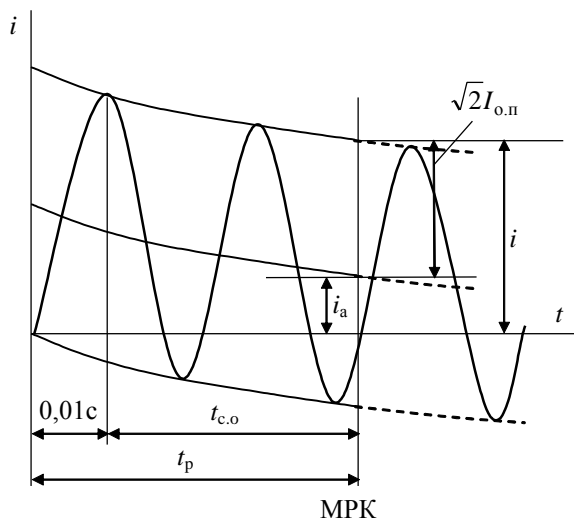


Рис. 2.7. Графики изменения составляющих тока короткого замыкания:

МРК – момент расхождения контактов выключателя; $\sqrt{2}I_{0.п}$ - амплитудное значение периодической составляющей тока короткого замыкания на момент времени МРК – момент отключения; i_a - значение аperiodической составляющей тока к.з.; i - мгновенное значение полного тока к.з.; $t_{c.o}$ - собственное время отключения выключателя с приводом; $t = 0,01$ - время, принимаемое примерно равным времени срабатывания релейной защиты; t_p - время от начала к.з. до момента размыкания контактов выключателя

Погрешность расчета периодической составляющей тока короткого замыкания без учета активного сопротивления цепи

При решении задачи принималось, что активное сопротивление r в цепи значительно меньше реактивного и принималось равным нулю. Необходимо оценить ошибку от этого допущения.

Амплитуда периодической составляющей тока к.з. с учетом полного сопротивления цепи находится следующим образом:

$$I_{\text{пмз}} = \frac{E_m}{z} = \frac{E_m}{\sqrt{x^2 + r^2}} = \frac{E_m}{\sqrt{x^2 + (cx)^2}} = \frac{E_m}{x\sqrt{1 + c^2}} = \frac{I_{\text{пм}}}{\sqrt{1 + c^2}},$$

где $I_{\text{пм}}$ - амплитуда тока к.з. без учета активного сопротивления цепи;

$c = \frac{r}{x}$ - отношение активного и реактивного сопротивлений цепи.

Если считать, что допустимая погрешность в расчете тока к.з. без учета активного сопротивления не превышает 5 %, то $\frac{I_{\text{пм}}}{I_{\text{пмз}}} \leq 1,05$

и, следовательно, $\sqrt{1 + c^2} \leq 1,05$, или $c \leq 0,32$. Отсюда вытекает соотношение

$$r \leq \frac{1}{3}x. \quad (2.21)$$

Таким образом, если активное сопротивление цепи короткого замыкания меньше 30 % величины реактивного сопротивления, пренебрежение активным сопротивлением допустимо. Однако следует помнить, что пренебрежение допустимо относительно $x = \omega L$, но не относительно L . В противном случае, как следует из формулы (2.10), искажается аperiodическая составляющая тока к.з. и, следовательно, искажается ударный ток к.з., действующее значение полного тока и т. д.

Расчет тока короткого замыкания в разветвленной цепи

Расчет начального значения периодической составляющей тока к.з. в такой цепи трудностей не вызывает: достаточно определить результирующее сопротивление от каждого источника ЭДС до точки к.з. и по формуле (2.18) определить сверхпереходное значение тока

$$I'' = \frac{E''}{z''_{\text{рез}}}. \quad (2.22)$$

При расчете аperiodической составляющей тока к.з. в разветвленной цепи (с параллельно-последовательным соединением элементов) вначале рассчитывают изменение токов в отдельных контурах, а затем определяют суммарное значение тока, что соответствует операторному методу решения данной задачи. Действительно, из теоремы обратного \mathcal{L} -преобразования следует

$$I_a(t) = \mathcal{L}^{-1} [I(s)] = \sum_{k=1}^q \frac{I_k(0)}{z(s_k)} e^{s_k t} = \frac{I_1(0)}{z(s_1)} e^{s_1 t} + \frac{I_2(0)}{z(s_2)} e^{s_2 t} + \dots,$$

т. е. каждое слагаемое соответствует частному свободному току в цепи. Корни уравнения $z(s) = 0$ для активно-индуктивной цепи будут иметь величины

$$s_1 = -\frac{1}{T_1}; \quad s_2 = -\frac{1}{T_2}, \dots,$$

где T_1, T_2 - постоянные времени затухания отдельных аperiodических составляющих тока к.з.

Этот путь определения аperiodической составляющей требует длительной вычислительной работы. В практических расчетах начальное значение аperiodической составляющей, заменяющее сумму отдельных составляющих, представляется величиной, эквивалентной начальному значению периодической составляющей

$$I_a = I_{\text{пм}} = \sqrt{2} I'' , \quad (2.23)$$

а ее затухание зависит от эквивалентной постоянной времени T_a

$$i_a(t) = I_a e^{-\frac{t}{T_a}} ; \quad (2.24)$$

$$T_a = \frac{x_{\text{рез}}}{\omega r_{\text{рез}}} , \quad (2.25)$$

где $x_{\text{рез}}$ - результирующее реактивное сопротивление сложной цепи, вычисленное при условии, что активные сопротивления отсутствуют; $r_{\text{рез}}$ - результирующее активное сопротивление сложной цепи, вычисленное при условии, что реактивные сопротивления отсутствуют.

РАЗДЕЛ II

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ СИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ

Глава 3

Особенности практических методов расчета токов короткого замыкания

§ 3.1. Цель и область применения практических методов расчета токов короткого замыкания

Дифференциальные уравнения Парка-Горева (см. раздел IV) позволяют для одного генератора с высокой точностью рассчитать изменение тока короткого замыкания, т. е. определить величину тока в любой момент времени, однако вычисления сложны и громоздки. Как было показано в первом разделе книги, принимая приемлемые допущения, можно получить относительно простую формулу для расчета изменения тока короткого замыкания в цепи одного генератора. Однако, расчет тока к.з. в схеме с несколькими генераторами, как это имеет место в практике, приводит к значительным трудностям в связи с взаимным влиянием свободных составляющих и принужденных составляющих токов к.з. при автоматическом регулировании напряжения. Причем количество и сложность вычислений резко возрастает с увеличением числа генераторов. Действительно, если даже предположить, что два генератора при к.з. продолжают вращаться с синхронной скоростью, имеют одинаковые параметры и отличаются только величинами постоянных времени роторных обмоток, то затухание свободных токов у них будет различным и зависимым друг от друга. В генераторе с меньшей постоянной времени свободная составляющая тока затухает быстрее, а в генераторе с большей постоянной времени - медленнее, но чем значительнее различие между этими постоянными, тем медленнее происходит изменение этой составляющей у последнего генератора. При определенном соотношении постоянных времени свободная составляющая тока второго генератора в начале короткого замыкания не затухает, а возрастает. Это явление - следствие только быстрого затухания свободной составляющей тока первого генератора, но не влияния автоматического регулирования.

В реальных условиях, когда генераторы в системе разнотипны, имеют не только различные постоянные времени обмоток возбуждения,

но и параметры обмоток статора, ротора, имеют разные инерционные постоянные, разные системы возбуждения и автоматические регуляторы напряжения, расчет изменения тока к. з. произвести очень сложно даже с помощью вычислительных машин. Поэтому для решения многих практических задач разработаны приближенные методы расчета переходного процесса при коротком замыкании.

Следует знать, что чем проще метод, тем больше условностей вводится в расчет и поэтому точность расчета снижается. Во всяком случае, можно рекомендовать сначала пользоваться самым простым способом, а затем, если это потребует, применять более точные методы расчета.

Практические методы расчета созданы, в основном, для расчета сложных схем, включающих в себя несколько генераторов или электростанций. В последнем случае, учитывая однотипность генераторов на каждой электростанции, последние заменяются одним, эквивалентным генератором, параметры обмоток которого адекватны параметрам генераторов электростанции, а мощность равна суммарной мощности генераторов.

Разработка практических методов основана на следующих допущениях [3]:

- 1) синхронные машины имеют неявнополюсный ротор, и их параметры принимаются по продольной оси;
- 2) закон изменения периодической составляющей тока к.з. в схеме с одним генератором распространяется на схему с несколькими генераторами;
- 3) закон изменения аperiodической составляющей тока к.з. в аварийной ветви разветвленной схемы определяется для приближенной постоянной времени.

Первое допущение соответствует условию для синхронной машины $x_d = x_q$, и поэтому все электрические параметры (u , i , ψ) определяются без разложения по осям d , q . Кроме того, исключается учет составляющей тока двойной частоты 2ω , так как для неявнополюсного ротора имеет место $x_d - x_q = 0$.

Второе и третье допущения означают раздельное вычисление составляющих тока короткого замыкания для каждой ветви данной схемы. При вычислениях этих составляющих принимаются отличные друг от друга упрощения.

Вместе с тем, при расчете токов короткого замыкания в системах электроснабжения основными допущениями являются:

1) отсутствие насыщения магнитных цепей электромашин и трансформаторов (исключая случай включения трансформатора в сеть на холостой ход);

2) пренебрежение токами намагничивания железа автотрансформаторов и трансформаторов (исключая случай включения трансформатора с соединением обеих обмоток «звезда с нулем» на напряжение нулевой последовательности);

3) наличие симметрии трехфазной цепи (исключая случаи несимметричных режимов);

4) пренебрежение активными сопротивлениями (исключая случай расчета при $r > \frac{1}{3}x$ и процессов в установках с напряжением до 1 кВ).

Способы расчета зависят от цели расчета, т. е. сами по себе практические методы расчета подразделяются на менее точные и более точные. Самый простой метод применяется для случая определения начальных значений тока в месте к.з.; более сложный - если требуется найти распределение тока к.з. по отдельным ветвям схемы для настройки релейной защиты и системной автоматики; требование особой точности расчета предъявляется в случае анализа аварий в системе, когда встает вопрос о предъявлении рекламаций к заводам, изготовившим оборудование.

Применение расчетных моделей позволяет с достаточной для практики точностью определить не только ток к.з. в аварийной цепи, но и в остальных ветвях схемы электроснабжения с целью решения вопросов релейной защиты и автоматизации электрических систем.

Экспериментальными исследованиями установлено, что при выше указанных допущениях начальные значения токов при нарушении режима отличаются от расчетных на $\pm 5\%$; значения токов в аварийной ветви в любой момент времени переходного процесса отличается на 10-15 % от опытного, если процесс не сопровождается сильными качаниями роторов генераторов. Для прочих ветвей схемы ошибка в расчете увеличивается по мере удаления точки к.з. [3].

§ 3.2. Требования к расчетам токов короткого замыкания

Общие требования

При выборе расчетной схемы для определения токов к.з. следует исходить из предусматриваемых для данной электроустановки условий длительной ее работы и не считаться с кратковременными видоизменениями схемы этой электроустановки, которые не предусмотрены для длительной эксплуатации (например, при переключениях). Ремонтные и послеаварийные режимы работы электроустановки к кратковременным изменениям схемы не относятся.

Расчетная схема должна учитывать перспективу развития внешних сетей и генерирующих источников, с которыми электрически связывается рассматриваемая установка, не менее чем на 5 лет от запланированного срока ее ввода в эксплуатацию.

При этом допустимо вести расчет токов к.з. приближенно для начального момента к.з.

В качестве расчетного вида к.з. следует принимать [20, 21, 22]:

1. Для определения электродинамической стойкости аппаратов и жестких шин с относящимися к ним поддерживающими и опорными конструкциями - трехфазное к.з.

2. Для определения термической стойкости аппаратов и проводников - трехфазное к.з; на генераторном напряжении электростанций - трехфазное или двухфазное к.з. в зависимости от того, какое из них приводит к большему нагреву.

3. Для выбора аппаратов по коммутационной способности - по большему из значений, получаемых для случаев трехфазного и однофазного к.з. на землю (в сетях с большими токами замыкания на землю); если выключатель характеризуется двумя значениями коммутационной способности - трехфазной и однофазной - соответственно по обоим значениям.

Расчетный ток к.з. следует определять, исходя из условия повреждения в такой точке рассматриваемой цепи, при к.з. в которой аппараты и проводники этой цепи находятся в наиболее тяжелых условиях. Со случаями одновременного замыкания на землю различных фаз в двух разных точках схемы допустимо не считаться.

На реактированных линиях в закрытых распределительных устройствах проводники и аппараты, расположенные до реактора и отделенные от питающих сборных шин (на ответвлениях от линий - от элементов основной цепи) разделяющими полками, перекрытиями и т.

п., выбираются по току к.з. за реактором, если последний расположен в том же здании и соединение выполнено шинами.

Шинные ответвления от сборных шин до разделяющих полок и проходные изоляторы в последних должны быть выбраны исходя из к.з. до реактора.

При расчете термической стойкости в качестве расчетного времени следует принимать сумму времен, получаемую от сложения времени действия основной защиты (с учетом действия АПВ), установленной у ближайшего к месту к.з. выключателя, и полного времени отключения этого выключателя (включая время горения дуги).

При наличии зоны нечувствительности у основной защиты (по току, напряжению, сопротивлению и т. п.) термическую стойкость необходимо дополнительно проверять, исходя из времени действия защиты, реагирующей на повреждение в этой зоне, плюс полное время отключения выключателя. При этом в качестве расчетного тока к.з. следует принимать то его значение, которое соответствует этому месту повреждения.

Аппаратура и токопроводы, применяемые в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более, а также в цепях блоков генератор-трансформатор такой же мощности, должны проверяться по термической стойкости, исходя из времени прохождения тока к.з. 4 с.

Определение токов короткого замыкания для выбора аппаратов и проводников

В электроустановках при определении токов к.з. для выбора аппаратов и проводников и определения их воздействия на несущие конструкции при напряжении как до 1 кВ, так и выше, надо исходить из следующего:

1. Все источники, участвующие в питании рассматриваемой точки к.з., работают одновременно с номинальной нагрузкой.
2. Все синхронные машины имеют автоматические регуляторы напряжения и устройства форсировки возбуждения.
3. Короткое замыкание наступает в такой момент времени, при котором ток к.з. будет иметь наибольшее значение.
4. Электродвижущие силы всех источников питания совпадают по фазе.
5. Расчетное напряжение каждой ступени принимается на 5 % выше номинального напряжения сети.
6. Должно учитываться влияние на токи к.з. присоединенных к данной сети синхронных компенсаторов, синхронных и асинхронных

электродвигателей. Влияние асинхронных электродвигателей на токи к.з. не учитывается при мощности электродвигателей до 100 кВт в единице, если электродвигатели отделены от места к.з. одной ступенью трансформации, а также при любой мощности, если они отделены от места к.з. двумя или более ступенями трансформации, либо если ток от них может поступать к месту к.з. только через те элементы, через которые проходит основной ток к.з. от сети и которые имеют существенное сопротивление (линии, трансформаторы и т. п.)

В электроустановках выше 1 кВ в качестве расчетных сопротивлений следует принимать индуктивные сопротивления электрических машин, силовых трансформаторов и автотрансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий, а также токопроводов. Активное сопротивление следует учитывать только для воздушных линий с проводами малых сечений и стальными проводами, а также для протяженных кабельных сетей малых сечений с большим активным сопротивлением.

В электроустановках до 1 кВ в качестве расчетных сопротивлений следует принимать индуктивные и активные сопротивления всех элементов цепи, включая активные сопротивления переходных контактов цепи. Допустимо пренебречь сопротивлениями одного вида (активными или индуктивными), если при этом полное сопротивление цепи уменьшается не более чем на 10 %.

В случае питания электрических сетей до 1 кВ от понижающих трансформаторов при расчете токов к.з. следует исходить из условия, что подведенное к трансформатору напряжение неизменно и равно его номинальному напряжению.

Глава 4

Расчет начального, сверхпереходного тока короткого замыкания

§ 4.1. Схемы замещения. Расчет параметров в именованных и в относительных единицах

Как было установлено в § 2.4, начальный ток к.з. при известной ЭДС E'' зависит от сопротивления цепи от источника ЭДС до точки к.з.

$$I'' = \frac{E''}{x_d'' + \Delta x}. \quad (4.1)$$

Следовательно, расчет этой величины тока к.з., например, для схемы рис 4.1, а, должен начинаться с составления схемы замещения реальной электрической цепи, состоящей из генераторов, трансформаторов, реакторов и т. д.

Расчет сопротивлений схемы замещения в именованных единицах

Каждый элемент реальной электрической цепи в схеме замещения может быть представлен сопротивлением, как показано на рис. 4.1, б.

Сопротивления генераторов, трансформаторов, реакторов приводятся в каталогах не в Омах, а в процентах (или в относительных единицах), и поэтому прежде всего следует сопротивление каждого элемента выразить в одной системе единиц.

Сопротивление x_d'' синхронного генератора Г приводится в каталогах в относительных единицах. В именованную систему единиц это сопротивление переводится по формуле

$$x_d'' (\text{Ом}) = x_d'' (\text{о.е.}) \frac{U_{\text{ном}} (\text{кВ})}{\sqrt{3} I_{\text{ном}} (\text{кА})} = x_d'' (\text{о.е.}) \frac{U_{\text{ном}}^2 (\text{кВ})^2}{S_{\Gamma, \text{ном}} (\text{МВ} \cdot \text{А})}, \quad (4.2)$$

где $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$, $S_{\Gamma, \text{ном}}$ - соответственно номинальные напряжение, ток и мощность генератора из каталога или из [23] (табл. 2-1...2-3). Если задано $x_d'' (\%)$, то вместо $x_d'' (\text{о.е.})$ в формуле (4.2) подставляется

$$\frac{x_d'' (\%)}{100}.$$

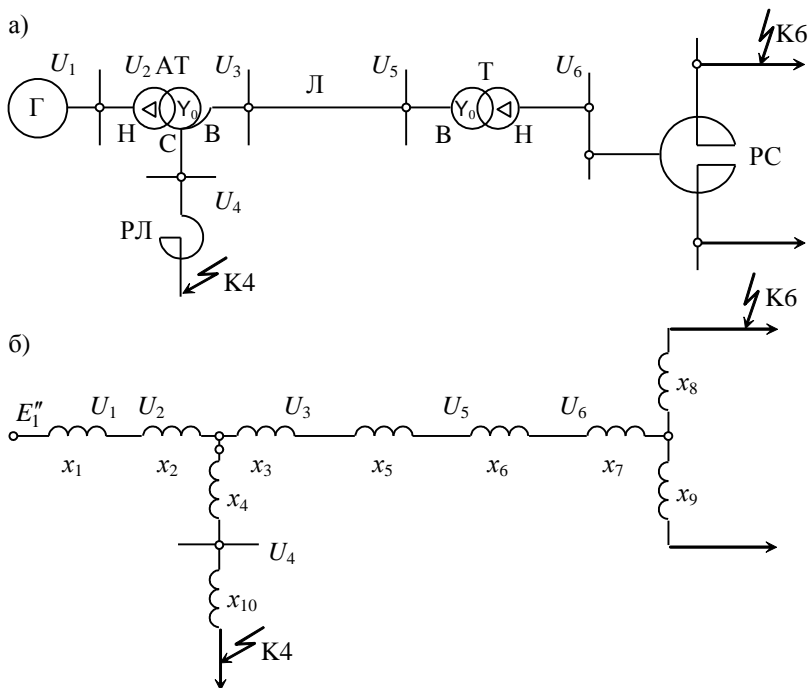


Рис. 4.1. Схема электроснабжения с различными элементами электрооборудования:

а – принципиальная схема; б – схема замещения для расчетов токов короткого замыкания (номера точек к.з. совпадают с порядковым номером ступени напряжения)

Сопротивление трансформатора Т определяется по величине напряжения короткого замыкания u_k (или e_k), приводимого в каталогах в процентах. В именованную систему единиц это сопротивление переводится по формуле

$$x_T (\text{Ом}) = \frac{u_k (\%) U_{\text{НОМ}} (\text{кВ})}{100 \sqrt{3} I_{\text{НОМ}} (\text{кА})} = \frac{u_k (\%) U_{\text{НОМ}}^2 (\text{кВ})^2}{100 S_{T, \text{НОМ}} (\text{МВ} \cdot \text{А})}, \quad (4.3)$$

где $U_{\text{НОМ}}$, $I_{\text{НОМ}}$, $S_{T, \text{НОМ}}$ - соответственно номинальное напряжение, ток и мощность трансформатора (из каталога или из [23] табл. 3-2...3-14). В схеме замещения трансформатор представляется индуктивным сопротивлением x_T . Это означает, что сопротивления обмоток трансформатора замещаются одним общим сопротивлением путем

приведения обмоток к одному напряжению. На рис. 4.2, а показана схема двухобмоточного трансформатора с коэффициентом трансформации $k = \frac{U_1}{U_2}$.

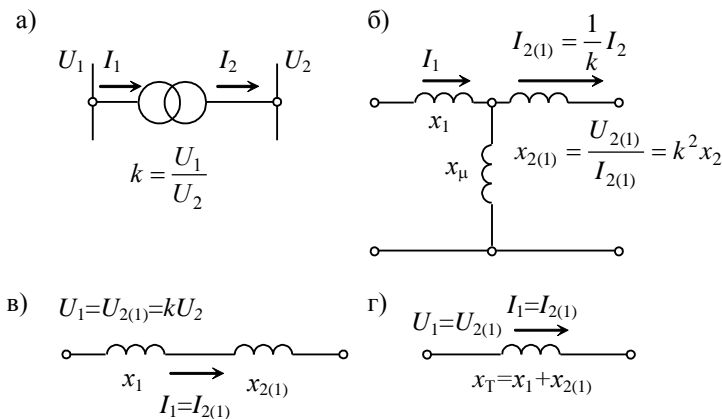


Рис.4.2. Схемы трансформатора:

а – электрическая схема; б – схема замещения одной фазы;
в – упрощенная схема замещения; г – приведенная схема замещения

В схеме замещения трансформатора электромагнитные связи заменяются электрическими (рис. 4.2, б), а для этого параметры вторичной обмотки приводятся к первичной по формулам

$$U_{2(1)} = kU_2, \quad I_{2(1)} = \frac{1}{k} I_2, \quad x_{2(1)} = \frac{U_{2(1)}}{I_{2(1)}} = k^2 \frac{U_2}{I_2} = k^2 x_2. \quad (4.4)$$

Приведение производится для того, чтобы не исказить величину тока в первичной цепи при включении обмотки вторичного напряжения (в схеме замещения) на первичное. По этой причине приведенное значение сопротивления вторичной стороны $x_{2(1)}$ должно отличаться от действительного сопротивления x_2 (см. формулу (4.4)) на k^2 . Током намагничивания трансформатора, как было указано выше, пренебрегают и поэтому схема замещения преобразуется в схему двух последовательно соединенных сопротивлений x_1 и $x_{2(1)}$ (рис. 4.2, в) и окончательно в схему замещения в виде одного сопротивления x_T (рис. 4.2, г), через которое протекает ток $I_1 = I_{2(1)}$ при напряжении $U_1 = U_{2(1)}$.

Сопротивления трехобмоточного трансформатора (или авто- трансформатора АТ) (см. рис. 4.1, а) определяются по величинам напряжений к.з. u_k (%) между каждой парой обмоток высокого (В), среднего (С) и низкого (Н) напряжений, приводимых в каталогах. Сначала определяются u_k для каждой обмотки по формулам:

$$u_{кВ} = 0,5(u_{кВС} + u_{кВН} - u_{кСН})\%;$$

$$u_{кС} = 0,5(u_{кСВ} + u_{кСН} - u_{кВН})\%;$$

$$u_{кН} = 0,5(u_{кВН} + u_{кСН} - u_{кВС})\%.$$

По известным величинам u_k каждой обмотки определяют их сопротивление:

$$x_B(\text{Ом}) = \frac{u_{кВ}(\%)}{100} \frac{U_{\text{ном}}(\text{кВ})}{\sqrt{3}I_{\text{ном}}(\text{кА})} = \frac{u_{кВ}(\%)}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2(\text{кВ})^2}{S_{\text{Т.ном}}(\text{МВ} \cdot \text{А})}, \quad (4.5)$$

$$x_C(\text{Ом}) = \frac{u_{кС}(\%)}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{Т.ном}}}, \quad x_H(\text{Ом}) = \frac{u_{кН}(\%)}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{Т.ном}}}, \quad (4.6)$$

где $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$, $S_{\text{Т.ном}}$ - соответственно номинальные напряжение, ток и мощность авто- или трансформатора (из каталога или из [23] табл. 3-2...3-14). Причем величины $U_{\text{ном}}$ и $I_{\text{ном}}$ принимаются для той обмотки, к которой приведены значения u_k (%) (как правило, они приведены к обмотке высшего напряжения).

Сопротивление линий электропередач задается величиной удельного сопротивления $x_{уд}$ на единицу длины. Тогда

$$x_L(\text{Ом}) = x_{уд}(\text{Ом/км})l(\text{км}), \quad (4.7)$$

где l - длина линии электропередачи.

Для реактора сдвоенного РС в каталогах приводится величина индуктивного сопротивления одной ветви $x_{0,5}$ (%) и коэффициент связи k_c , на основании которых определяется

$$x_{P1}(\text{Ом}) = -k_c \frac{x_{0,5}(\%)}{100} \frac{U_{\text{P.ном}}(\text{кВ})}{\sqrt{3}I_{\text{P.ном}}(\text{кА})}, \quad (4.8)$$

и сопротивление ветвей

$$x_{P2} = x_{P3} = (1 + k_c)x_{P1}. \quad (4.9)$$

Для одинарного реактора РЛ

$$x_P(\text{Ом}) = \frac{x(\%)}{100} \frac{U_{\text{P.ном}}(\text{кВ})}{\sqrt{3}I_{\text{P.ном}}(\text{кА})}, \quad \text{Ом}, \quad (4.10)$$

где $x(\%)$, $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ - соответственно индуктивное сопротивление, номинальные напряжение и ток реактора (из каталога или из [3], табл. П5, или из [23] табл. 5-14, 5-15).

Вышеприведенные формулы позволяют вычислить сопротивления элементов в схеме замещения, но только относительно того напряжения, которое для данного элемента принимается за номинальное. Поэтому вторым этапом составления схемы замещения является приведение сопротивлений элементов цепи, а также ЭДС, напряжений и токов различных ступеней напряжения $U_1 \dots U_6$ к ступени, которая принимается за основную, базисную. Это приведение к основной, базисной ступени напряжения осуществляется так же, как приведение у трансформаторов или асинхронных электродвигателей вторичной цепи, к первичной.

Если, например, необходимо определить токи к.з. в точках К4 или К6 (см. рис. 4.1, а), то за базисные напряжения целесообразно соответственно принять U_4 и U_6 . Тогда приведение, например, параметров элементов ступени напряжения U_1 к базисному напряжению U_6 производится по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{U} = U_{1(6)} &= k_{\text{ВН}} k_{\text{T}} U_1, \quad \overset{\circ}{E}'' = E_{1(6)}'' = k_{\text{ВН}} k_{\text{T}} E_1'', \quad \overset{\circ}{I} = I_{1(6)} = \frac{1}{k_{\text{ВН}} k_{\text{T}}} I_1, \\ \overset{\circ}{z} = z_{1(6)} &= \frac{U_{1(6)}}{I_{1(6)}} = k_{\text{ВН}}^2 k_{\text{T}}^2 z_1, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где $U_{1(6)}$, $I_{1(6)}$, $z_{1(6)}$ - величины ступени напряжения U_1 приведены к ступени U_6 ;

$k_{\text{ВН}}$, k_{T} - коэффициенты трансформации, определяемые как отношение напряжений, обращенных в сторону основной базисной ступени U_6 к напряжениям, обращенным в сторону ступени $U_1 \dots U_5$, элементы которой приводятся (см. схему рис.4.1, б)

$$k_{\text{ВН}} = \frac{U_3}{U_2}, \quad k_{\text{T}} = \frac{U_6}{U_5}. \quad (4.12)$$

На основании вышеизложенного сопротивления схемы рис. 4.1 в именованных единицах $x_1 \dots x_9$ будут приведены к базисному напряжению U_6 по формулам (4.11), а именно:

генератора по формуле (4.2)

$$x_{1(6)} = x_d'' k_{\text{ВН}}^2 k_{\text{T}}^2, \quad \text{Ом}; \quad (4.13)$$

автотрансформатора по формулам (4.5), (4.6)

$$x_{2(6)} = x_{\text{Н}} k_{\text{ВН}}^2 k_{\text{T}}^2, \quad \text{Ом}; \quad x_{3(6)} = x_{\text{В}} k_{\text{T}}^2, \quad \text{Ом}; \quad (4.14)$$

линии электропередачи по формуле (4.7)

$$x_{5(6)} = x_{\text{Л}} k_{\text{T}}^2, \quad \text{Ом}; \quad (4.15)$$

трансформатора по формуле (4.3)

$$x_{6(6)} = x_T k_T^2, \quad \text{Ом}; \quad (4.16)$$

реактора двояного по формулам (4.8) и (4.9)

$$x_{7(6)} = x_P \frac{U_{P, \text{ном}}}{U_6}, \quad \text{Ом}; \quad x_{8(6)} = x_{9(6)} = (1 + k_c) x_{7(6)}. \quad (4.17)$$

В случае приведения к базисному напряжению U_4 расчетные формулы сопротивлений записываются с учетом коэффициента трансформации $k_{CH} = \frac{U_4}{U_2}$ подобно (4.12):

генератора по формуле (4.2)

$$x_{1(4)} = x_d'' k_{CH}^2, \quad \text{Ом}; \quad (4.18)$$

автотрансформатора по формуле (4.6)

$$x_{2(4)} = x_H k_{CH}^2, \quad \text{Ом}; \quad x_{4(4)} = x_C, \quad \text{Ом}; \quad (4.19)$$

реактора по формуле (4.10)

$$x_{10(4)} = x_P, \quad \text{Ом}. \quad (4.20)$$

В практических расчетах иногда выполняют приближенное приведение, пользуясь тем, что для каждой ступени трансформации устанавливается среднее номинальное напряжение U_{cp} , равное 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230, 340; 515; 750 кВ. При этом условно принимается, что $U_{ном}$ всех элементов на данной ступени одинаковы и равны напряжению указанной шкалы*. В этом случае коэффициенты трансформации каждого трансформатора равны отношению напряжений связываемых ступеней (т. е. получается приближенное значение коэффициента трансформации). Для предыдущего примера приведения вместо выражения (4.11) имеем

$$U_{1(6)} = \frac{U_{cp6}}{U_{cp1}} U_1, \quad \text{кВ}, \quad I_{1(6)} = \frac{U_{cp1}}{U_{cp6}} I_1, \quad \text{кА},$$

$$z_{1(6)} = \frac{U_{1(6)}}{I_{1(6)}} = \left(\frac{U_{cp6}}{U_{cp1}} \right)^2 z_1, \quad \text{Ом}, \quad (4.21)$$

* Кроме сопротивлений реакторов, так как они составляют значительную часть сопротивления цепи и их приведение следует выполнять точно, особенно когда реакторы используются на напряжениях ниже номинальных.

где $U_{ср6}$ - среднее напряжение основной, базисной ступени; $U_{ср1}$ - среднее напряжение ступени, параметры которой приводятся к базисной (в данном примере $U_{ср1} = U_{ср2}$ - по шкале средних номинальных значений напряжения).

На рис. 4.3. показаны схемы с указанием тех величин, которые используются при точном приведении (схема б) и приближенном (схема в).

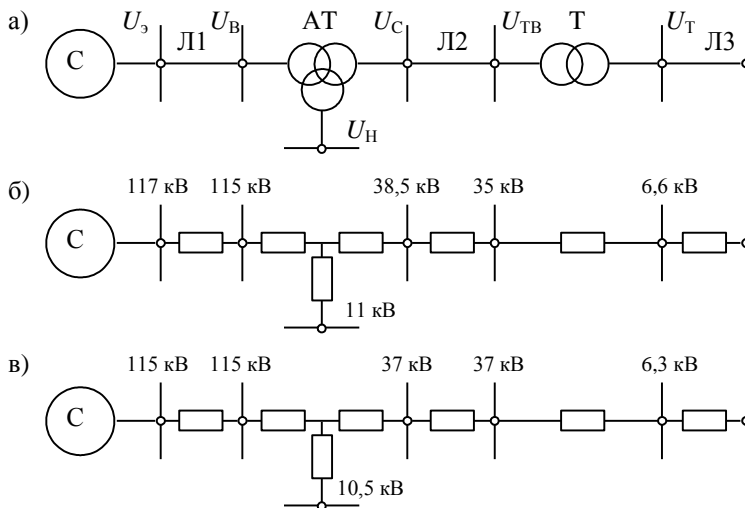


Рис. 4.3. Расчетная схема электроснабжения (а) и схемы замещения для точного приведения сопротивлений (б) и для приближенного – (в)

В случае, когда в расчетной цепи имеются авто- или трансформаторы с РПН большого диапазона (например $\pm 16\%$), или линейные регулировочные автотрансформаторы (ЛРА), или вольтдобавочные регулировочные трансформаторы (ВРТ), необходимо приведение параметров производить по точным коэффициентам трансформации.

Схемы замещения авто- и трансформаторов с двумя и большим числом обмоток, а также с расщепленными обмотками приведены в [3] (приложение П-7; схемы замещения реакторов - в приложении П-5). Справочный материал по параметрам элементов в схемах замещения приведен в [23], (табл. 3-3...3-11).

После приведения параметров всех элементов цепи к базисной ступени напряжения следует решить: в именованных или в относительных единицах производить расчет.

Расчет в именованных единицах производится по известным формулам для электрических цепей; для расчета в относительных единицах требуются дополнительные преобразования.

*Расчет сопротивлений схемы замещения
в относительных единицах*

Для удобства вычислений используются относительные единицы. С этой целью, как правило, величины базисной ступени считают единичными значениями. Если, например, за базисное напряжение принято $U_6 = 110$ кВ, то напряжение $U_1 = 154$ кВ в относительных базисных единицах $U_{1*} = \frac{U_1}{U_6} = 1,4$, напряжение $U_2 = 37$ кВ – $U_{2*} = \frac{U_2}{U_6} = 0,24$, а сама величина базисного напряжения в относительных единицах

$$U_{6*} = \frac{U_6}{U_6} = 1.$$

Если за величину базисной мощности принять, например, $S_6 = 1000$ МВ·А, то базисное значение тока при известном базисном напряжении $U_6 = 110$ кВ

$$I_{6*} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = 5,25, \quad \text{кА.} \quad (4.22)$$

В относительных базисных единицах значения базисной мощности, тока и базисного напряжения равны единичному значению

$$S_{6*} = \frac{S_6}{S_6} = 1, \quad I_{6*} = \frac{I_6}{I_6} = 1.$$

При известных базисных значениях напряжения и тока базисное значение сопротивления вычисляется по формуле Ома

$$z_6 = \frac{U_6(\text{кВ})}{\sqrt{3}I_6(\text{кА})}, \quad \text{Ом.} \quad (4.23)$$

В системе относительных единиц параметры элементов цепи, приведенные к базисной ступени по формулам (4.11), будут рассчитаны так

$$U_* = \frac{\overset{\circ}{U}}{U_6}, \quad E_*'' = \frac{\overset{\circ}{E}''}{U_6}, \quad I_* = \frac{\overset{\circ}{I}}{I_6}, \quad z_* = \frac{\overset{\circ}{z}}{z_6} = \frac{\overset{\circ}{z} \sqrt{3} I_6}{U_6} = z \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (4.24)$$

где приведенные значения $\overset{\circ}{U}$, $\overset{\circ}{E}''$, $\overset{\circ}{I}$, $\overset{\circ}{z}$ могут быть определены либо по формулам точного приведения, подобных (4.11), либо - приближенно-го, подобных (4.21).

Для сопротивлений в первом случае

$$z_* = (k_1^2 k_2^2 k_3^2 \dots) z \frac{S_6}{U_6^2}, \quad (4.25)$$

во втором, учитывая $U_{\text{ср.6}} = U_6$,

$$z_* = \left(\frac{U_{\text{ср.6}}}{U_{\text{ср}}} \right)^2 z \frac{S_6}{U_{\text{ср.6}}^2} = z \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2}, \quad (4.26)$$

где S_6, U_6, z - соответственно имеют размерность МВ·А, кВ, Ом.

Подставляя в формулы (4.24) для напряжения и ЭДС значения

$\overset{\circ}{U}, \overset{\circ}{E}''$ из (4.11) применительно к схеме рис. 4.1, имеем

$$\begin{aligned} U_{1*} &= \frac{\overset{\circ}{U}_1}{U_6} = \frac{U_{1(6)}}{U_6} = k_{\text{ВН}} k_{\text{Т}} \frac{U_1}{U_6} = \frac{U_3}{U_2} \frac{U_6}{U_5} \frac{U_1}{U_6} = \frac{U_1}{U_2} \frac{U_3}{U_5}; \\ E_{1*}'' &= \frac{\overset{\circ}{E}''_1}{U_6} = \frac{E_{1(6)}''}{U_6} = k_{\text{ВН}} k_{\text{Т}} \frac{E_1''}{U_6} = \frac{U_3}{U_2} \frac{U_6}{U_5} \frac{E_1''}{U_6} = \frac{U_3}{U_5} \frac{E_1''}{U_2}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Для приближенного приведения, при котором в схеме (рис.4.1) средние напряжения $U_1 = U_2$ и $U_3 = U_5$ получим

$$U_{1*} = 1, \quad E_{1*}'' = \frac{E_1'' \text{ (кВ)}}{U_1 \text{ (кВ)}}, \quad (4.28)$$

т. е. ЭДС, действующая в цепи короткого замыкания, приводится к базисной ступени напряжения и выражается в базисных единицах простым делением величины ЭДС на величину напряжения генератора. Иначе говоря, величина ЭДС в базисных относительных единицах соответствует величине в генераторных относительных единицах.

Далее, подставляя в формулу (4.25) значение сопротивления, например, генератора (4.2), применительно к схеме рис. 4.1, для $U_6 = U_6$ имеем

$$x_{d*}'' = k_{\text{ВН}}^2 k_{\text{Т}}^2 x_d'' \frac{S_6}{U_6^2},$$

где x_d'' , Ом,

$$\text{и} \quad x_{d*}'' = k_{\text{ВН}}^2 k_{\text{Т}}^2 x_d'' \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{Г.НОМ}}} \frac{S_6}{U_6^2},$$

где x_d'' , о.е.

Здесь для схемы рис. 4.1, а $k_{\text{ВН}} = \frac{U_3}{U_2}$, $k_{\text{Т}} = \frac{U_6}{U_5}$, $U_{\text{НОМ}} = U_1$, $U_6 = U_6$.

После подстановки этих значений в последнюю формулу можно получить

$$x_{d*}'' = \left(\frac{U_3}{U_2}\right)^2 \left(\frac{U_6}{U_5}\right)^2 \left(\frac{U_1}{U_6}\right)^2 x_d'' \frac{S_6}{S_{\Gamma.\text{НОМ}}} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \left(\frac{U_3}{U_5}\right)^2 x_d'' \frac{S_6}{S_{\Gamma.\text{НОМ}}}. \quad (4.29)$$

Эта зависимость показывает, что если сопротивление генератора задано в относительных генераторных единицах, то его выражение в относительных базисных значениях с одновременным точным приведением к базисному напряжению может быть осуществлено по формуле (4.29).

В случае приближенного приведения к базисной ступени напряжения, когда $U_1 = U_2$ и $U_3 = U_5$ (см. рис. 4.1), из формулы (4.29) получают

$$x_{d*}'' = x_d'' (\text{о.е.}) \frac{S_6}{S_{\Gamma.\text{НОМ}}} \quad \text{или} \quad x_{d*}'' = \frac{x_d'' (\%) S_6}{100 S_{\Gamma.\text{НОМ}}}. \quad (4.30)$$

Подобные расчетные формулы могут быть получены для сопротивлений остальных элементов схемы замещения (см. рис.4.1), а именно автотрансформатора, с учетом формул (4.5), (4.6):

$$\begin{aligned} x_{2*} &= x_H = \frac{u_{кН}(\%) S_6}{100 S_{\Gamma.\text{НОМ}}}; \\ x_{3*} &= x_B = \frac{u_{кВ}(\%) S_6}{100 S_{\Gamma.\text{НОМ}}}; \\ x_{4*} &= x_C = \frac{u_{кС}(\%) S_6}{100 S_{\Gamma.\text{НОМ}}}; \end{aligned} \quad (4.31)$$

линии электропередачи, с учетом формулы (4.7)

$$x_{5*} = x_{уд} I \frac{S_6}{U_{\text{Л}}^2}, \quad (4.32)$$

где $U_{\text{Л}} = U_{\text{ср}}$ - среднее напряжение ступени напряжения линии $U_3 = U_5$;

трансформатора, с учетом формулы (4.3)

$$x_{6*} = \frac{u_{к}(\%) S_6}{100 S_{\Gamma.\text{НОМ}}}; \quad (4.33)$$

реактора, с учетом формулы (4.10)

$$x_{10*} = \frac{x_P(\%) I_6}{100 I_{\text{НОМ}}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_6} = \frac{x_P(\%) S_6}{100 S_{P.\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_6}\right)^2, \quad (4.34)$$

где U_6, I_6 - базисное напряжение и ток на ступени реактора кВ, кА;

$S_{P.\text{НОМ}}$ - пропускная мощность реактора, МВ·А;

эквивалентной схемы сдвоенного реактора, с учетом формул (4.8), (4.9)

$$\begin{aligned} x_{7*} &= -k_c \cdot x_{0,5*}, \\ x_{8*} &= x_{9*} = (1 + k_c)x_{7*}, \end{aligned} \quad (4.35)$$

где $x_{0,5*}$ - сопротивление одной ветви реактора в базисных единицах по выражению (4.34).

Располагая значениями сопротивлений схемы замещения (см. рис.4.1), можно вычислить значение начального сверхпереходного тока к.з., например, в точке К6, по формуле (4.1), а именно:

для именованных единиц

$$I''(\text{кА}) = \frac{E''(\text{кВ})}{x''_{d\Sigma}(\text{Ом})},$$

где $E''(\text{кВ})$ - фазное значение;

для относительных единиц

$$I''(\text{б.е.}) = \frac{E''(\text{б.е.})}{x''_{d\Sigma*}(\text{б.е.})}$$

и

$$I''(\text{кА}) = I''(\text{б.е.})I_6(\text{кА}),$$

где $x''_{d\Sigma}$ - результирующее сопротивление схемы,

$$I_6(\text{кА}) = \frac{S_6(\text{МВ} \cdot \text{А})}{\sqrt{3}U_6(\text{кВ})} - \text{базисный ток по формуле (4.22),}$$

$U_6 = U_6$ – базисное напряжение для точки к.з. К6.

§ 4.2. Преобразование схем замещения для расчета токов короткого замыкания

Расчет начального значения тока к.з. I'' прост, когда в цепи имеется одна или несколько равных ЭДС и цепь состоит из последовательно или параллельно соединенных сопротивлений (см. рис. 4.4). При последовательном соединении сопротивлений эквивалентное суммарное сопротивление равно $z_3 = z_1 + z_2 + \dots$; при параллельном соединении

$$z_3 = \frac{1}{y_3} = \frac{1}{y_1 + y_2 + \dots}. \quad (4.38)$$

Эквивалентная величина сопротивления при параллельном соединении ЭДС и сопротивлений определяется аналогичным образом, но при различных ЭДС необходимо найти эквивалентную ЭДС E_3'' общего луча z_3 (см. рис. 4.4, в).

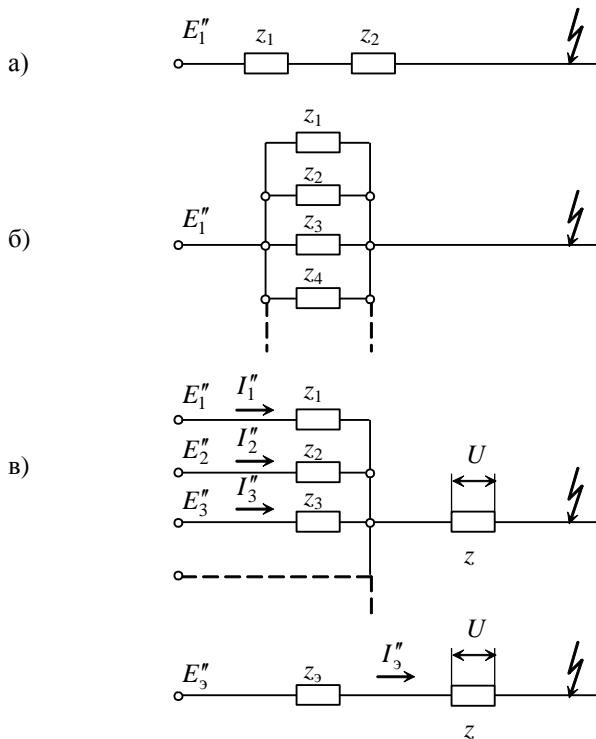


Рис.4.4. Схемы замещения:

а – при последовательном соединении сопротивлений; б – при параллельном соединении сопротивлений; в – при параллельном соединении ЭДС и сопротивлений

Эта ЭДС должна в общем луче сопротивлений обеспечить ток, равный сумме токов в лучах схемы,

$$I_3'' = I_1'' + I_2'' + \dots$$

Так как $I_3'' z_3 = E_3'' - U$, $I_1'' z_1 = E_1'' - U$, $I_2'' z_2 = E_2'' - U$ и т. д.,

то

$$I_3'' = \frac{E_3'' - U}{z_3} = \frac{E_1'' - U}{z_1} + \frac{E_2'' - U}{z_2} + \dots$$

Отсюда получим

$$E_3'' = z_3 \left(\frac{E_1''}{z_1} + \frac{E_2''}{z_2} + \dots \right) + U_{z_3} \left[\frac{1}{z_3} - \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \dots \right) \right].$$

Последнее выражение в квадратных скобках равно нулю, так как оно соответствует разности равных величин - эквивалентных проводимостей, и поэтому

$$E_3'' = z_3 \left(\frac{E_1''}{z_1} + \frac{E_2''}{z_2} + \dots \right) = \frac{\sum (y_i E_i'')}{y_3}. \quad (4.39)$$

Преобразование соединений элементов «треугольником» в эквивалентную «звезду», соединение «звездой» - в «треугольник»

Для схемы (рис. 4.5, а) целесообразно произвести указанное преобразование с тем, чтобы получить простое последовательное соединение элементов.

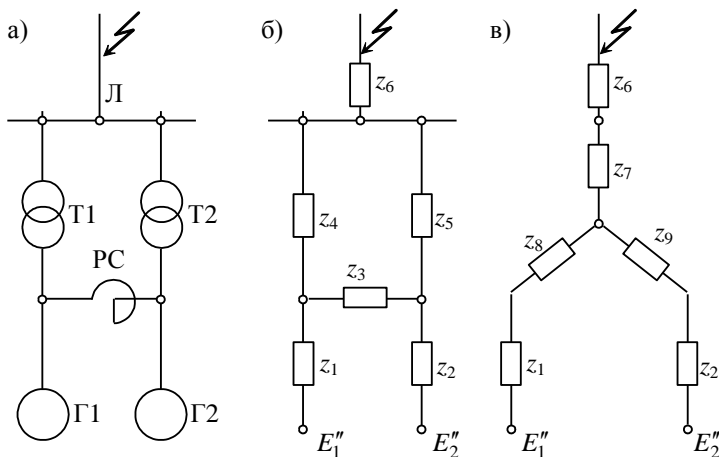


Рис.4.5. Расчетная схема электроснабжения (а) и схемы замещения с преобразованием соединения «треугольник» (б) в соединение «звезда» (в)

Представляя исходную схему в виде схемы замещения «б», преобразование сторон «треугольника» \$z_3, z_4, z_5\$ в лучи «звезды» производят по формулам

$$z_7 = \frac{z_4 z_5}{z_3 + z_4 + z_5}, \quad z_8 = \frac{z_3 z_4}{z_3 + z_4 + z_5}, \quad z_9 = \frac{z_3 z_5}{z_3 + z_4 + z_5}. \quad (4.40)$$

Для схемы рис. 4.6, а, в общем случае имеющей разные величины ЭДС, целесообразно произвести преобразование соединений «звезда» в эквивалентный «треугольник», как показано на рис. 4.6, в по следующим формулам:

$$z_9 = z_2 + z_4 + \frac{z_2 z_4}{z_5}; \quad z_{10} = z_2 + z_5 + \frac{z_2 z_5}{z_4}; \quad z_{11} = z_4 + z_5 + \frac{z_4 z_5}{z_2}. \quad (4.41)$$

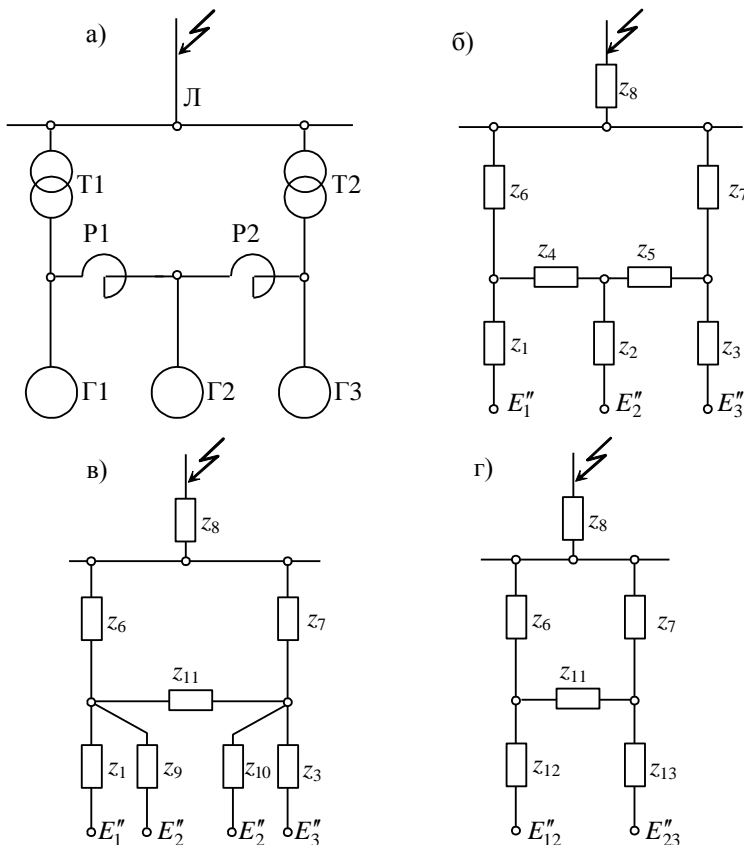


Рис. 4.6. Расчетная схема электроснабжения (а) и схемы замещения (б) с преобразованием соединения «звезда» в соединение «треугольник» (в) с последующим «разведением» сторон (г)

После этого преобразования производится разведение сторон треугольника, и образовавшиеся цепи z_9, z_{10} с ЭДС E_2'' представляются как параллельные цепи с отысканием эквивалентных ЭДС E_{12}''

и E_{23}'' по формуле (4.39). Затем производят преобразование, как на предыдущем рис. 4.5. При одинаковых ЭДС преобразования упрощаются, так как нет необходимости отыскивать эквивалентную ЭДС.

*Преобразование многолучевой звезды
в эквивалентный многоугольник с диагоналями*

Для схемы рис. 4.7, а, в общем случае имеющей различные ЭДС и нагрузки генераторного напряжения Н1, Н2, целесообразно произвести преобразование соединений 4-лучевой звезды в эквивалентный четырехугольник с диагональными цепями, как показано на рис. 4.7, б, по общей формуле

$$z_{xy} = z_x z_y \Sigma y, \quad (4.42)$$

где z_x, z_y - сопротивления лучей звезды, опирающихся на сторону (диагональ) эквивалентного многоугольника; Σy - сумма проводимостей всех лучей звезды.

Применительно к схеме рис. 4.7, б имеются следующие зависимости:

$$\begin{aligned} z_{11} &= z_4 z_9 \Sigma y, & z_{12} &= z_5 z_9 \Sigma y, \\ z_{13} &= z_2 z_4 \Sigma y, & z_{14} &= z_2 z_5 \Sigma y, \\ z_{15} &= z_2 z_9 \Sigma y, & z_{16} &= z_4 z_5 \Sigma y, \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\Sigma y = \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_4} + \frac{1}{z_5} + \frac{1}{z_9}.$$

Схема рис. 4.7, б после преобразования получает вид рис. 4.7, в. В последней производят преобразование параллельных ветвей, как показано на рис. 4.7, г, и определяют эквивалентные ЭДС.

Если в исходной схеме рис. 4.7, а ЭДС равны и нагрузки одинаковы, то две симметричные половины схемы замещения рис. 4.7, б можно наложить одна на другую (по линии сопротивлений z_2, z_9) и получить упрощенную схему, показанную на рис. 4.7, д. В этой схеме сопротивления с двойным индексом являются эквивалентными сопротивлениями параллельных ветвей. Например, сопротивления

$$z_{13} = \frac{z_1 z_3}{z_1 + z_3}, \quad z_{45} = \frac{z_4 z_5}{z_4 + z_5}.$$

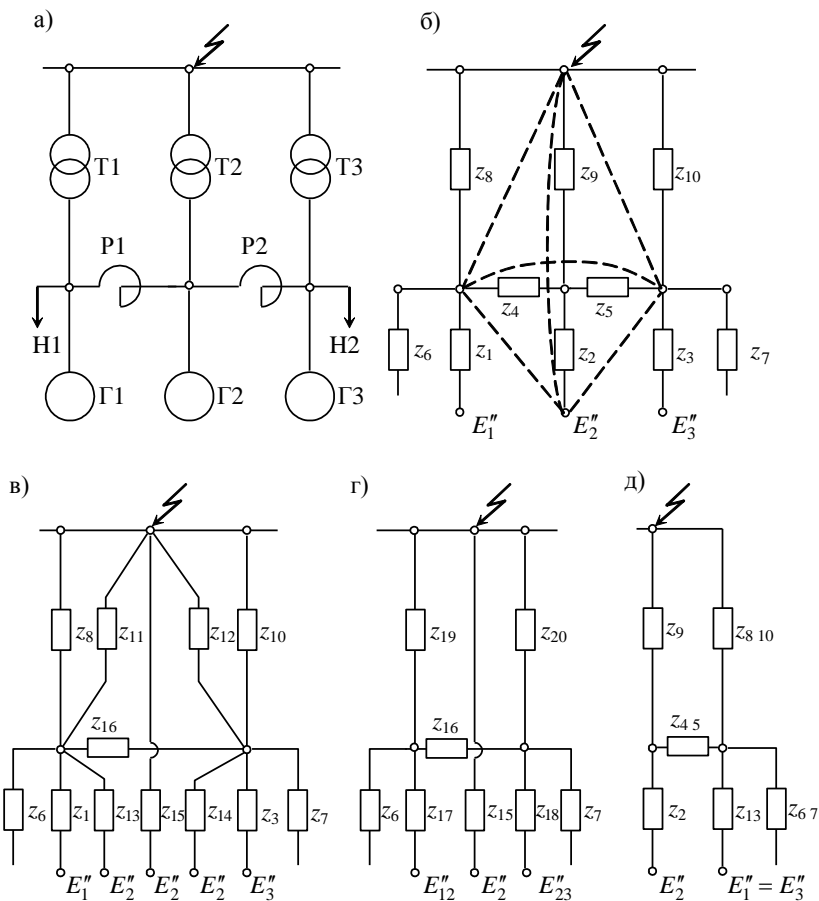


Рис. 4.7. Расчетная схема электроснабжения (а); схема замещения с преобразованием соединения «многолучевая звезда» (б) в соединение «многоугольник с диагоналями» (в); схема замещения с эквивалентными ЭДС (г); схема замещения с «наложением» симметричных частей схемы (д)

Распределения тока и напряжений по ветвям схемы при коротком замыкании в заданной точке

В предыдущем параграфе определялась начальная величина тока к.з. в заданной точке схемы. Для правильного выбора и проверки электрооборудования по токам к.з., настройки релейной защиты и автоматики необходимо определить величины токов к.з., которые протекают в заданную точку к.з. по отдельным лучам (ветвям, цепям) схемы.

В случае параллельного соединения цепей с равными ЭДС

$E_1'' = E_2'' = \dots = E_n''$ (см. рис. 4.4, в), очевидно токи последних будут обратно пропорциональны сопротивлениям.

Если величина тока к.з., протекающего через все сопротивления $z_1 = z_2 = \dots = z_n$, равна $I_3'' = I_1'' + I_2'' + \dots + I_n''$, то из равенства

$I_3'' z_3 = I_1'' z_1 = I_2'' z_2 = \dots = I_n'' z_n$ следует, что

$$I_n'' = I_3'' \frac{z_3}{z_n}. \quad (4.44)$$

Примем ток I_3'' за единицу и обозначим его через $c = I_3''$, тогда составляющие тока I_1'', I_2'', \dots в соответствии с формулой (4.44) будут иметь значения долей c_1, c_2, \dots , т. е.

$$c_1 = c \frac{z_3}{z_1}, \quad c_2 = c \frac{z_3}{z_2} \quad \dots \quad c_n = c \frac{z_3}{z_n}. \quad (4.45)$$

Правильность вычислений коэффициентов токораспределения $c_1, c_2 \dots c_n$ определяется условием, что

$$c_1 + c_2 + \dots + c_n = 1. \quad (4.46)$$

Зная значения коэффициентов токораспределения, можно определить сопротивление каждого луча схемы до точки к.з. с учетом общего сопротивления z (см. рис. 4.4, в), а именно

$$z_{1c} = \frac{z_3 + z}{c_1}, \quad z_{2c} = \frac{z_3 + z}{c_2}, \quad \dots \quad z_{nc} = \frac{z_3 + z}{c_n}. \quad (4.47)$$

Такое преобразование целесообразно при наличии равных ЭДС на концах лучей (со стороны источника питания).

При известных сопротивлениях $z_{1c}, z_{2c} \dots z_{nc}$ токи в ветвях схемы рассчитываются следующим образом:

$$I_1'' = \frac{E_1''}{z_{1c}}, \quad I_2'' = \frac{E_2''}{z_{2c}}, \quad \dots \quad I_n'' = \frac{E_n''}{z_{nc}}.$$

Распределение токов в «треугольнике» по коэффициентам токораспределения в лучах «звезды» (рис. 4.8) определяется по формулам

$$c_{12} = \frac{c_1 z_1 + c_2 z_2}{z_{12}}, \quad c_{13} = \frac{c_1 z_1 + c_3 z_3}{z_{13}}, \quad c_{23} = \frac{c_2 z_2 + c_3 z_3}{z_{23}}. \quad (4.48)$$

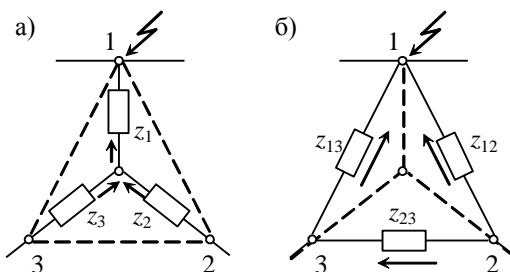


Рис. 4.8. Преобразование схемы замещения при соединении «звезда» (а) в соединение «треугольник» (б)

Если значение c_{23} отрицательное, то это означает протекание тока от точки 3 к точке 2. Применение коэффициентов токораспределения см. в § 5.3.

Расчет токов к.з. по отдельным ветвям, лучам схемы называется расчетом токов к.з. по индивидуальному изменению токов, а расчет, при котором вся схема сводится к одному лучу, называется расчетом тока к.з. по общему изменению токов.

§ 4.3. Расчёт начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от электрической системы

Для расчета токов к.з. в сложной схеме необходимо определить путем ее преобразования эквивалентное сопротивление цепи к.з. Во многих случаях оказываются неизвестными ни параметры звеньев расчетной схемы, ни ее конфигурация. Особенно часто это бывает при необходимости учета влияния системы на ток к.з. вблизи какой-либо электрической станции. В подобных случаях применяются упрощенные, приближенные методы расчета. Эти методы оказываются целесообразными и при расчете токов к.з. в сложных схемах, преобразование которых отнимает много времени и труда. Можно приблизительно оценить эквивалентное сопротивление системы без учета электрической станции, вблизи которой рассматривается к.з. Приближенная оценка влияния системы сводится к определению расчетного реактивного сопротивления системы. Располагая этим значением, можно, как показано ниже, вычислить ток к.з., посылаемый системой в точку к.з.

Расчет токов короткого замыкания
при постоянном напряжении на шинах системы

Если система имеет мощность, значительно превышающую мощность электростанции, вблизи которой возникает к.з., то можно считать напряжение на шинах системы неизменным, и тогда следует, что сопротивление системы $x_c = 0$. Эквивалентная схема этого случая соответствует рис. 4.9, б, где сопротивление $x_{л}$ является сопротивлением связи между электростанцией и шинами системы.

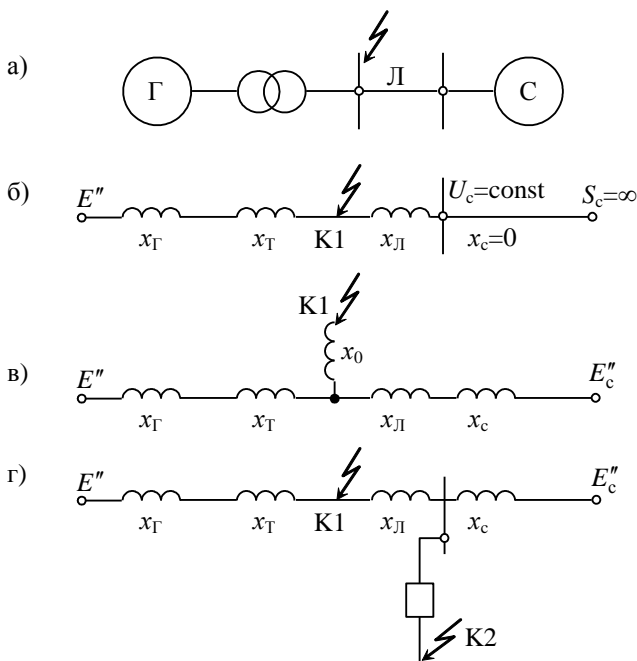


Рис. 4.9. Схема электроснабжения (а) и ее схемы замещения для расчетов токов короткого замыкания: б – в случае системы неограниченной мощности; в – для неизвестного значения тока к.з. от системы; г – для известного значения тока (мощности) отключения выключателем

Величина тока к.з. от системы определяется так

$$I_{c*} = I_{c\infty*} = \frac{U_{c*}}{x_{л*}} = \frac{1}{x_{л*}} \quad (4.49)$$

или

$$I_c'' = I_{c\infty} = I_{c*}'' I_6 = \frac{1}{x_{Л*}} \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}, \text{ кА.} \quad (4.49, \text{ а})$$

Если расчет токов к.з. производится методом расчетных кривых (см. § 5.1) по индивидуальному изменению (для случая соизмеримой мощности системы и электростанций), то расчетное сопротивление луча системы (рис. 4.9, в) определяется по формуле (4.47) так

$$x_{\text{расч}*} = \frac{x_3^* + x_0^*}{c_c},$$

где x_3 - эквивалентное сопротивление цепи к.з.; x_0 - сопротивление «отпайки»; c_c - коэффициент токораспределения луча системы.

Применительно к схеме рис. 4.9, в для К1 по формуле (4.38)

$$x_3^* = \frac{(x_{Г*} + x_{Т*})(x_{Л*} + x_{с*})}{x_{\Sigma*}},$$

где

$$x_{\Sigma*} = x_{Г*} + x_{Т*} + x_{Л*} + x_{с*}$$

и коэффициент токораспределения луча системы по формулам (4.45)

$$c_c = \frac{x_3^*}{x_{Л*} + x_{с*}}.$$

Ток короткого замыкания от системы в точку к.з. К1 в этом случае равен

$$I_{с*}'' = \frac{1}{x_{\text{расч}*}} \quad \text{и} \quad I_c'' = I_{c\infty} = \frac{I_6}{x_{\text{расч}*}}, \text{ кА.} \quad (4.50)$$

Расчет токов короткого замыкания

по известной величине тока короткого замыкания системы

Если известна величина тока к.з, посылаемого отдельно системой на шины подстанции связи, то величина сопротивления системы определяется так

$$x_{с*} = \frac{I_6}{I_c''}, \quad (4.51)$$

где $I_c'' = I_{c\infty}$ - ток к.з. от системы, кА.

При расчете суммарного значения тока к.з. сопротивления системы и сопротивления связи выделяются в один луч (см. рис. 4.9, г), сопротивление которого относительно точки к.з. равно

$$x_{\text{расч}*} = x_3^*$$

и, следовательно, суммарный ток к.з. I_{Σ}'' в точке К1 рассчитывается по формуле (4.50).

*Расчёт токов короткого замыкания
по отключающей способности выключателя*

Сопrotивление цепи к.з. согласно схеме рис. 4.9, г для К2 равно

$$x_{к*} = \frac{x_{\Sigma*}x_{с*}}{x_{\Sigma*} + x_{с*}},$$

где $x_{\Sigma*} = x_{Г*} + x_{Т*} + x_{Л*}$.

С другой стороны, если известна величина предельной мощности отключения выключателя $S_{пр}$ на фидере подстанции (см. рис. 4.9, г), то, принимая эту величину за возможную мощность к.з. на шинах подстанции, можно вычислить сопротивление цепи к.з.

$$x_{к*} = \frac{S_{б}}{S_{пр}}.$$

Следовательно, сопротивление системы определяется так

$$x_{с*} = \frac{x_{\Sigma*}S_{б}}{x_{\Sigma*}S_{пр} - S_{б}}. \quad (4.52)$$

В этом случае расчет также ведется по индивидуальному изменению с выделением луча системы относительно точки к.з.

**§ 4.4. Расчет аperiodической составляющей
и ударного значения тока короткого замыкания**

Вышеизложенные методы касались расчета периодической составляющей тока к.з., однако полный ток к.з. включает в себя аperiodическую составляющую. Величина последней, как установлено выше, имеет максимальное значение в случае к.з. в индуктивной цепи при прохождении ЭДС (напряжения) через нулевое значение и при $i_0 = 0$ имеет место равенство

$$i_{a(t=0)} = -i_{н(t=0)} = -\sqrt{2}I'' . \quad (4.53)$$

Затухает эта составляющая по экспоненциальному закону

$$i_a = i_{a0}e^{-\frac{t}{T_a}},$$

где T_a - постоянная времени цепи от источника ЭДС до точки к.з.

В разветвленной схеме при к.з. аperiodические составляющие затухают со своими постоянными времени, но в практических расчетах вычисляют общее, эквивалентное значение постоянной времени (приближенное значение) для всей разветвленной схемы и по ней находят единую аperiodическую составляющую для эквивалентной цепи к.з. Исключение составляет случай к.з. на зажимах генератора, работающего параллельно с системой. Здесь общая аperiodическая составляющая тока к.з. определяется как сумма составляющих (отдельно для генератора и системы), затухающих с различными постоянными времени.

Величина ударного тока к.з., как было установлено выше, равна сумме периодической и аperiodической составляющих тока к.з. в первом полупериоде для момента времени $t = 0,01$ с

$$i_y = i_n + i_a = \sqrt{2}I'' + \sqrt{2}I''e^{-\frac{0,01}{T_a}} = \sqrt{2}k_y I'', \quad (4.54)$$

где k_y - ударный коэффициент

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}. \quad (4.55)$$

Причем, при вычислении i_y принимается, что периодическая составляющая не затухает в течение первого периода.

Величина ударного коэффициента k_y может изменяться в пределах $1 \leq k \leq 2$, так как постоянная времени может лежать в пределах

$$0 \leq T_a = \frac{x}{\omega r} \leq \infty \text{ соответственно для значений } x = 0 \text{ и } r = 0.$$

Зависимость k_y от T_a показана на рис 4.10.

При отсутствии данных r и x цепи к.з. можно принимать значения отношения r/x для отдельных элементов по табл. 4.1 [3].

В электрических установках напряжением выше 1 кВ при к.з. на подстанциях в высоковольтной сети $k_y = 1,8$, тогда

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,8I'' = 2,55I''.$$

При к.з. на шинах генераторов электростанций $k_y = 1,9$ и, следовательно,

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,9I'' = 2,71I''.$$

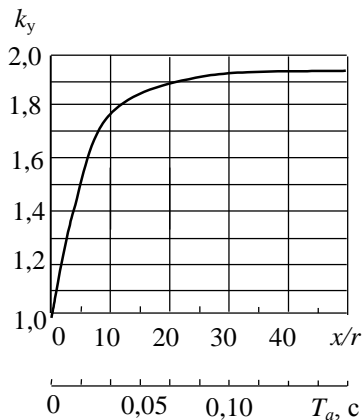


Рис. 4.10. График зависимости ударного коэффициента от постоянной времени или от соотношения реактивного и активного сопротивлений цепи короткого замыкания

Таблица 4.1

Наименование элемента	Отношение r/x
Система электрическая	0,02
Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	0,067-0,012
Турбогенераторы мощностью 100-500 МВт	0,01-0,007
Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0,025-0,017
Гидрогенераторы без демпферных обмоток	0,017-0,01
Трансформаторы мощностью 5-30 МВ·А	0,14-0,06
Трансформаторы мощностью 63-630 МВ·А	0,05-0,02
Реакторы 6-10 кВ на 0,4-1 кА	0,028-0,014
Реакторы 6-10 кВ на 1,6-2,5 кА	0,017-0,011
Воздушные линии 110-220 кВ	0,5-0,125
Кабельные линии 6-10 кВ	5-1,25
Токопроводы 6-10 кВ	0,11-0,04
Обобщенная нагрузка	0,4

§ 4.5. Расчет тока, посылаемого нагрузкой в точку короткого замыкания

При коротком замыкании на шинах электростанции или подстанции на величину начального тока к.з. оказывает влияние присоединенная нагрузка в виде синхронных электродвигателей, компенсаторов и асинхронных электродвигателей.

Начальный ток к.з., посылаемый синхронными перевозбужденными двигателями и компенсаторами в точку к.з., зависит от того, насколько величина их ЭДС E'' больше приложенного напряжения. Асинхронные электродвигатели в начале к.з. могут рассматриваться как невозбужденные синхронные двигатели, ибо скольжение их в рабочем режиме составляет 2-5 %, и можно считать, что они вращаются с синхронной скоростью. Ротор асинхронного электродвигателя является неявнополюсным и поэтому обладает полной симметрией. Его сверхпереходное индуктивное сопротивление x'' является реактивностью короткого замыкания (при $s = 1$) [8]

$$x'' = \frac{1}{I_{\text{пуск}}}, \text{ о.е.}, \quad (4.56)$$

где $I_{\text{пуск}}$ - пусковой ток электродвигателя при прямом пуске.

Сверхпереходная ЭДС электродвигателя, которая обусловит подачу тока в точку к.з., определяется из начальных условий, т. е. для режима, предшествующего моменту к.з. в сети.

Из векторной диаграммы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 4.11) следует, что

$$(E'')^2 = (U \cos \varphi - r_1 I_1)^2 + (U \sin \varphi - x_1 I_1)^2$$

или

$$E'' = \sqrt{(U \cos \varphi - r_1 I_1)^2 + (U \sin \varphi - x_1 I_1)^2}, \quad (4.57)$$

где U , I , $\cos \varphi$ - значения напряжения, тока и коэффициента мощности электродвигателя перед к.з. в сети.

Ток «подпитки» асинхронного электродвигателя в точку к.з.

$$I'' = \frac{E''}{z''}, \text{ о.е.} \quad (4.58)$$

Ударный ток к.з., посылаемый электродвигателями в точку к.з., вычисляется по формуле (4.54), в которой ударный коэффициент k_y для синхронных электродвигателей и компенсаторов принимается таким же, как и для генераторов той же мощности. У асинхронных

двигателей периодическая и аperiodическая составляющие посылаемого ими тока в точку к.з. затухают почти с одной и той же постоянной времени, и поэтому величина k_y вычисляется с учетом этого обстоятельства. На рис. 4.12 показан диапазон значений k_y асинхронных электродвигателей в зависимости от мощности последних.

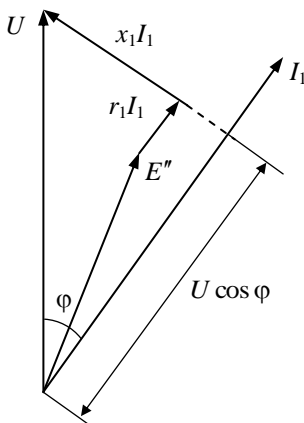


Рис. 4.11. Векторная диаграмма асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

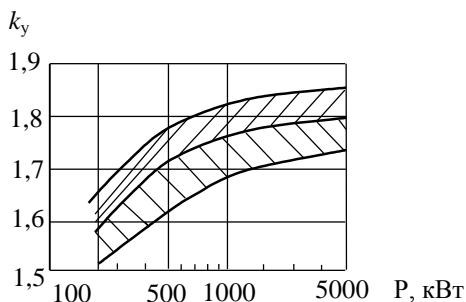


Рис. 4.12. График зависимости ударного коэффициента асинхронной нагрузки от ее мощности

В практических расчетах влияние на ток к.з. учитывают только от электродвигателей мощностью не менее 100 кВт [20].

В основном влияние нагрузки учитывается средними параметрами типового состава потребителей промышленного района. Установлено, что такую обобщенную нагрузку для расчета можно характеризовать ЭДС $E''_{\text{нагр}} = 0,85$ и сопротивлением $x''_{\text{нагр}} = 0,35$ относительно полной рабочей мощности нагрузки (МВ·А) и ее среднего номинального напряжения (кВ); для обобщенной нагрузки значение ударного коэффициента принимается равным единице.

Глава 5

Расчет тока короткого замыкания для данного момента времени

§ 5.1. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания (метод расчетных кривых)

Вычисление периодической составляющей тока короткого замыкания может быть произведено по формулам, выведенным при помощи уравнения Парка-Горева с учетом основных параметров генератора и с учетом действия автоматической системы возбуждения. При вычислении этих составляющих для нескольких генераторов принимаются допущения, указанные в гл. 3.

Параметры отечественных турбогенераторов в части сопротивлений обмоток и действия автоматических систем возбуждения близки для машин различной мощности, и поэтому для всего ряда турбогенераторов для усредненных параметров по уравнениям Парка-Горева могут быть вычислены и построены графики изменения периодической составляющей тока короткого замыкания для различных величин внешнего сопротивления.

Эти многочисленные графики могут быть сведены в единый график зависимостей периодической составляющей тока от времени.

Тогда построенные расчетные кривые (рис. 5.1) могут быть использованы для определения величины периодической составляющей тока к.з. в заданный момент времени [22].

В соответствии с ГОСТ 27514-87 для выбора выключателей необходимо знать не только I'' и i_y , но и такие величины тока короткого замыкания, как $I_{пт}$ и $i_{ат}$ соответственно, периодическую и аperiodическую составляющие тока к.з. к моменту размыкания дугогасительных контактов выключателя*.

Периодическая составляющая тока короткого замыкания с момента возникновения к.з. начинает затухать и тем интенсивнее, чем ближе короткое замыкание к зажимам генераторов.

Степень затухания периодической составляющей тока к.з. представляется коэффициентом затухания

*Это время состоит, как известно, из минимального времени действия релейной защиты ($t_{защ}$) и собственного времени отключения выключателя ($t_{откл}$), т. е. $\tau = t_{защ} + t_{откл}$.

$$\gamma_t = \frac{I_{пр}}{I_{п0}}, \quad (\gamma_t = \frac{I_{пр}}{I''}).$$

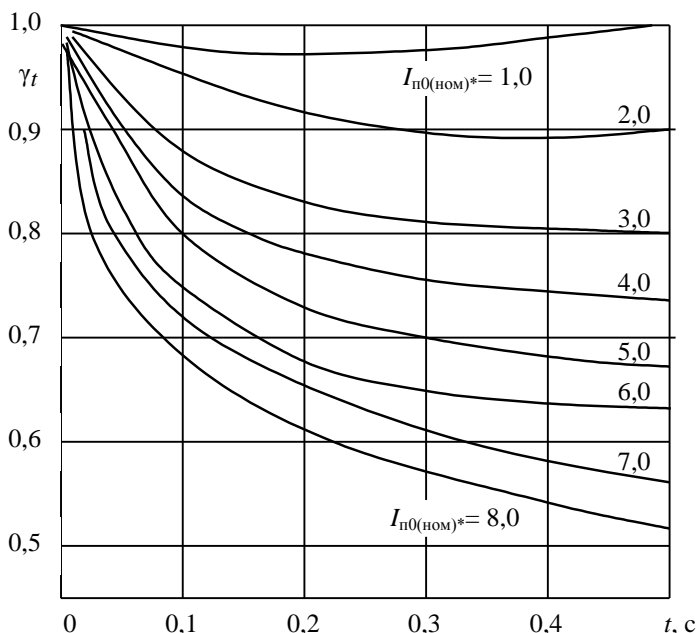


Рис. 5.1. Изменение периодической составляющей тока к.з. от синхронных генераторов с тиристорной или высокочастотной системой возбуждения (графики для турбогенераторов мощностью от 12,5 до 800 МВт, для гидрогенераторов мощностью до 500 МВт)

Периодическую составляющую ($I_{пр}$) для момента времени t определяют по расчетным кривым рис. 5.1, придерживаясь указанной последовательности расчета: вычисляется отношение действующего значения периодической составляющей тока в начальный момент к.з. $I_{п0}$ (сверхпереходный ток I'') в данном луче к номинальному току луча

$$I_{п0(ном)*} = \frac{I_{п0}}{I_{л.ном}}, \quad (I_{п0(ном)*} = \frac{I''}{I_{л.ном}}), \quad (5.1)$$

где I'' - начальный, сверхпереходный ток по формуле (4.37), кА, или

$$I'' = \frac{E''}{x_{рез}} I_0;$$

$I_{Л.ном}$ - номинальный ток расчетного луча, кА

$$I_{Л.ном} = \frac{\sum S_{Л.ном}}{\sqrt{3}U_{ном}}, \text{ кА}, \quad (5.2)$$

здесь $S_{Л.ном}$ - суммарная номинальная мощность источников ЭДС в луче, МВ·А; $U_{ном}$ - номинальное напряжение ступени, где происходит к.з., кВ.

Отношение (5.1) характеризует удаленность точки к.з. от источников ЭДС. При численном значении этого отношения ≤ 1 короткое замыкание следует считать удаленным и периодическую составляющую тока к.з. принимать неизменной, для любого момента времени, т. е.

$$I_{пт} = I_{п0}, \quad (I_{пт} = I''). \quad (5.3)$$

Это равенство справедливо и для луча от энергосистемы.

Если отношение (5.1) более единицы, то следует определить степень изменения периодической составляющей, как указано ниже:

для найденного значения $I_{п0(ном)*}$, для заданного момента времени τ по кривым рис. 5.1 определяется коэффициент затухания γ_τ ;

вычисляется искомое действующее значение периодической составляющей к.з. в момент времени τ

$$I_{пт} = \gamma_\tau I_{п0}, \quad (I_{пт} = \gamma_\tau I''); \quad (5.4)$$

ток в точке к.з. в данный момент времени равен сумме токов

$$I_{пт} = I_{пт1} + I_{пт2} + \dots + I_{пт\tau}.$$

Если ток короткого замыкания от источников ЭДС поступает в точку к.з. через общее сопротивление (рис. 5.2), то необходимо выполнить преобразование схемы в q – лучевую схему таким образом, чтобы значения результирующего сопротивления и токораспределения в лучах исходной схемы остались неизменными. С этой целью определяются коэффициенты токораспределения:

$$c_{Л1} = \frac{x_{3*}}{x_{1*}}, \quad c_{Л2} = \frac{x_{3*}}{x_{2*}}, \quad c_{Л3} = \frac{x_{3*}}{x_{3*}} \text{ и т. д.}, \quad (5.5)$$

где

$$x_{3*} = \frac{1}{Y_{3*}}, \quad Y_{3*} = \frac{1}{x_{1*}} + \frac{1}{x_{2*}} + \dots$$

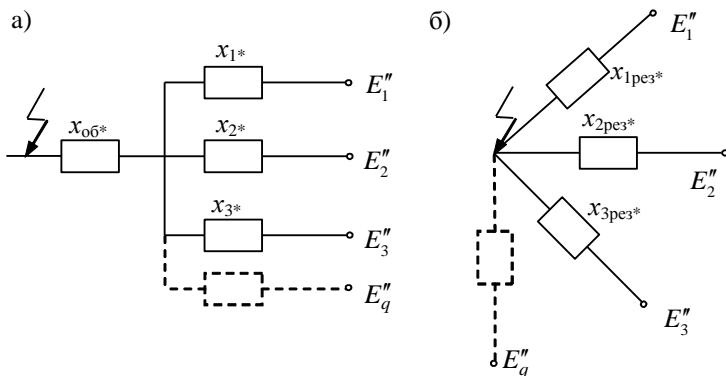


Рис. 5.2. Схема замещения для расчета к.з.:
а – с общим сопротивлением; б – q – лучевая схема

Тогда результирующие сопротивления лучей определяются так

$$x_{1рез} = \frac{x_{рез*}}{C_{Л1}}, \quad x_{2рез} = \frac{x_{рез*}}{C_{Л2}} \text{ и т. д.}, \quad (5.6)$$

где

$$x_{рез*} = x_3 + x_{об*}. \quad (5.7)$$

При к.з. на шинах генераторного напряжения ток от генератора к моменту τ заметно снижается, а ток от системы практически остается прежним. Поэтому расчет общего значения периодической составляющей тока к.з. для момента времени τ производится по формуле

$$I_{пт} = \sum I_{пт\tau} + I_c'', \quad (5.8)$$

где $\sum I_{пт\tau}$ - суммарное значение периодических составляющих токов генераторов для момента времени τ по расчетным кривым; I_c'' - периодическая составляющая тока от системы.

Апериодическая составляющая тока к.з. в этом случае вычисляется по формуле

$$i_{ат} = \sqrt{2} \left(\sum \gamma_{a\Gamma} I_{\Gamma}'' + \gamma_{ac} I_c'' \right), \quad (5.9)$$

где

$$\gamma_{a\Gamma} = e^{-\frac{\tau}{T_{a\Gamma}}}; \quad \gamma_{ac} = e^{-\frac{\tau}{T_{ac}}}, \quad (5.10)$$

здесь $\gamma_{aГ}, \gamma_{ac}$ - коэффициенты затухания аperiodических составляющих; $T_{aГ}, T_{ac}$ - постоянные времени цепей генераторов и системы, вычисляемые по (2.25).

Расчет изменения тока от разноудаленных источников энергии не следует применять в случае к.з. за относительно большим сопротивлением x_p (за реакторами линий генераторного напряжения, за трансформаторами собственных нужд, на стороне вторичного напряжения подстанций). В этом случае расчет производится для одного луча, т. е. расчет по общему изменению тока к.з.

Примечание: при отсутствии расчетных кривых величина периодической составляющей тока к.з. на данный момент времени может быть вычислена по формулам для симметричного к.з. (15.22), (15.35) и для несимметричного к.з. по формуле (15.37); величина аperiodической составляющей на этот же момент времени может быть рассчитана по формуле (15.41).

§ 5.2. Пример расчета токов при трехфазном коротком замыкании в системе электроснабжения с трансформаторными подстанциями

Для схемы электрических соединений (рис. 5.3) требуется рассчитать:

- 1) начальное значение периодической составляющей тока к.з. – начальный сверхпереходный ток I'' - в точках к.з. К1-К6;
- 2) ударный ток к.з. в указанных точках к.з.;
- 3) действующее значение периодической составляющей тока к.з. в указанных точках к.з. для момента времени 0,1 с (время действия релейной защиты и собственное время выключателя);
- 4) значение аperiodической составляющей тока к.з. в указанных точках к.з. для момента времени 0,1 с;
- 5) полный ток к.з. в указанных точках к.з. для момента времени 0,1 с.

Исходные данные

Система мощностью $S_c = 2500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ с индуктивным сопротивлением $x_c = 0,2 \text{ о.е.}$ с напряжением на шинах $U_c = 230 \text{ кВ}$; ЭДС $E'' = 1 \text{ о.е.}$ Протяженность воздушных линий со сталеалюминиевыми проводами $l_1 = 100 \text{ км}$, $l_2 = 40 \text{ км}$, $l_3 = 20 \text{ км}$.

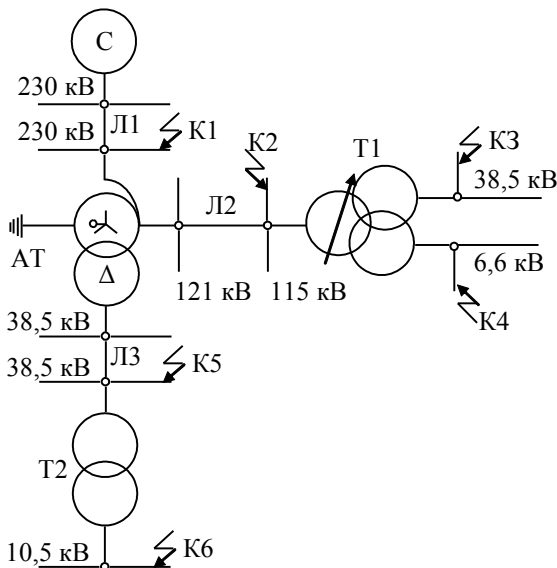


Рис. 5.3. Схема электрических соединений для расчета токов коротких замыканий

Автотрансформатор (АТ), АДЦТН 100000/230, 121, 38,5, мощностью $S_{АТ} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $u_{кВС} = 11\%$, $u_{кВН} = 31\%$, $u_{кСН} = 19\%$, $S_{АТНН} = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\Delta P_{к.з} = 290 \text{ кВт}$.

Трансформатор (Т1), ТДТН 63000/115, 38,5, 6,6, мощностью $S_T = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $u_{кВС} = 10,5\%$, $u_{кВН} = 17\%$, $u_{кСН} = 6,5\%$; $\Delta P_{к.з} = 290 \text{ кВт}$, РПН $\pm 9 \times 1,78\%$.

Трансформатор (Т2), ТД 40000/38,5, 10,5, мощностью $S_T = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $u_k = 8,5\%$, $\Delta P_{к.з} = 165 \text{ кВт}$.

Дополнительные условия:

удельное сопротивление воздушных линий 0,4 Ом/км;

устройство РПН у трансформатора Т1 установлено на 3-й ступени, т. е. напряжение на высокой ступени трансформатора равно $115(1+0,0534) = 121 \text{ кВ}$;

воздушные линии двухцепные;

соотношения между активными и индуктивными сопротивлениями элементов схемы принять по табл. 4.1.

Расчет

Схема замещения соответствует схеме на рис. 5.4.

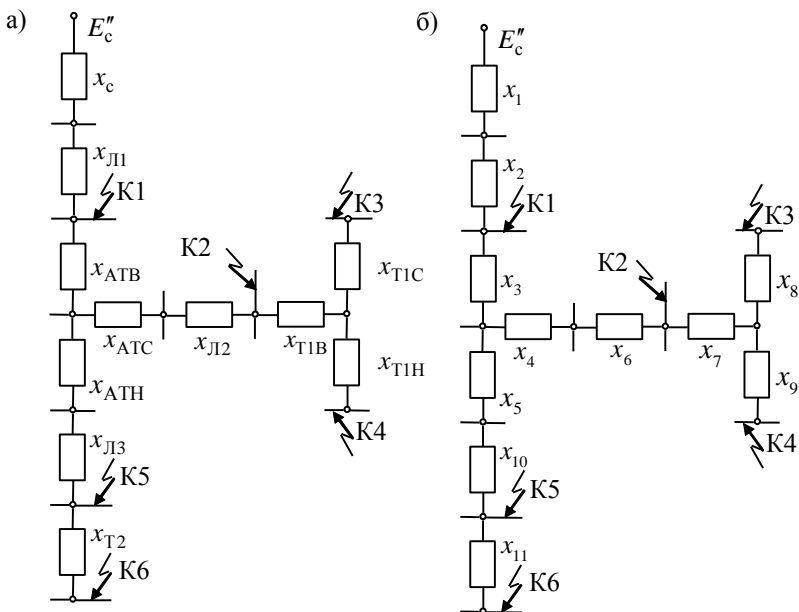


Рис. 5.4. Схемы замещения:

а – параметры с буквенным индексом;

б – параметры с цифровым индексом

Для вычисления сопротивлений схемы принимается базисная мощность $S_6 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и базисные напряжения на ступенях напряжений, где указаны точки к.з.,

$$U_{61} = 230 \text{ кВ}, \quad U_{62} = 121 \text{ кВ}, \quad U_{63} = U_{65} = 38,5 \text{ кВ}, \quad U_{64} = 6,6 \text{ кВ},$$

$$U_{66} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Сопротивления схемы в базисных единицах:

$$\text{сопротивление системы } x_1 = x_c \frac{S_6}{S_c} = 0,2 \frac{1000}{2500} = 0,08;$$

сопротивление линий электропередачи:

$$\text{для Л1} \quad x_2 = \frac{1}{2} x_{уд} l_1 \frac{S_6}{U_{61}^2} = \frac{1}{2} 0,4 \cdot 100 \frac{1000}{230^2} = 0,38;$$

для Л2 $x_6 = \frac{1}{2} 0,4 \cdot 40 \frac{1000}{121^2} = 0,54;$

для Л3 $x_{10} = \frac{1}{2} 0,4 \cdot 20 \frac{1000}{38,5^2} = 2,7;$

сопротивление автотрансформатора

$$x_3 = \frac{u_{кВ}(\%)}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{АТ}} = \frac{11,5}{100} \frac{1000}{100} = 1,15,$$

где $u_{кВ}(\%) = 0,5(u_{кВС} + u_{кВН} - u_{кСН})\% = 0,5(11 + 31 - 9) = 11,5;$

$$x_4 = \frac{-0,5}{100} \frac{1000}{100} = -0,05,$$

где $u_{кС}(\%) = 0,5 \cdot (u_{кВС} + u_{кСН} - u_{кВН})\% = 0,5(11 + 19 - 31) = -0,5;$

$$x_5 = \frac{19,5}{100} \frac{1000}{50} = 3,9,$$

где $u_{кН}(\%) = 0,5 \cdot (u_{кВН} + u_{кСН} - u_{кВС})\% = 0,5(31 + 19 - 11) = 19,5,$

$$S_{АТНН} = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

(если $S_{АТНН}$ не дано, то $S_{АТНН} = \kappa_{тип} S_{АТ}$, где $\kappa_{тип} = \frac{S_{АТ.тип}}{S_{АТ.ном}}$);

сопротивление трехобмоточного трансформатора Т1

$$x_{7 \text{ ном}} = \frac{u_{кВ}(\%)}{100} \frac{S_{\delta}}{S_T} = \frac{10,5}{100} \frac{1000}{63} = 1,67,$$

где $u_{кВ}(\%) = 0,5(u_{кВС} + u_{кВН} - u_{кСН})\% = 0,5(10,5 + 17 - 6,5) = 10,5\% ,$

$x_{7 \text{ ном}}$ – сопротивление для $U = 115 \text{ кВ};$

приведенное сопротивление к 121 кВ (с учетом ступеней РПН)

$$x_7 = x_{7 \text{ ном}} \left(\frac{U_{ТВ.ном}}{U_{ТВ.РПН}} \right)^2 = 1,67 \left(\frac{115}{121} \right)^2 = 1,57,$$

$x_8 = 0,$ так как

$$u_{кС}(\%) = 0,5(u_{кВС} + u_{кСН} - u_{кВН}) = 0,5(10,5 + 6,5 - 17) = 0,$$

$$x_9 = \frac{6,5}{100} \frac{1000}{63} = 1,03,$$

где $u_{кН}(\%) = 0,5(u_{кВН} + u_{кСН} - u_{кВС})\% = 0,5(17 + 6,5 - 10,5) = 6,5;$

сопротивление трансформатора Т2

$$x_{11} = \frac{u_{к}(\%)}{100} \frac{S_{\delta}}{S_T} = \frac{8,5}{100} \frac{1000}{40} = 2,12.$$

1. Начальное значение периодической составляющей - начальный сверхпереходный ток

для точки к.з. К1

$$I_1'' = \frac{E_c''}{x_{рез1}} I_{б1} = \frac{1}{0,46} 2,51 = 5,46 \text{ кА},$$

где $x_{рез1} = x_1 + x_2 = 0,08 + 0,38 = 0,46$;

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,51 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов для остальных точек к.з. сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Условные обозначения	Точки к.з.					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
$x_{рез \text{ о.е.}}$	0,46	2,2	3,77	4,9	8,21	10,33
$U_{б}, \text{ кВ}$	230	121	38,5	6,6	38,5	10,5
$I_{б}, \text{ кА}$	2,51	4,78	15	87,6	15	55
$I'', \text{ кА}$	5,46	2,17	3,9	17,8	1,82	5,33

2. Ударный ток к.з.

Для расчета ударного тока к.з. $i_y = \sqrt{2}k_y I''$, $k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$ следует знать активные сопротивления элементов схемы чтобы вычислить электромагнитные постоянные времени T_a , либо обратиться к соотношениям активных и индуктивных сопротивлений элементов схемы, приведенных в табл. 4.1.

По этой таблице принимается для системы $r_c = 0,02x_c$,

для автотрансформатора АТ $r_{АТ} = 0,03x_{АТ}$,

для трансформатора Т1 $r_{Т1} = 0,04x_{Т1}$,

для трансформатора Т2 $r_{Т2} = 0,06x_{Т2}$,

для воздушных линий:

Л1 $r_{Л1} = 0,125x_{Л1}$,

Л2 $r_{Л2} = 0,3x_{Л2}$,

Л3 $r_{Л3} = 0,5x_{Л3}$.

Схема замещения для активных сопротивлений, соответствует схеме рис. 5.4, б.

Сопротивления, вычисленные по вышеприведенным соотношениям, равны

$$r_1 = 1,6 \cdot 10^{-3}, r_2 = 0,0475, r_3 = 0,0345, r_4 = -1,5 \cdot 10^{-3},$$

$$r_5 = 0,117, r_6 = 0,162, r_7 = 0,067, r_8 = 0,012, r_9 = 0,04,$$

$$r_{10} = 1,35, r_{11} = 0,127.$$

Электромагнитная постоянная времени цепи относительно точки к.з. К1

$$T_{a1} = \frac{x_{рез1}}{\omega r_{рез1}} = \frac{0,46}{314 \cdot 0,05} = 0,029 \text{ с},$$

где $r_{рез1} = r_1 + r_2 = 0,0016 + 0,0475 \cong 0,05$.

Ударный коэффициент

$$k_{y1} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,029}} = 1 + 0,71 = 1,71$$

и ударный ток

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot 1,71 \cdot 5,46 = 12,2 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов ударного тока для остальных точек к.з. помещены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Условные обозначения	Точки к.з.					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
$x_{рез}$	0,46	2,2	3,87	4,9	8,21	10,33
$r_{рез}$	0,05	0,24	0,32	0,35	1,55	1,68
$T_a, \text{ с}$	0,029	0,028	0,04	0,044	0,017	0,019
$e^{-\frac{0,01}{T_a}}$	0,71	0,7	0,78	0,79	0,55	0,59
k_y	1,71	1,7	1,78	1,79	1,55	1,59
$I'', \text{ кА}$	5,46	2,17	3,9	17,8	1,82	5,33
$i_y, \text{ кА}$	13,2	5,2	9,78	45,0	3,98	12,0

3. Действующее значение периодической составляющей тока к.з. для времени 0,1 с

Расчет этой величины производится методом расчетных кривых, приведенных на рис. 5.1, в указанной ниже последовательности:

1) вычисляется отношение действующего значения периодической составляющей (сверхпереходный ток) в данном луче к номинальному току луча

$$I_{п0(ном)*} = \frac{I''}{I_{Л.ном}},$$

где $I_{Л.ном} = \frac{S_{Л.ном}}{\sqrt{3}U_{ном}}$, кА.

При численном значении отношения меньше единицы точку к.з. считают удаленной и периодическую составляющую в начальный момент времени (I'') считают неизменной до заданного момента времени, т. е.

$$I'' = I_{пт}, \text{ кА.}$$

Для точки к.з. К1

$$I_{п01*} = \frac{I_1''}{I_{Л1ном}} = \frac{5,46}{6,28} = 0,87,$$

где $I_{Л1ном} = \frac{S_c}{\sqrt{3}U_1} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 230} = 6,28 \text{ кА.}$

Результаты расчетов для остальных точек к.з. сведены в табл.5.3. Как видно из таблицы все отношения $I_{п0*}$ меньше единицы, т. е. действующие значения периодической составляющей на момент времени $\tau = 0,1 \text{ с}$ остаются неизменными и равными I'' , которые указаны в табл. 5.3, т. е. $I_{0,1} = I''$.

Таблица 5.3

Условные обозначения	Точки к.з.					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
I'' , кА	5,46	2,17	3,88	17,8	1,82	5,33
$I_{Л.ном}$, кА	6,28	11,94	37,5	218,9	37,5	137,6
$I_{п0*}$	0,87	0,18	0,103	0,08	0,048	0,038
$I_{0,1}$, кА	5,46	2,17	3,9	17,8	1,82	5,33

4. Аperiodическая составляющая тока к.з. для заданного момента времени 0,1 с

Аperiodическая составляющая тока к.з. для заданного момента времени рассчитывается при помощи коэффициента затухания γ :

$$i_{a0,1} = \sqrt{2}\gamma I'', \text{ кА.}$$

Для точки к.з. К1

$$i_{a10,1} = \sqrt{2}\gamma_1 I_1'' = \sqrt{2} \cdot 0,03 \cdot 5,46 = 0,23 \text{ кА,}$$

где $\gamma_1 = e^{-\frac{0,1}{T_{a1}}} = e^{-\frac{0,1}{0,029}} = 0,03$.

Результаты расчетов для остальных точек к.з. сведены в табл.5.4.

Таблица 5.4

Условные обозначения	Точки к.з.					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
γ	0,03	0,028	0,082	0,103	0,003	0,005
I'' , кА	5,46	2,17	3,9	17,8	1,82	5,33
$i_{a0,1}$, кА	0,23	0,086	0,448	2,58	0,007	0,04
$I_{0,1}$, кА	7,93	3,14	5,92	27,7	2,57	7,55

5. Полный ток к.з. для момента времени 0,1 с

Полный ток к.з. в указанных точках к.з. для момента времени 0,1с является суммой амплитудного значения периодической и аperiodической составляющих тока к.з.

$$I_{0,1} = \sqrt{2}I_{п0,1} + i_{a0,1}, \text{ кА}.$$

Для точки к.з. К1

$$I_{10,1} = \sqrt{2} \cdot 5,46 + 0,23 = 7,93 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов для остальных точек к.з. помещены в табл. 5.4.

Полученные значения токов к.з. предназначены для проверки электрооборудования в указанных точках к.з. по стойкости к токам трехфазного короткого замыкания.

§ 5.3. Пример расчета токов при трехфазном коротком замыкании в системе электроснабжения с синхронными генераторами

Для схемы электрических соединений (рис. 5.5) требуется рассчитать:

- 1) начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в точках К1-К4;
- 2) ударный ток короткого замыкания в точках К2, К3;
- 3) действующие значения периодической составляющей тока к.з. для времени 0,1 с в точке К2;

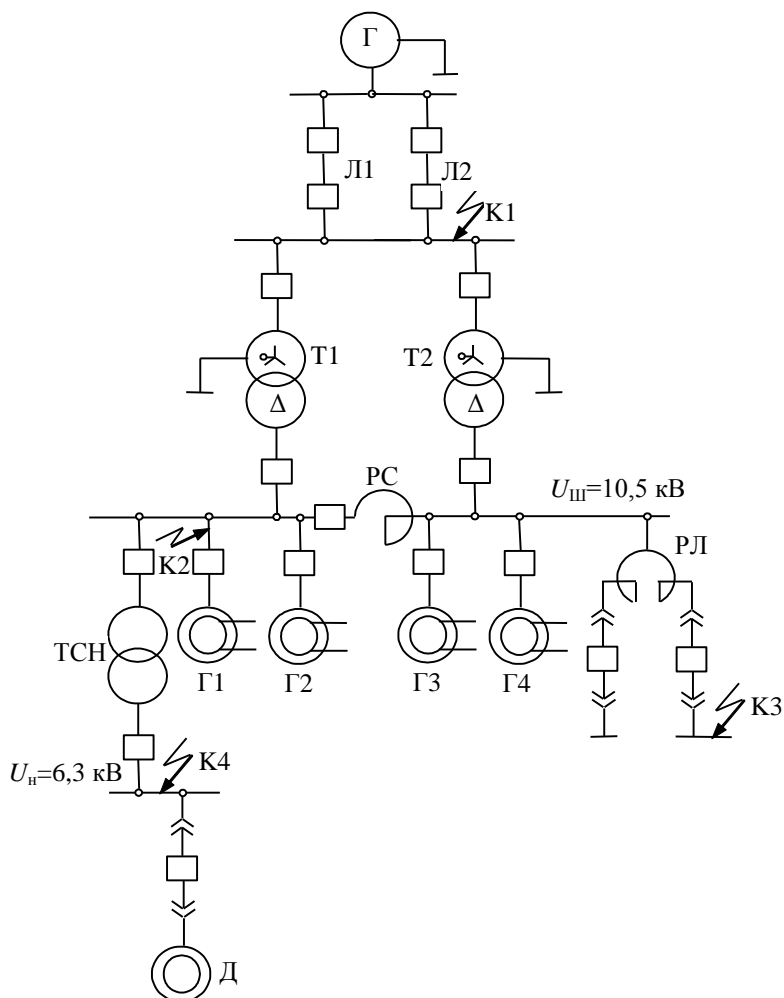


Рис. 5.5. Схема электрических соединений

4) значения аperiodической составляющей тока к.з. для времени 0,1 с (время действия релейной защиты и собственное время выключателя) в точке К2.

Исходные данные

Система мощностью 4000 МВ·А с индуктивным сопротивлением $x_c = 0,4$ о.е.

Генераторы (Г), 4 шт., ТВФ-63-2У3 мощностью 63 МВт, при 3000 об/мин, напряжение 10,5 кВ, $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 98,4\%$, $x_d'' = 20\%$, $x_d' = 30\%$, $x_d = 191\%$, $x_2 = 24\%$, $x_0 = 10\%$, $T_{d0} = 6,2$ с.

Трансформаторы (Т), 2 шт., ТДЦ-125000/110 мощностью 125 МВ·А, напряжение высокой стороны $U_B = 121$ кВ, напряжение низкой стороны $U_H = 10,5$ кВ, $u_k = 10,5\%$, $\Delta P_{кз} = 400$ кВт, $\Delta P_{x,x} = 120$ кВт, $I_{x,x} = 0,45\%$.

Линии электропередачи две, воздушные (Л), напряжением 110 кВ, протяженностью 100 км.

Трансформатор собственных нужд электростанции (ТСН) ТДНС-10000/35, мощностью 10 МВ·А, напряжение высокой стороны $U_B = 10,5$ кВ, напряжение низкой стороны $U_H = 6,3$ кВ, $u_k = 8\%$, $\Delta P_{кз} = 80$ кВт, $\Delta P_{x,x} = 12$ кВт, $I_{x,x} = 0,7\%$.

Реактор секционный (РС) мощностью 51,9 МВ·А, напряжение $U_{ном} = 10$ кВ, сопротивление $x_p = 12\%$.

Реактор линейный (сдвоенный) (РЛ) мощностью 10,4 МВ·А, напряжение $U_{ном} = 10$ кВ, сопротивление $x_{0,5к} = 4\%$.

Электродвигатель (Д) 2А3М/4000 мощностью 4 МВт, напряжение 6 кВ, частота вращения 2985 об/мин, $\eta = 96\%$, $\cos \varphi = 0,91$, $k_i = 6,3$.

Дополнительные условия следующие:

генераторы работают с номинальной нагрузкой при $U_{ном} = 10,5$ кВ;

генераторы имеют тиристорную систему возбуждения;

частота вращения генератора при к.з. не изменяется;

ЭДС системы принимается в базисных единицах (б.е.) $E_c'' = 1$; ЭДС

электродвигателя равна $E_D'' = 0,9$;

удельное сопротивление воздушной линии электропередачи имеет значение 0,4 Ом/км;

сопротивления обратной и нулевой последовательности системы равны $x_1 = x_2 = x_0$, для воздушных линий $x_0 = 5,5x_1$;

расчет начального значения тока трехфазного к.з. в точках К3 и К4 выполнить приближенно, принимая ЭДС системы и генераторов равным единице;

значение ударного коэффициента за линейным реактором генераторного напряжения 10,5 кВ принять $k_{yP} = 1,93$; на шинах собственных нужд 6,3 кВ - $k_{yШ} = 1,8$; для ветви электродвигателя - $k_{yД} = 1,75$.

Расчет

Схема замещения соответствует рис. 5.6. Для вычисления сопротивлений элементов схемы принимается базисная мощность $S_б = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и производятся вычисления в относительных базисных единицах; базисные напряжения на ступенях напряжения, где указаны точки к.з.

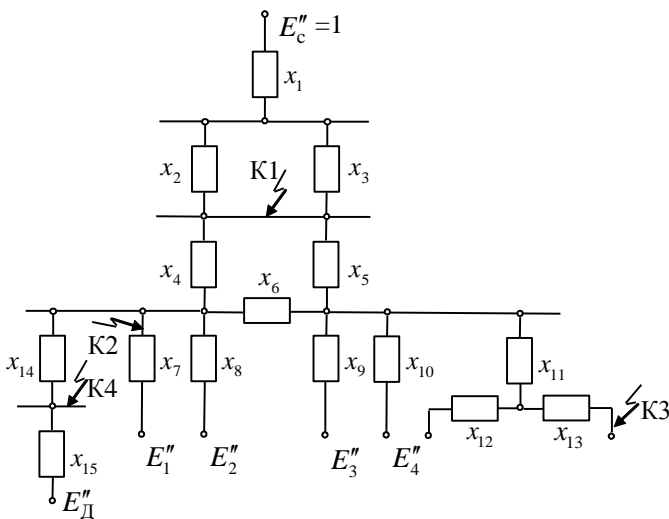


Рис. 5.6. Общая схема замещения

Сопротивление системы

$$x_1 = x_c \frac{S_б}{S_c} 0,4 \frac{1000}{4000} = 0,1.$$

Сопrotивление линий Л1, Л2 (см. рис. 5.5)

$$x_2 = x_3 = x_{yД} \cdot I \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}1}^2} = 0,4 \cdot 100 \frac{1000}{121^2} = 2,7,$$

где $U_{\bar{6}1} = U_{ТВ} = 121$ кВ.

Сопrotивление трансформаторов Т1, Т2

$$x_4 = x_5 = \frac{u_{к} S_{\bar{6}}}{100 \cdot S_{Т.НОМ}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 0,84.$$

Сопrotивление реактора РС

$$x_6 = \frac{x_{р}}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{Р.НОМ}} \left(\frac{U_{Р.НОМ}}{U_{\bar{6}}} \right)^2 = \frac{12}{100} \frac{1000}{51,9} \left(\frac{10}{10,5} \right)^2 = 2,1,$$

где $U_{\bar{6}2} = U_{Г.НОМ} = 10,5$ кВ.

Сопrotивление генераторов Г

$$x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = \frac{x'_d S_{\bar{6}}}{100 \cdot S_{Г.НОМ}} = \frac{20}{100} \frac{1000}{79} = 2,5.$$

Сопrotивление реактора РЛ

$$x_{0,5} = \frac{x_{0,5к}}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{Р.НОМ}} \left(\frac{U_{Р.НОМ}}{U_{\bar{6}3}} \right)^3 = \frac{4}{100} \cdot \frac{1000}{10,4} \left(\frac{10}{10,5} \right)^2 = 3,5,$$

где $x_{0,5к} = 4\%$,

$$x_{11} = -0,5x_{0,5} = -1,75; \quad x_{12} = x_{13} = 1,5x_{0,5} = 5,25.$$

Сопrotивление трансформатора ТСН

$$x_{14} = \frac{u_{к} S_{\bar{6}}}{100 S_{Т.НОМ}} = \frac{7,5 \cdot 1000}{100 \cdot 10} = 7,5.$$

Сопrotивление электродвигателя Д, приведенное к $U_{\bar{6}4} = U_{III} = 6,3$ кВ,

$$x_{15} = \frac{1}{\kappa_i} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{Д}} \left(\frac{U_{Д.НОМ}}{U_{\bar{6}4}} \right)^2 = \frac{1}{6,3} \frac{1000}{4,6} \left(\frac{6}{6,3} \right)^2 = 31,$$

где $S_{Д} = \frac{P_{Д}}{\eta_{Д} \cos \varphi_{Д}} = \frac{4}{0,96 \cdot 0,91} = 4,6; \quad \kappa_i = \frac{I_{пуск}}{I_{Д.НОМ}} = 6,3.$

Начальное значение периодической составляющей тока при трехфазном коротком замыкании.

Короткое замыкание в точке К1

Ветви генераторов равной мощности могут быть объединены в этом случае следующим образом (рис. 5.7)

$$x_{16} = \frac{x_7}{2} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \text{ для } \Gamma 1 \text{ и } \Gamma 2$$

и

$$x_{17} = 1,25 \text{ для } \Gamma 3 \text{ и } \Gamma 4.$$

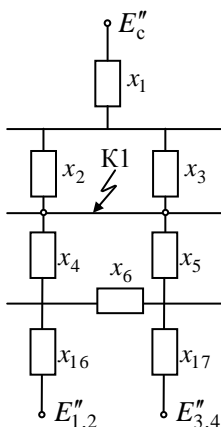


Рис. 5.7. Схема замещения для точки к.з. К1

Новые ветви с сопротивлениями x_{16} и x_{17} симметричны по отношению к точке К1, и поэтому, исключая сопротивление реактора x_6 , имеем схему рис. 5.8, в которой

$$x_{\text{рез.с}} = x_1 + \frac{x_2 x_3}{x_2 + x_3} = 0,1 + \frac{2,7}{2} = 1,45,$$

$$x_{\text{рез.}\Gamma} = \frac{x_4 + x_{16}}{2} = \frac{2,1}{2} = 1,05.$$

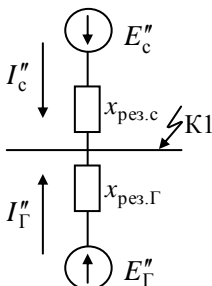


Рис. 5.8. Схема замещения после «свертывания»

Начальное значение периодической составляющей тока к.з. от системы при $E_c'' = 1$

$$I_c'' = \frac{E_c''}{x_{рез.с}} I_{61} = \frac{1}{1,45} 4,78 = 3,3 \text{ кА},$$

где для точки К1

$$I_{61} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{61}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 121} = 4,78.$$

Начальное значение периодической составляющей тока к.з. от генераторов

$$I_Г'' = \frac{E_Г''}{x_{рез.Г}} I_{61} = \frac{1,13}{1,05} 4,78 = 5,1 \text{ кА},$$

где $E_Г''$ для номинального режима в относительных базисных единицах

$$E_Г'' = \sqrt{(1 + x_d'' Q_Г)^2 + (x_d'' P_Г)^2} = \sqrt{(1 + 0,2 \cdot 0,6)^2 + (0,2 \cdot 0,8)^2} = 1,13 \text{ о.е.},$$

$$\text{где } Q_Г = \frac{Q_{Г.ном}}{S_{Г.ном}} = \frac{47,2}{79} = 0,6 \text{ о.е.}, \quad P_Г = \frac{P_{Г.ном}}{S_{Г.ном}} = \frac{63}{79} = 0,8 \text{ о.е.}$$

Суммарное значение начального тока к.з. в точке К1

$$I_{К1}'' = I_c'' + I_Г'' = 3,3 + 5,1 = 8,4 \text{ кА}.$$

Короткое замыкание в точке К2

Короткое замыкание считается на выводах генератора Г1 и схема замещения сворачивается к этой точке к.з. (рис. 5.9, а, б) – расчет по индивидуальному изменению токов к.з.

Общее сопротивление линий

$$x_{18} = \frac{x_2}{2} = \frac{2,7}{2} = 1,35.$$

Далее производится преобразование треугольника сопротивлений x_4, x_5, x_6 (см. рис.5.6) в эквивалентную звезду по формулам

$$x_{19} = \frac{x_4 x_5}{x_4 + x_5 + x_6} = \frac{0,84 \cdot 0,84}{3,78} = 0,18;$$

$$x_{20} = \frac{x_4 x_6}{x_\Sigma} = \frac{0,84 \cdot 2,1}{3,78} = 0,47, \quad x_{21} = 0,47.$$

Результирующие сопротивления для ветвей системы и генераторов Г2, Г3 определяются по рис. 5.9, а

$$x_{22} = x_1 + x_{18} + x_{19} = 0,1 + 1,35 + 0,18 = 1,63;$$

$$x_{23} = x_{17} + x_{21} = 1,25 + 0,47 = 1,72.$$

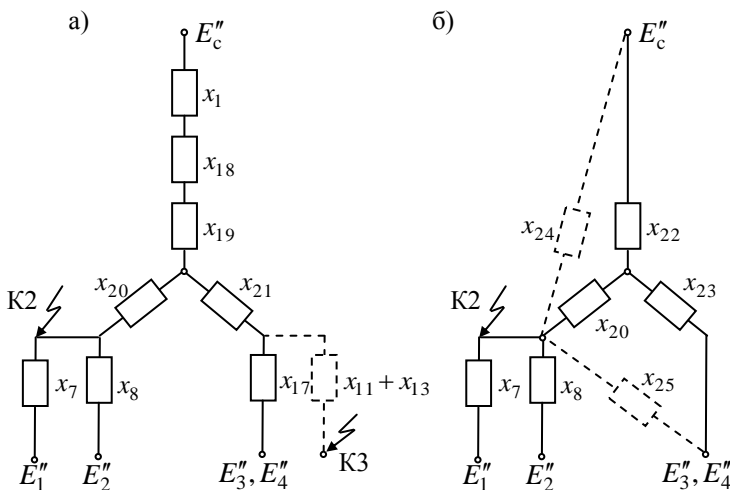


Рис. 5.9. Схемы замещения

Ветви системы и генераторов приводятся к точке K2 по рис. 5.9, б. Эквивалентное сопротивление ветвей

$$x_3 = \frac{x_{22} x_{23}}{x_{22} + x_{23}} = \frac{1,63 \cdot 1,72}{1,63 + 1,72} = 0,84.$$

Коэффициент токораспределения по ветвям - согласно формулам

$$c_c = \frac{x_3}{x_{22}} = \frac{0,84}{1,63} = 0,51, \quad c_{3,4} = \frac{x_3}{x_{23}} = \frac{0,84}{1,72} = 0,49.$$

Проверка: $c_c + c_{3,4} = 0,51 + 0,49 = 1$.

Результирующее сопротивление

$$x_{\text{рез}} = x_3 + x_{20} = 0,84 + 0,47 = 1,31.$$

Сопротивление ветвей относительно точки К2

$$x_{24} = \frac{x_{\text{рез}}}{c_c} = \frac{1,31}{0,51} = 2,6 \text{ - ветвь системы;}$$

$$x_{25} = \frac{x_{\text{рез}}}{c_{3,4}} = \frac{1,31}{0,49} = 2,7 \text{ - ветвь генераторов Г3, Г4.}$$

Начальное значение тока к.з. от системы в точке К2

$$I_c'' = \frac{E_c''}{x_{24}} I_6 = \frac{1}{2,6} 55 = 21 \text{ кА,}$$

где для точки К2

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{62}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА.}$$

Ток к.з. общий от генераторов Г3 и Г4

$$I_{3,4}'' = \frac{E_{\Gamma}''}{x_{25}} I_{62}'' = \frac{1,13}{2,7} 55 = 23 \text{ кА.}$$

Ток к.з. от каждого генератора Г1, Г2

$$I_1'' = I_2'' = \frac{E_{\Gamma}''}{x_7} I_{62}'' = \frac{1,13}{2,7} 55 = 25 \text{ кА.}$$

Суммарный ток к.з. в точке К2 от системы и генераторов Г2, Г3, Г4 (со стороны шин)

$$I_{\text{К2}}'' = I_c'' + I_{3,4}'' + I_2'' = 21 + 23 + 25 = 69 \text{ кА.}$$

Короткое замыкание в точке К3

Расчет для «удаленной» точки к.з. производится приближенно с учетом дополнительного условия $E_c'' = 1$ и $E_{\Gamma}'' = 1$.

Схема замещения преобразуется к однолучевой схеме замещения (расчет по общему изменению токов к.з.).

Сопротивление ветви генераторов Г1, Г2 и системы (см. рис. 5.9, а):

$$x_{26} = x_{16} + x_{20} = 1,25 + 0,47 = 1,72;$$

$$x_{27} = \frac{x_{22} \cdot x_{26}}{x_{22} + x_{26}} = \frac{1,63 \cdot 1,72}{1,63 + 1,72} = 0,84 \text{ (рис. 5.10, а, б);}$$

$$x_{28} = x_{21} + x_{27} = 0,47 + 0,84 = 1,31.$$

Сопrotивление ветви системы и всех генераторов (рис. 5.10, б)

$$x_{29} = \frac{x_{17}x_{28}}{x_{17} + x_{28}} = \frac{1,25 \cdot 1,31}{1,25 + 1,31} = 0,64.$$

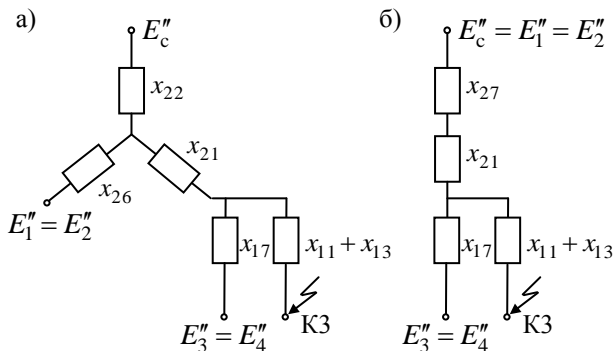


Рис. 5.10. Схемы замещения

Сопrotивление однолучевой схемы (рис. 5.11, а)

$$x_{30} = x_{29} + x_{11} + x_{13} = 0,64 + 1,75 + 5,25 = 4,14.$$

Начальное значение тока к.з. в точке К3

$$I''_{кз} = \frac{E''}{x_{30}} I_{63} = \frac{1}{4,14} 55 = 13,3 \text{ кА},$$

где $I_{63} = I_{62}$, так как $U_{63} = U_{62} = 10,5 \text{ кВ}$.

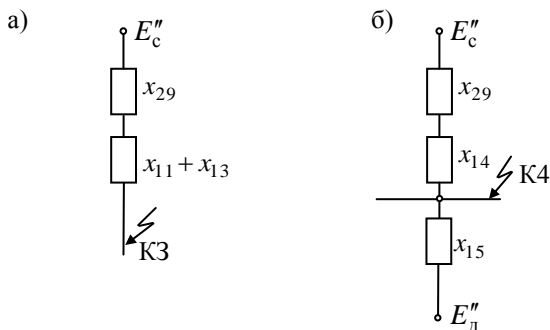


Рис. 5.11. Схемы замещения

Короткое замыкание в точке К4

Расчет для точки К4 подобен расчету для точки К3. Так как расчетная схема относительно этих точек одна и та же, то сопротивление однолучевой схемы со стороны системы и генераторов равно (рис. 5.11, б)

$$x_{31} = x_{29} + x_{14} = 0,64 + 7,5 = 8,14.$$

Схема замещения принимает вид двухлучевой схемы. Сопротивление одного луча равно $x_{31} = 8,14$, а другого - $x_{15} = 31$.

Начальный ток к.з. в первом луче

$$I''_{с-Г} = \frac{E''}{x_{31}} I_{64} = \frac{1}{8,14} 92 = 11,3 \text{ кА},$$

где для точки К4

$$I_{64} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{64}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 92 \text{ кА}.$$

Начальный ток к.з. ветви электродвигателя

$$I''_{Д} = \frac{E''_{Д}}{x_{15}} I_{64} = \frac{0,9}{31} 92 = 2,7 \text{ кА}.$$

Суммарный ток к.з. в точке К4

$$I''_{К4} = I''_{с-Г} + I''_{Д} = 11,3 + 2,7 = 14 \text{ кА}.$$

Ударный ток трехфазного короткого замыкания

Для расчета ударного тока необходимо знать активные сопротивления элементов схемы. Величины этих сопротивлений принимаются по соотношениям r/x , приведенным в табл. 4.1,

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,002, \quad r_2 = r_3 = 0,7, \quad r_4 = r_5 = 0,03, \quad r_6 = 0,05, \\ r_7 = r_8 = r_9 = r_{10} &= 0,05, \quad r_{11} = -0,035, \quad r_{12} = r_{13} = 0,105, \\ r_{16} = r_{17} &= 0,025. \end{aligned}$$

Короткое замыкание в точке К2

Общее сопротивление линий

$$r_{18} = \frac{r_2}{2} = \frac{0,7}{2} = 0,35.$$

Сопротивления эквивалентной схемы для треугольника сопротивлений r_4, r_5, r_6 (см. рис. 5.6)

$$r_{19} = \frac{r_4 r_5}{r_{\Sigma}} = \frac{0,03 \cdot 0,03}{0,03 + 0,03 + 0,05} = 0,008,$$

$$r_{20} = \frac{r_4 r_6}{r_{\Sigma}} = \frac{0,03 \cdot 0,05}{0,11} = 0,014,$$

$$r_{21} = 0,014.$$

Сопротивления ветвей системы и генераторов Г3, Г4

$$r_{22} = r_1 + r_{18} + r_{19} = 0,002 + 0,35 + 0,008 = 0,36;$$

$$r_{23} = r_{17} + r_{21} = 0,025 + 0,014 = 0,039.$$

Эквивалентное сопротивление ветвей

$$r_3 = \frac{r_{22} r_{23}}{r_{22} + r_{23}} = \frac{0,36 \cdot 0,039}{0,4} = 0,035.$$

Коэффициенты токораспределения

$$c_c = \frac{r_3}{r_{22}} = \frac{0,035}{0,36} = 0,1, \quad c_{3,4} = \frac{r_3}{r_{23}} = \frac{0,035}{0,039} = 0,9.$$

Результирующее сопротивление

$$r_{\text{рез}} = r_3 + r_{20} = 0,035 + 0,014 = 0,05.$$

Сопротивление ветвей от источников энергии к точке К2

$$r_{24} = \frac{r_{\text{рез}}}{c_c} = \frac{0,05}{0,1} = 0,5, \quad r_{25} = 0,055.$$

Постоянные времени ветвей:

$$T_{ac} = \frac{x_{24}}{\omega r_{24}} = \frac{2,6}{314 \cdot 0,5} = 0,0165 \text{ с};$$

$$T_{a3,4} = \frac{x_{25}}{\omega r_{25}} = \frac{2,7}{314 \cdot 0,055} = 0,156 \text{ с};$$

$$T_{a1} = T_{a2} = \frac{x_8}{\omega r_8} = \frac{2,5}{314 \cdot 0,05} = 0,16 \text{ с}.$$

Ударные коэффициенты определяются по формуле

$$k_{y.c} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}},$$

$$k_{y.c} = 1,54, \quad k_{y3,4} = 1,94, \quad k_{y1} = k_{y2} = 1,94.$$

Ударные токи в ветвях, кА:

$$i_{y.c} = \sqrt{2} \cdot k_{y.c} I_c'' = \sqrt{2} \cdot 1,54 \cdot 21 = 45,6;$$

$$i_{y3,4} = \sqrt{2} \cdot 1,94 \cdot 23 = 63;$$

$$i_{y1} = i_{y2} = \sqrt{2} \cdot 1,94 \cdot 25 = 68,4.$$

Суммарный ударный ток в точке К2 со стороны шин

$$i_{y,K2} = 45,6 + 63 + 68,4 = 177 \text{ кА} .$$

Короткое замыкание в точке К3

Ударный ток короткого замыкания

$$i_{y,\Gamma} = \sqrt{2}k_{y,P}I''_{к3} = \sqrt{2} \cdot 1,93 \cdot 13,3 = 36,2 \text{ кА} ,$$

где $k_{y,P} = 1,93$ - по условию задачи.

Действующее значение периодической и аperiodической составляющих тока трехфазного короткого замыкания для времени $\tau = 0,1$ с

Короткое замыкание в точке К2

Рассматривается короткое замыкание на выводах генератора Г1.

Отношение начального значения периодической составляющей тока к номинальному току луча системы

$$I_{п0(ном)с} = \frac{I''_c}{I_{Л.ном}} = \frac{21}{220} = 0,095 ,$$

где $I''_c = 21 \text{ кА}$ - из расчета начального значения тока к.з.;

$$I_{Л.ном} \frac{S_c}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 220 \text{ кА} .$$

Обращаемся к графикам рис. 5.1.

Так как $I_{п0(ном)} < 1$, то в этом случае действующее значение периодической составляющей для времени 0,1 с равно начальному значению тока к.з.

$$I_{птс} = I''_c = 21 \text{ кА} .$$

Для луча генераторов Г3, Г4

$$I_{п0(ном)3,4} = \frac{I''_{3,4}}{I_{Л3,4ном}} = \frac{23}{8,7} = 2,64 ,$$

где ток $I''_{3,4} = 23 \text{ кА}$ из расчета начального значения тока к.з.;

$$I_{Л3,4ном} = \frac{\sum S_{3,4}}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = \frac{2 \cdot 79}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 8,7 \text{ кА} ;$$

по графикам рис. 5.1 для $\tau = 0,1$ с определяется

$$\gamma_{т3,4} = 0,9 .$$

Действующее значение периодической составляющей в луче генераторов Г3, Г4

$$I_{пт3,4} = \gamma_{т3,4} I''_{3,4} = 0,9 \cdot 23 = 20,7 \text{ кА}.$$

Для луча генератора Г1 (а также и для Г2)

$$I_{п0(ном)1} = \frac{I''_1}{I_{Л1ном}} = \frac{25}{4,35} = 5,75 \text{ кА},$$

где $I''_1 = 25 \text{ кА}$ из расчета начального значения тока к.з.;

$$I_{Л1ном} = \frac{S_1}{\sqrt{3}U_{ном}} \frac{79}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4,35 \text{ кА},$$

по графикам рис. 5.1. для $\tau = 0,1 \text{ с}$ определяется

$$\gamma_{т1} = 0,75.$$

Действующее значение периодической составляющей от генератора Г1 (а также и для Г2) по

$$I_{пт1} = \gamma_{т1} I''_1 = 0,75 \cdot 25 = 18,7 \text{ кА};$$

$$I_{пт2} = 18,7 \text{ кА}.$$

Суммарное значение периодической составляющей тока к.з. со стороны шин в точке К2

$$I_{п\Sigma} = I_{птс} + I_{пт3,4} + I_{пт2} = 21 + 20,7 + 18,7 = 60,4 \text{ кА}.$$

Апериодическая составляющая тока короткого замыкания для $\tau = 0,1 \text{ с}$ рассчитывается при помощи коэффициентов затухания

$$\gamma = e^{-\frac{0,1}{T_a}},$$

где $T_a = \frac{x}{\omega r}$;

в ветви системы для $T_{a,c} = 0,0165 \text{ с}$ (из примера расчета ударного тока к.з.) коэффициент затухания $\gamma_c = 0,0023$,

в ветви Г3 и Г4 для $T_{a,3,4} = 0,156 \text{ с}$ коэффициент затухания $\gamma_{3,4} = 0,53$,

в ветви Г2 для $T_{a2} = 0,16 \text{ с}$ коэффициент затухания $\gamma_2 = 0,53$; также для Г1 $\gamma_1 = 0,53$.

Апериодическая составляющая тока к.з. в точке К2 для времени $\tau = 0,1 \text{ с}$:

$$\text{от системы } i_{a,c} = \sqrt{2} \gamma_c I''_c = \sqrt{2} \cdot 0,0023 \cdot 21 = 0,07 \text{ кА};$$

$$\text{от генераторов Г3, Г4 } i_{a3,4} = \sqrt{2} \gamma_{3,4} \cdot I''_{3,4} = \sqrt{2} \cdot 0,53 \cdot 23 = 17,2 \text{ кА};$$

$$\text{от генератора Г2 } i_{a2} = \sqrt{2} \gamma_2 \cdot I''_2 = \sqrt{2} \cdot 0,53 \cdot 18,7 \text{ кА};$$

$$\text{от генератора Г1 } i_{a1} = 18,7 \text{ кА}.$$

Суммарное значение аperiodической составляющей тока к.з. со стороны шин

$$i_a = 0,07 + 17,2 + 18,7 = 36,0 \text{ кА}.$$

Результаты расчета помещены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Точка короткого замыкания	Наименование	$S_{\text{ном}}$, МВ·А	Ток трехфазного короткого замыкания, кА			
			I''	i_y	$I_{п0,1}$	$i_{a0,1}$
К1	Система	4000	3,3			
	Генераторы 1, 2, 3, 4	4×79	5,1			
	Суммарное значение	-	8,4			
К2	Система	4000	21	45,6	21	0,07
	Генераторы 3, 4	2×79	23	63	20,7	17,2
	Генератор 2	1×79	25	68,4	18,7	18,7
	Суммарное значение	-	69	177	60,4	36,0
	Генератор 1	1×79	25	68,4	18,7	18,7
К3	Система	4000				
	Генераторы 1, 2, 3, 4	4×79				
	Суммарное значение	-	13,3	36,2		
К4	Система	4000				
	Генераторы 1, 2, 3, 4	4×79	11,3			
	Электродвигатель	4,6	2,7			
	Суммарное значение	-	14			

§ 5.4. Компьютерная программа для расчета токов короткого замыкания в системе электроснабжения

В настоящее время имеются компьютерные программы для вычисления токов при коротких замыканиях в схемах электроснабжения.

Наиболее удачной и надежной для расчетов токов короткого замыкания является программа GTCURR, разработанная на кафедре «Электрические станции» Московского энергетического института в 1991 г.

Программа позволяет на экране дисплея составить схему электрических соединений, в которой должны рассчитываться токи к.з.

С этой целью на экран выводится «графическое меню», состоящее из условных обозначений команд и изображений элементов схемы (рис. 5.12)

При помощи этого меню составляется нужная для расчетов схема электроснабжения, представленная, как пример, на рис. 5.13.

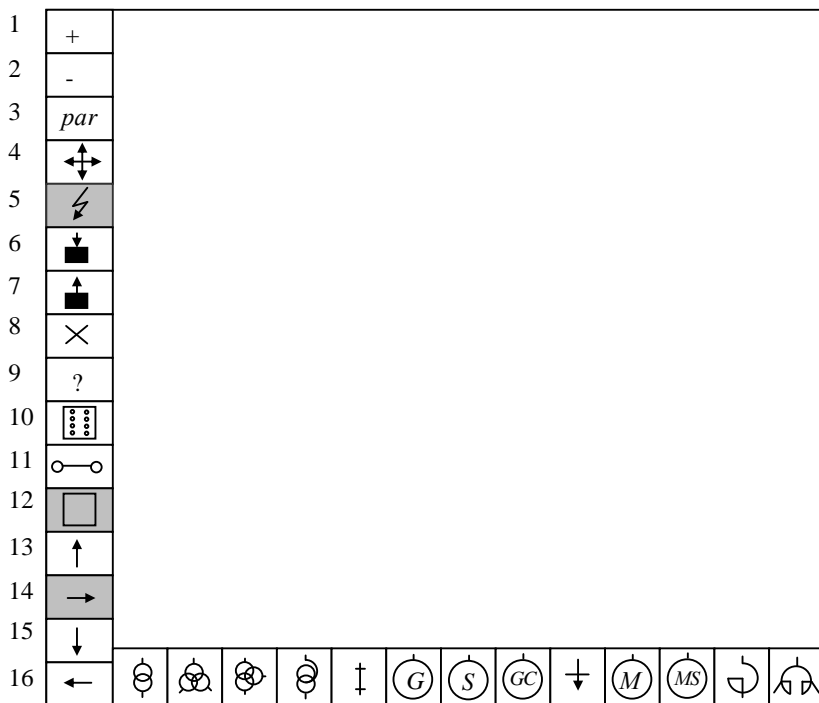


Рис. 5.12. Графическое меню программы для составления схемы электрических соединений:

- 1 – нарисовать элемент схемы; 2 – удалить элемент схемы; 3 – ввод параметров элементов; 4 – направления сдвига схемы; 5 - указания точки к.з. на схеме;
- 6 – вывод на экран данных из памяти; 7 - запись данных с экрана в файл; 8 – завершение работы с программой; 9 – условные обозначения; 10 – распечатка результатов расчета; 11 - задания соединений на схеме; 12 – режим корректировки схемы; 13, 14, 15, 16 – направление выводов элементов оборудования при размещении на экране

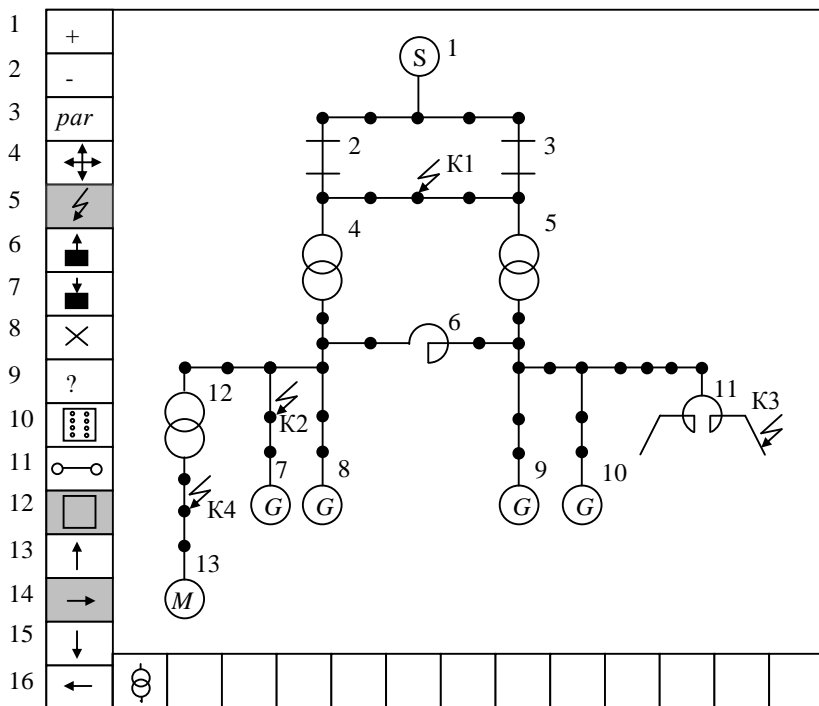



Рис. 5.13. Составленная схема электроснабжения для расчета токов к.з.

Для этой схемы в память компьютера заносят численные значения параметров элементов схемы из подготовленной для этой цели табл. 5.6.

Затем при помощи знака «» графического меню на схеме последовательно указываются точки к.з. (см. рис. 5.13), в которых необходимо рассчитать токи к.з.

Результаты расчетов токов в указанных точках к.з. схемы выводятся на экран дисплея, а затем, при необходимости, распечатываются в виде протокола расчетов (см. табл. 5.7).

Таблица 5.6

Параметры элементов схемы электроснабжения

Наименование	Условное обозначение	Размерность	Численное значение
Система, S	$S_{\text{ном}}$	МВ·А	4000
	x_c	о.е.	0,4
	$K_{\text{уд}}$		1,938
Линия электропередачи, W , при $U_{\text{ном}} = 121$ кВ	l	км	100
	x	Ом/км	0,4
	r	Ом/км	0,102
	число цепей		1
Трансформатор связи, T	$S_{\text{ном}}$	МВ·А	125
	$e_k(u_k)$	%	10,5
	$\Delta P_{\text{к.з}}$	кВт	400
Реактор секционный RS при $U_{\text{ном}} = 10$ кВ	$I_{\text{ном}}$	А	3000
	x_p	Ом	0,23
	ΔP	кВт	75
Генератор, G при $U_{\text{ном}} = 10$ кВ	$P_{\text{ном}}$	МВт	63
	x_d''	о.е.	0,2
	T_a	с	0,162
	$\cos \varphi$		0,8
Реактор сдвоенный, линейный, RL при $U_{\text{ном}} = 10$ кВ	$I_{\text{ном}}$	А	600
	x_p	Ом	0,385
	ΔP	кВт	14,3
	k_c		0,5
Трансформатор собственных нужд, TS	$S_{\text{ном}}$	МВ·А	10
	$e_k, (u_k)$	%	8
	$\Delta P_{\text{к.з}}$	кВт	80
Асинхронный электродвигатель, M при $U_{\text{ном}} = 6$ кВ	$P_{\text{ном}}$	кВт	4000
	$I_{\text{пуск}}$	о.е.	6,3
	КПД	%	96
	$\cos \varphi$		0,91

Таблица 5.7

Протокол расчета токов к.з. в точках К1-К4 схемы электроснабжения, (см. рис. 5.13)

Номер элемента	Обозначение элемента	Исходные параметры	Расчетные параметры		
			R, о.е.	X, о.е.	E, о.е.
1. Система	S	$S_{\text{НОМ}} = 4000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $X_c = .400 \text{ о.е.}$ $K_{\text{уд}} = 1.938$	.0020	.100	1.000
2. Линия	L1	$I = 100.0 \text{ кМ}$ $X = .400 \text{ Ом/кМ}$ $R = .1020 \text{ Ом/кМ}$ $U_{\text{ср.ном}} = 121.0 \text{ кВ}$ Число цепей 1	.6967	2.732	
3. Линия	L2	$I = 100.0 \text{ кМ}$ $X = .400 \text{ Ом/кМ}$ $R = .1020 \text{ Ом/кМ}$ $U_{\text{ср.ном}} = 121.0 \text{ кВ}$ Число цепей 1	.6967	2.732	
4. Трансформатор	T1	$S_{\text{НОМ}} = 125.0 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_k = 10.5\%$ $P_{\text{к.з.}} = 400.0 \text{ кВт}$	.0256	.840	
5. Трансформатор	T2	$S_{\text{НОМ}} = 125.0 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_k = 10.5\%$ $P_{\text{к.з.}} = 400.0 \text{ кВт}$	.0256	.840	
6. Реактор	RS	$I_{\text{НОМ}} = 3000 \text{ А}$ $X = .231 \text{ Ом}$ $P_{\text{пот}} = 75.0 \text{ кВт}$ $U_{\text{ср.ном}} = 10.0 \text{ кВ}$	.0278	2.310	
7. Генератор	G1	$P_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВт}$ $X'' = .200 \text{ о.е.}$ $T_a = .162 \text{ с}$ $\cos(F1) = .80$	.0499	2.540	1.131

Окончание табл. 5.7

Номер элемента	Обозначение элемента	Исходные параметры	Расчетные параметры		
			R, о.е.	X, о.е.	E, о.е.
8. Генератор	G2	$P_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВт}$ $X'' = .200 \text{ о.е.}$ $T_a = .162 \text{ с}$ $\cos(F1) = .80$	.0499	2.540	1.131
9. Генератор	G3	$P_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВт}$ $X'' = .200 \text{ о.е.}$ $T_a = .162 \text{ с}$ $\cos(F1) = .80$	.0499	2.540	1.131
10. Генератор	G4	$P_{\text{НОМ}} = 63 \text{ МВт}$ $X'' = .200 \text{ о.е.}$ $T_a = .162 \text{ с}$ $\cos(F1) = .80$	.0499	2.540	1.131
11. Реактор	RL	$I_{\text{НОМ}} = 600 \text{ А}$ $X = .385 \text{ Ом}$ $P_{\text{ПОТ}} = 14.3 \text{ кВт}$ $U_{\text{ср.НОМ}} = 10.0 \text{ кВ}$ $K_{\text{СВ}} = .5$	.0661 .0661 -.1983	1.925 1.925 -5.775	
12. Трансформатор	TS	$S_{\text{НОМ}} = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ $U_{\text{к}} = 8,0\%$ $P_{\text{к.з.}} = 80 \text{ кВт}$	.8000	8.0	
13. Двигатель	M	$P_{\text{НОМ}} = 4000.0 \text{ кВт}$ $1 \text{ пуск} = 6.3 \text{ о.е.}$ $\text{КПД} = 96 \%$ $\cos(F1) = .91$	1.5398	35.376	.949

Протокол расчета – итоговые данные

Для КЗ # 1 в узле со средним номинальным напряжением 121,0 кВ, отключаемом при $t_{от.сб}, c = .100$ и $t_{от}, c = .100$:

Эл.	$I_{п0}, \text{кА}$	$I_{п1}, \text{кА}$	T_a, c	$i_{уд}, \text{кА}$	$i_{ат}, \text{кА}$	$i_{кт}, \text{кА}$	Beta, %	Вк, кА \cdot с
2	1.58	1.58	.013	3.29	.001	2.24	.0	.28
3	1.58	1.58	.013	3.29	.001	2.24	.0	.28
4	2.59	2.59	.130	7.04	1.573	5.23	43.0	1.35
5	2.56	2.59	.133	6.99	1.580	5.20	43.6	1.33
КЗ	8.27	8.27	.030	20.12	.315	12.01	2.7	8.92

Сопrotивление узла КЗ, о.е.: $R_{эKB} = .6002E-01$ $X_{эKB} = .5738$.

Для КЗ # 2 в узле со средним номинальным напряжением 10,5 кВ, отключаемом при $t_{от.сб}, c = .100$ и $t_{от}, c = .100$:

Эл.	$I_{п0}, \text{кА}$	$I_{п1}, \text{кА}$	T_a, c	$i_{уд}, \text{кА}$	$i_{ат}, \text{кА}$	$i_{кт}, \text{кА}$	Beta, %	Вк, кА \cdot с
4	29.36	29.36	.032	71.99	1.373	42.90	3.3	113.99
6	14.06	14.06	.085	37.56	5.427	25.31	27.3	34.94
7	24.49	24.49	.162	67.20	17.564	52.20	50.7	128.87
8	24.49	24.49	.162	67.20	17.564	52.20	50.7	128.87
12	1.20	1.20	.059	3.13	.263	1.96	15.5	.23
КЗ	93.55	93.55	.067	246.26	25.633	157.93	19.4	1432.03

Сопrotивление узла КЗ, о.е.: $R_{эKB} = .2788E-01$ $X_{эKB} = .5871$.

Для КЗ # 3 в узле со средним номинальным напряжением 10,5 кВ отключаемом при $t_{от.сб}, c = .100$ и $t_{от}, c = .100$:

Эл.	$I_{п0}, \text{кА}$	$I_{п1}, \text{кА}$	T_a, c	$i_{уд}, \text{кА}$	$i_{ат}, \text{кА}$	$i_{кт}, \text{кА}$	Beta, %	Вк, кА \cdot с
11	13.40	13.40	.096	36.04	6.061	25.01	32.0	33.11
КЗ	13.40	13.40	.096	36.04	6.061	25.01	32.0	33.11

Сопrotивление узла КЗ, о.е.: $R_{эKB} = .1353$ $X_{эKB} = 4.101$.

Для КЗ # 4 в узле со средним номинальным напряжением 6,3 кВ отключаемом при $t_{от.сб.}, c = .100$ и $t_{от.}, c = .100$:

Эл.	$I_{п0}, \text{kA}$	$I_{пр}, \text{kA}$	T_a, c	$i_{уд}, \text{kA}$	$i_{ат}, \text{kA}$	i_{kt}, kA	Beta, %	$V_k, \text{kA}^2 \cdot \text{c}$
12	11.58	11.58	.034	28.63	.671	17.05	4.1	18.02
13	2.46	2.46	.073	6.50	.772	4.25	22.2	1.02
КЗ	14.04	14.04	.038	35.11	1.094	20.95	5.5	27.15

Соппротивление узла КЗ, о.е.: $R_{э\text{кв}} = .5457$ $X_{э\text{кв}} = 6.505$.

В протоколе отражаются численные значения параметров элементов схемы, введенные в расчет, и, кроме того, параметры схемы замещения x, R , рассчитанные при базисной мощности $S_б = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Затем отражаются расчетные значения токов короткого замыкания для каждой точки к.з., а именно (в порядке следования столбцов):

$I_{п0} (I_{пр})$ - начальный ток периодической составляющей кА;

T_a - электромагнитная постоянная времени цепи к.з., с;

$i_{уд}$ - ударный ток к.з., кА;

$i_{ат}$ - аperiodическая составляющая тока к.з. на момент отключения последнего, кА;

$i_{кт}$ - амплитудное значение полного тока к.з. на момент его отключения, кА;

β - численное содержание аperiodической составляющей в полном токе к.з., %;

V_k - тепловой импульс тока к.з., $\text{kA}^2 \cdot \text{c}$.

Для расчета токов к.з. по этой программе была принята схема электроснабжения из примера расчета § 5.3 для тех же точек к.з. Сопоставление результатов расчетов представлено в табл. 5.8.

Видно, что результаты расчетов практически совпадают, но продолжительность расчетов по программе на компьютере сокращается в десятки раз.

Таблица 5.8

Сопоставление результатов расчета токов короткого замыкания в примере расчета и по компьютерной программе

Точка к.з.	Расчетные значения, кА			
	Пример § 5.3		Программа § 5.4	
	I'' , ($I_{п0}$)	$i_{уд}$	$I_{п0}$, (I'')	$i_{уд}$
К1	8,4	-	8,27	-
К2	94	245,4	93,55	246,42
К3	13,3	36,2	13,4	36,04
К4	14	-	14,04	-

Глава 6

Расчет токов короткого замыкания с учетом полного сопротивления цепи

§ 6.1. Расчет токов короткого замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения

В системах электроснабжения и в распределительных сетях напряжением 6-35 и 110 кВ, питание которых осуществляется от районных подстанций, расчет токов короткого замыкания можно производить при условии постоянства напряжения на высшей ступени трансформации, так как указанные сети находятся на большом электрическом удалении от генераторов электростанций - за второй или третьей ступенью трансформации. Причем при расчете токов короткого замыкания в указанных сетях следует учитывать полные сопротивления проводников, имеющих сравнительно малое сечение. Кроме того,

в таких сетях необходимо учитывать при коротком замыкании явление возрастания активного сопротивления под влиянием нагрева.

Рост активного сопротивления цепи, составляющего большую долю полного сопротивления, приводит к уменьшению тока короткого замыкания. Это явление, названное И.А. Сыромятниковым тепловым спадом тока короткого замыкания, особенно сильно проявляется на участках воздушных линий со стальными проводами [3].

*Расчет тока короткого замыкания с учетом увеличения
активного сопротивления при нагреве этим током*

Время протекания тока короткого замыкания весьма мало, и поэтому можно считать, что все тепло, выделяемое в проводнике током к.з., идет на нагрев проводника без рассеивания тепла в окружающую среду. В этом случае имеет место тепловой баланс, а именно

$$(I'')^2 r_0 dt = qlc\gamma\theta, \quad (6.1)$$

где r_0 - удельное активное сопротивление проводника при температуре нагрева θ °С; q , l - сечение (мм^2) и длина (м) проводника, соответственно; c , γ - удельная теплоемкость материала проводника ($\text{Вт}\cdot\text{с}/\text{г}\cdot\text{град}$) и его удельный вес ($\text{г}/\text{см}^3$), соответственно.

В равенстве (6.1) величина удельного активного сопротивления проводника r_0 определяется так

$$r_{\theta} = r_{\theta_0} \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0} = \rho_{\theta_0} \frac{l}{q} \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0}, \quad (6.2)$$

где ρ_{θ_0} , α - удельное сопротивление проводника при начальной температуре θ_0 и температурный коэффициент сопротивления материала проводника при 0°C (1/град), соответственно: $\alpha = 0,004 \text{ 1}^{\circ}\text{C}$ - для меди и алюминия, $\alpha = 0,0045 \text{ 1}^{\circ}\text{C}$ - для стали.

Величина начального сверхпереходного тока в равенстве (6.1) должна быть определена по формуле

$$I'' = \frac{U_c}{\sqrt{3} \sqrt{r_{\theta}^2 + x_{\Sigma}^2}}, \text{ А}, \quad (6.3)$$

где U_c - напряжение сети, В; x_{Σ} - сумма сопротивлений проводника x и связи с сетью x_c , Ом.

Выражение (6.1) с учетом (6.2) можно представить в таком виде

$$\left(\frac{I_{\theta}''}{q} \right)^2 dt = \frac{c\gamma}{\rho_{\theta_0}} \frac{1 + \alpha\theta_0}{1 + \alpha\theta} d\theta. \quad (6.4)$$

После интегрирования в пределах от 0 до t и от θ_0 до θ можно получить зависимость изменения тока к.з. под влиянием нагрева проводника.

Для облегчения расчетов построена диаграмма, которая помещена на рис. 6.1. По оси абсцисс диаграммы отложена величина

$$\Delta = \left(\frac{I''}{q} \right)^2 t \quad (6.5)$$

для различных материалов проводников, а по оси ординат - относительная величина теплового спада тока к.з.

$$n_{\theta} = \frac{I_{\theta}''}{I''}, \quad (6.6)$$

являющаяся отношением периодического значения тока для данной температуры проводника I_{θ}'' к значению этого тока I'' без учета влияния нагрева проводника.

Графики диаграммы построены для температуры нагрева проводника в пределах $\theta = 100 \dots 400^{\circ}\text{C}$ и для относительного значения активного сопротивления к полному сопротивлению проводника

$$a = \frac{r}{z} = 0 \dots 1.$$

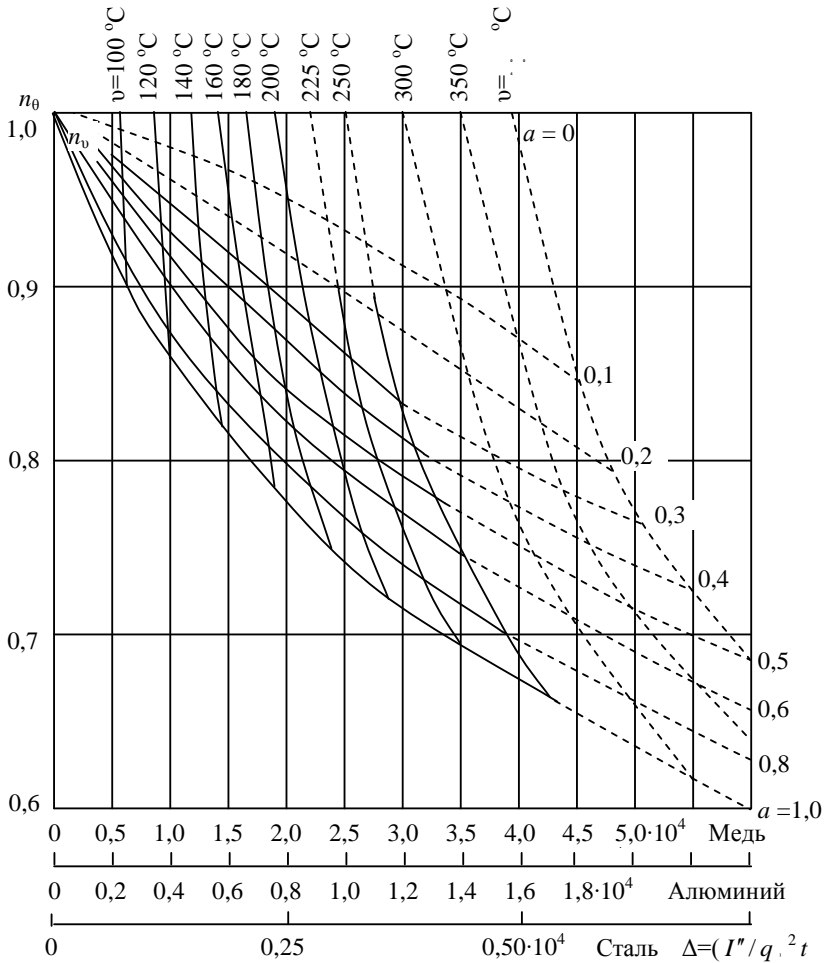


Рис. 6.1. Диаграмма для расчета тока к.з. с учетом его теплового спада (диаграмма построена для $\theta = 65^\circ\text{C}$)

Эта диаграмма позволяет определить:
 степень уменьшения (теплового спада) тока к.з. под влиянием
 увеличения сопротивления проводника к заданному моменту времени;
 температуру нагрева проводника током к.з. к заданному моменту
 времени;

время, в течение которого температура проводника достигнет предельного значения по условию термической стойкости.

Примеры расчетов

От шин трансформатора мощностью 25 МВ·А, напряжением 110/6,6 кВ, $u_k = 10,5\%$ отходят кабельные линии к распределительным пунктам. Один из кабелей марки А-ЗХ50 длиной 1,2 км имеет удельное сопротивление $x = 0,083$ Ом/км, $r = 0,62$ Ом/км при $\theta_0 = 20$ °С.

Задача 1. Определить тепловой спад тока к.з. и температуру жил кабеля через 0,7 с от момента возникновения к.з. на шинах распределительного пункта.

1. Реактивное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне 6,6 кВ, по формуле (4.3)

$$x_T = \frac{10,5}{100} \frac{6,6^2}{25} = 0,183 \text{ Ом.}$$

2. Полное реактивное сопротивление цепи к.з.

$$x_\Sigma = x_T + x = 0,183 + 1,2 \cdot 0,083 = 0,28 \text{ Ом.}$$

3. Активное удельное сопротивление кабеля при рабочей температуре $\theta = 65$ °С по формуле (6.2)

$$r_\theta = 0,62 \frac{1 + 0,004 \cdot 65}{1 + 0,004 \cdot 20} = 0,726 \text{ Ом/км,}$$

где для жил из алюминия принято $\alpha = 0,004$ /°С.

4. Полное сопротивление цепи к.з.

$$z = \sqrt{x_\Sigma^2 + r_\theta^2} = \sqrt{0,28^2 + (1,2 \cdot 0,726)^2} = 0,91.$$

5. Начальное значение периодической составляющей тока к.з. по формуле (6.3)

$$I'' = \frac{6600}{\sqrt{3} \cdot 0,91} = 4192 \text{ , А,}$$

где 6600 В - напряжение системы 110 кВ, приведенное к низкой стороне трансформатора: $110 \frac{6,6}{110} = 6,6$ кВ по выражению (4.4).

6. Величина Δ по формуле (6.5)

$$\Delta = \left(\frac{4192}{50} \right)^2 0,7 = 0,49 \cdot 10^4.$$

7. Отношение активного сопротивления цепи к.з. к полному сопротивлению

$$a = \frac{1,2 \cdot 0,726}{0,91} = 0,96.$$

8. Тепловой спад тока к.з. определяется по диаграмме рис. 6.1 для $a = 0,96$ и $\Delta = 0,49 \cdot 10^4$ (для алюминия), $n_0 = 0,84$ и, следовательно, по формуле (6.6)

$$I''_0 = n_0 I'' = 0,84 \cdot 4192 = 3521 \text{ А.}$$

9. Температура нагрева жил кабеля током к.з. также определяется по диаграмме (см. рис.6.1): для $a = 0,96$ и $\Delta = 0,49 \cdot 10^4$ имеем $\theta = 134^\circ\text{C}$.

Задача 2. Определить время отключения к.з., допустимое по условию термической стойкости кабеля, которое определяется предельной температурой нагрева 200°C .

1. По диаграмме рис. 6.1 для $\theta = 200^\circ\text{C}$ и $a = 0,96$ (из предыдущего расчета) находятся $n_0 = 0,725$ и $\Delta = 1,12 \cdot 10^4$.

2. Максимально допустимое время отключения к.з. по формуле (6.5)

$$1,12 \cdot 10^4 = \left(\frac{4192}{50} \right)^2 t,$$

отсюда $t = 1,6 \text{ с}$.

3. Ток к.з. для этого времени по выражению (6.6)

$$I''_0 = n_0 I'' = 0,725 \cdot 4192 = 3039 \text{ А.}$$

Расчет токов короткого замыкания с учетом изменения параметров ферромагнитных проводников

При протекании тока по стальному проводнику его активное сопротивление и индуктивное сопротивление, обусловленное магнитным потоком, замыкающимся в поперечном сечении проводника, зависят от величины тока. Однако эта зависимость имеет место при токах 100-200 А, а до этих значений указанные сопротивления постоянны. В практических расчетах принимают, что при токе до 200 А расчетные параметры проводников соответствуют приведенным в табл. 6.1, а при токе свыше 200 А индуктивное сопротивление стального проводника резко уменьшается, и в расчетах можно принимать $x = 0,5 \text{ Ом/км}$; активное сопротивление в этом случае следует определять для температуры нагрева данным током, как указано выше.

**Значения расчетных параметров стальных проводов
(при токе до 200 А), Ом/км**

Обозначение параметра	Марка провода				
	ПС-25	ПС-35	ПС-50	ПС-70	ПС-95
z	6,5	5,3	4,0	2,7	2,0
r	6,1	5,0	3,76	2,54	1,88
x	2,2	1,8	1,36	0,92	0,68

Пример расчета

От шин распределительного пункта напряжением 6,3 кВ отходит провод ПС-50 с удельным сопротивлением $\rho = 0,15$ Ом/км. На длине провода 2 км происходит к.з. Сопротивление сети $x_c = 0,5$ Ом. Определить начальный ток к.з. с учетом изменения сопротивления.

1. Из табл. 6.1 для ПС-50 имеем $r = 3,76$ Ом/км, $x = 1,36$ Ом/км.

2. Сопротивление цепи к.з., Ом

$$r_k = 2 \cdot 3,76 = 7,52, \quad x_k = 2 \cdot 1,36 + 0,5 = 3,22,$$

$$z_k = \sqrt{7,52^2 + 3,22^2} = 8,16.$$

3. Начальный ток к.з.

$$I'' = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot z_k} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 8,16} = 446 \text{ А}.$$

Ток к.з. более 200 А и поэтому следует уточнить сопротивление цепи.

4. Уточненное сопротивление цепи к.з. для тока свыше 200 А, Ом

$$x_{к.у} = 2 \cdot 0,5 + 0,5 = 1,5; \quad r_{к.у} = \rho \frac{l}{q} = 0,15 \frac{2000}{50} = 6;$$

$$z_{к.у} = \sqrt{1,5^2 + 6^2} = 6,2.$$

5. Начальный ток к.з. с учетом изменения параметров стального проводника

$$I'' = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot z_k} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 6,2} = 587 \text{ А},$$

т. е. ток к.з. будет на 30 % больше.

§ 6.2. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В

Электроустановки напряжением до 1000 В, получающие питание от распределительной сети через понижающие трансформаторы, отличаются от электроустановок высокого напряжения тем, что они имеют большую электрическую удаленность от источников энергии, так как соединены с последними через несколько ступеней трансформации. Эта особенность позволяет считать, что при к.з. в такой электроустановке напряжение на высокой стороне практически остается неизменным и равным своему номинальному значению.

Вторая особенность таких электроустановок заключается в том, что индуктивное и активное сопротивления их цепей соизмеримы, и поэтому при составлении эквивалентных расчетных схем и схем замещения должны быть учтены полные сопротивления рассматриваемых цепей.

Большую часть активного сопротивления цепи составляют сопротивления сборных шин, трансформаторов тока, сопротивления болтовых соединений, зажимов, разъемных и переходного контактов в месте к.з. Учет этих сопротивлений обязателен, так как пренебрежение активным сопротивлением дает при расчете весьма преувеличенное значение тока к.з.

Вместе с тем, учет активных сопротивлений в цепи к.з. - неопределенная задача, так как величина сопротивлений, например контактных соединений, будет зависеть от состояния контактных поверхностей, от степени затяжки болтов, силы пружин и т. д.

Испытания в установке напряжением 500 В показали, что если ток к.з. при тщательно привинченной к шинам закоротке составлял 100 %, то при закоротке меньшего в 3-4 раза сечения величина тока уменьшалась до 75 %, а при закоротке, просто положенной на шины, ток уменьшался до 50 % [3.] Поэтому правильный учет переходного контактного сопротивления в цепях рассматриваемых электроустановок является важной задачей.

Сопротивления большинства элементов в расчетных схемах рассматриваемых электроустановок (шин, кабелей, трансформаторов тока, контактов автоматических выключателей, переходных болтовых соединений) даются в именованных единицах, причем их сопротивления, выражаемые в миллиомах, составляют доли единицы и поэтому расчет токов к.з. производится в именованных единицах

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot z_k}, \text{ кА}, \quad (6.7)$$

где U - напряжение верхней ступени трансформации, приведенное к нижней ступени, В; $z_{\text{к}} = \sqrt{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}$ - полное сопротивление цепи к.з., МОм.

Средними номинальными напряжениями $U_{\text{ср}}$ рекомендуется принимать значения 690, 525, 400, 230, 127 В.

Величина тока при трехфазном к.з. по формуле (6.7) служит для расчета ударного тока к.з. (по k_y из рис. 6.2) и для расчета теплового импульса с целью проверки аппаратов и проводников по условиям электродинамической и термической стойкости токам короткого замыкания.

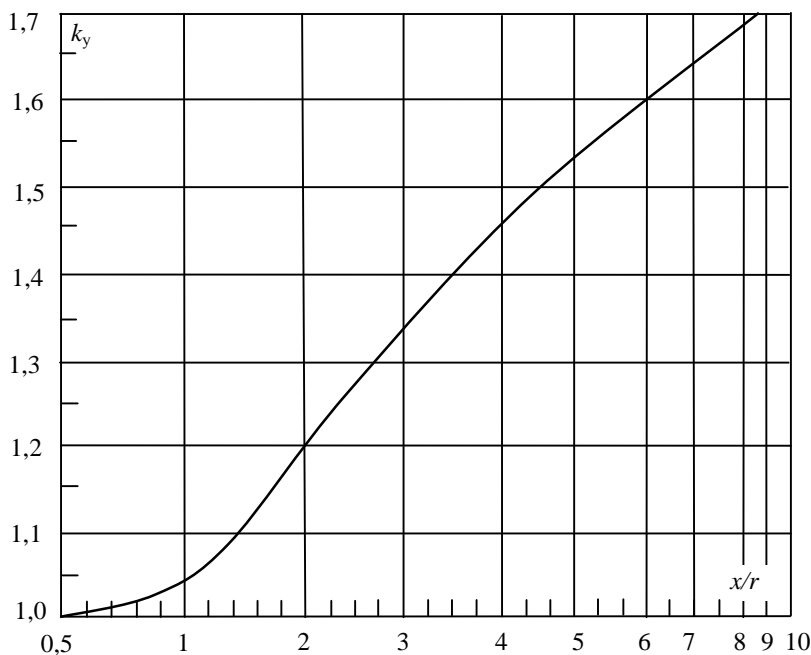


Рис. 6.2. График зависимости ударного коэффициента от соотношения сопротивлений цепи к.з.

Для значительной величины активного сопротивления цепи к.з. и для длительного промежутка времени протекания тока к.з. может оказаться необходимым расчет тока к.з. с учетом теплового спада последнего, как указано в предыдущем параграфе.

При удаленном к.з. величина тока к.з. значительно уменьшается. Так, например, при к.з. на длине 40 м кабеля А-ЗХ 150 мм² величина тока составляет 10 кА, а на расстоянии 160 м - 4,25 кА.

Одновременно с удаленностью короткого замыкания отношение x/r уменьшается, что обуславливает снижение ударного коэффициента. График зависимости ударного коэффициента для малых отношений сопротивлений цепи к.з. помещен на рис. 6.2.

Влияние асинхронной нагрузки на величину тока короткого замыкания учитывается таким же образом, как показано в § 4.5. Ток короткого замыкания в электроустановке с автономным генератором при расчете в схеме замещения представляется ЭДС и сопротивлениями в виде отдельной ветви.

Пример расчета

Схема электрических соединений представлена на рис. 6.3.

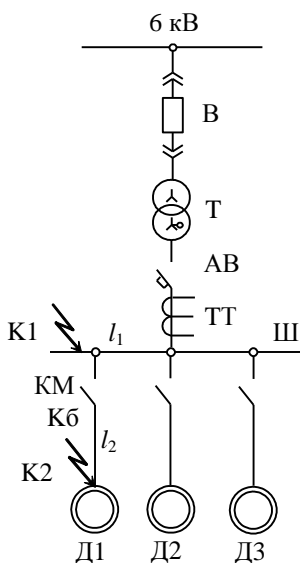


Рис. 6.3. Схема электрических соединений

На схеме указаны точки коротких замыканий К1 и К2. Параметры элементов схемы следующие:

Трансформатор Т мощностью $S_{Т.ном} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, напряжение $U_{В.ном} = 6 \text{ кВ}$; $U_{Н.ном} = 0,4 \text{ кВ}$; $r_T = 1,7 \text{ мОм}$, $x_T = 8,6 \text{ мОм}$ ([3], табл. П.10).

Автоматический выключатель АВ с номинальным током 1500 А: сопротивление токовых отключающих катушек $x_{КАВ} = 0,08 \text{ мОм}$, $r_{КАВ} = 0,14 \text{ мОм}$, переходные сопротивления контактов $x_{ПАВ} = 0$, $r_{ПАВ} = 0,1 \text{ мОм}$ (параметры элементов из табл. ПЗ-П8 приложения).

Трансформатор тока ТТ типа ТКФ, сопротивление первичных обмоток $x_{ТТ} = 0,07 \text{ мОм}$, $r_{ТТ} = 0,05 \text{ мОм}$.

Шинопровод $x_{Шуд} = 0,14 \text{ мОм/м}$; $r_{Шуд} = 0,21 \text{ мОм/м}$ ([3], табл. П.10), расстояние до точки к.з. $l_1 = 10 \text{ м}$.

Контактор КМ на 50 А, переходное сопротивление контактов $x_{KM} = 0$, $r_{KM} = 1,3 \text{ мОм}$.

Кабель с алюминиевыми жилами длиной до зажимов электродвигателя Д1 $l_2 = 20 \text{ м}$, $q = 16 \text{ мм}^2$, $x_K = 0,095 \text{ мОм/м}$, $r_K = 1,95 \text{ мОм/м}$.

Электродвигатель Д1, АО-72-2, мощностью $P_{ном} = 20 \text{ кВт}$, при напряжении 380 В, $n_{ном} = 2940 \text{ об/мин}$, $\eta = 89,5 \%$, $\cos\phi = 0,9$, $k_i = 7$, $\cos\phi_{пуск} = 0,35$, ЭДС $E'' = 0,9 \text{ о.е.}$

Расчет

1. Схема замещения с указанием индуктивных и активных сопротивлений элементов схемы электрических соединений дана на рис. 6.4.

2. Напряжение первичной обмотки трансформатора, приведенное к вторичной,

$$U_{ВН} = \frac{U_{В}}{k_T} = \frac{6000}{15} = 400 \text{ В.}$$

3. Индуктивные и активные сопротивления со стороны трансформатора:

до точки к.з. К1

$$x_{\Sigma 1} = x_T + x_{КАВ} + x_{ТТ} + x_{Ш} = 8,6 + 0,08 + 0,07 + 0,14 \cdot 10 = 10,15 \text{ мОм},$$

$$r_{\Sigma 1} = r_T + r_{КАВ} + r_{ПАВ} + r_{ТТ} + r_{Ш} = 1,7 + 0,14 + 0,1 + 0,05 + 0,21 \cdot 10 = 4,1 \text{ мОм};$$

до точки к.з. К2

$$x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 1} + x_K = 10,15 + 0,095 \cdot 20 = 12,05 \text{ мОм},$$

$$r_{\Sigma 2} = r_{\Sigma 1} + r_{KM} + r_K = 4,1 + 1,3 + 1,95 \cdot 20 = 44,4 \text{ мОм}.$$

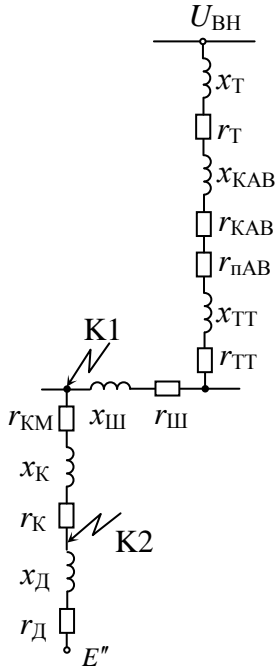


Рис. 6.4. Схема замещения

4. Начальный ток короткого замыкания. Периодическая составляющая, действующее значение от трансформатора (по формуле 6.7):
в точку K1

$$I''_{K1} = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}z_{\Sigma 1}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{10,15^2 + 4,1^2}} = 21 \text{ кА};$$

в точку K2

$$I''_{K2} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{12,05^2 + 44,4^2}} = 5,02 \text{ кА}.$$

5. Аперидическая составляющая тока к.з. от трансформатора для момента 0,01с:
в точке K1

$$i_a = \sqrt{2}I''_{K1} \cdot e^{\frac{-0,01}{T_{al}}} = \sqrt{2} \cdot 21 \cdot 0,28 = 8,3 \text{ кА},$$

где

$$T_{a1} = \frac{x_{\Sigma 1}}{\omega r_{\Sigma 1}} = \frac{10,15}{314 \cdot 4,1} = 7,83 \cdot 10^{-3} \text{ с ;}$$

в точке К2

$$i_a = \sqrt{2} \cdot 5,02 \cdot 9,4 \cdot 10^{-6} \approx 0,$$

где

$$T_{a2} = \frac{x_{\Sigma 2}}{\omega r_{\Sigma 2}} = \frac{12,05}{314 \cdot 44,4} = 8,64 \cdot 10^{-4} \text{ с .}$$

6.

Ударный

ток к.з. от трансформатора

в точку К1

$$i_{y1} = k_y \sqrt{2} I''_{K1} = 1,26 \cdot 1,41 \cdot 21 = 47 \text{ кА ,}$$

где $k_{y1} = 1,26$ для $\frac{x_{\Sigma 1}}{r_{\Sigma 1}} = \frac{10,15}{4,1} = 2,5$ (по рис. 6.2),

(для сравнения: ударный коэффициент по формуле (2.16) $k_{y1} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + 0,28 = 1,28$);

в точку К2

$$i_{y2} = 1 \cdot 1,41 \cdot 5,02 = 7,07 \text{ кА ,}$$

где $k_{y2} = 1$ для $\frac{x_{\Sigma 2}}{r_{\Sigma 2}} = \frac{12,05}{44,4} = 0,27$.

7.

Начальный

ток короткого замыкания – периодическая составляющая, действующее значение – от электродвигателя в точку К1 по формуле (4.58)

$$I''_D = \frac{0,9 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}} = \frac{0,9 \cdot 380}{1,73 \cdot 848} = 0,233 \text{ кА ,}$$

где $z_{\Sigma} = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} = \sqrt{0,782^2 + 0,33^2} = 0,848 \text{ Ом ;}$

индуктивное и активное сопротивления цепи к.з.

$$x_{\Sigma} = x_D + x_K = 780 + 1,9 = 782 \text{ мОм ,}$$

$$r_{\Sigma} = r_D + r_K + r_{KM} = 290 + 39 + 1,3 = 330 \text{ мОм ;}$$

где сопротивления электродвигателя

$$z_D = \frac{1}{k_i} \frac{U^2}{S} = \frac{1}{k_i} \frac{U^2 \cos \varphi \eta}{P} = \frac{1}{7} \frac{380^2 \cdot 0,9 \cdot 0,895}{20} = 0,83 \text{ Ом ,}$$

$$r_{\text{Д}} = z_{\text{Д}} \cos \varphi_{\text{пуск}} = 0,83 \cdot 0,35 = 0,29 \text{ Ом} ,$$

$$x_{\text{Д}} = 0,83 \cdot 0,94 = 0,78 \text{ Ом} .$$

8. Ударный ток к.з. от электродвигателя

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_y \cdot I_{\text{Д}}'' = 1,41 \cdot 1,23 \cdot 0,233 = 0,4 \text{ кА} ,$$

где $k_y = 1,23$ по рис. 6.2 для $\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} = 2,37$.

РАЗДЕЛ III

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Глава 7

Особенности режима трехфазной цепи при нарушении симметрии

§ 7.1. Основные положения, условия и допущения

При расчете несимметричных режимов принимается условие, что в большинстве случаев несимметрия возникает в одной точке схемы, а вся остальная часть схемы остается симметричной. Нарушение симметрии в виде однофазного или двухфазного короткого замыкания рассматривается как поперечная несимметрия, а разрыв одной или двух фаз цепи - как продольная несимметрия.

Аналитическое исследование несимметричных переходных режимов сложнее, чем исследование симметричных режимов, так как уравнения процесса должны быть составлены не для одной фазы, а для каждой фазы цепи. Причем появляется необходимость учитывать влияние пульсирующего поля, возникающего в синхронных машинах вследствие нарушения симметрии статорной цепи.

На рис. 7.1 показана конструктивная модель синхронного явнополюсного генератора без демпферной обмотки. Представим себе, что на холостом ходу генератора, нейтраль статорной обмотки которого заземлена, случилось короткое замыкание одной фазы на землю. По цепи статорной обмотки этой фазы пойдет ток, угловая частота которого будет равна синхронной частоте вращения ротора. В результате в машине появится пульсирующее электромагнитное поле Φ_a (рис. 7.1, а), которое можно по известному правилу представить в виде двух электромагнитных полей (рис. 7.1, б), вращающихся навстречу друг другу с угловой синхронной скоростью $\pm\omega_c$. Здесь знак «+» означает вращение против часовой стрелки, а знак «-» - по часовой стрелке.

Поток Φ_{a1} , вращающийся синхронно с ротором, взаимодействует с потоком последнего как обычный поток реакции статора при симметричном режиме. Поток же Φ_{a2} , вращающийся навстречу ротору, будет пересекать проводники обмотки последнего с двойной синхронной скоростью $\omega_p + \omega_c = 2\omega_c$.

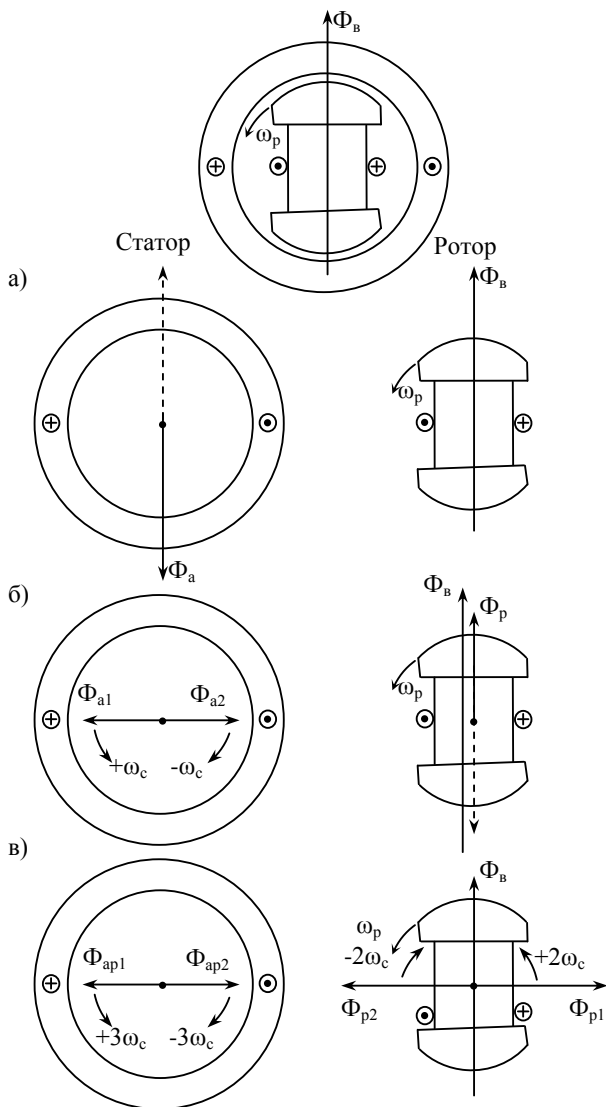


Рис. 7.1. Конструктивная модель синхронного явнополюсного генератора без демпферной обмотки и схема образования пульсирующего поля при несимметричном режиме статора

В обмотке ротора будет наведена ЭДС с угловой частотой $2\omega_c$ и, следовательно, появится ток этой же частоты. Ток обусловит в продольной оси ротора пульсирующий электромагнитный поток Φ_p (см. рис. 7.1, б), вращающийся в пространстве вместе с ротором. Этот поток можно представить также в виде двух вращающихся во взаимно противоположных направлениях потоков со скоростью $\pm 2\omega_c$ (рис. 7.1, в).

Поток Φ_{p2} , который вращается навстречу ротору, в пространстве (в расточке статора) имеет скорость вращения $-2\omega_c + \omega_p = -\omega_c$, т. е. вращается синхронно с потоком статора Φ_{a2} и стремится компенсировать последний.

Другой поток ротора, Φ_{p1} вращается в пространстве со скоростью $+\omega_p + 2\omega_c = +3\omega_c$ и, следовательно, наводит в обмотке короткозамкнутой фазы статора ЭДС и ток тройной синхронной частоты. Этот ток создает в расточке статора пульсирующий электромагнитный поток этой же частоты.

Продолжая подобный анализ, можно убедиться, что в обмотке статора под влиянием токов четных гармоник в обмотке ротора появляется весь спектр нечетных гармоник, а в обмотке ротора под влиянием токов нечетных гармоник статора - весь спектр четных гармоник. Подобно этому нечетные гармоники тока ротора обуславливают четные гармоники тока в обмотке статора и наоборот - четные гармоники статора обуславливают нечетные гармоники тока в обмотке ротора. Таким образом, в обмотке статора машины появляется весь спектр гармонических составляющих.

В синхронной машине с демпферной обмоткой при несимметричном режиме высшие гармонические весьма малы, так как демпферная обмотка, имеющая поток Φ_D , совместно с обмоткой возбуждения создают симметричную систему по отношению к магнитным потокам, вращающимся вокруг ротора.

Действительно, каждая из этих обмоток имеет пульсирующий поток при несимметричном режиме статора, но обмотки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. (рис. 7.2, а), а их потоки по времени - на четверть периода, и поэтому в результате их взаимодействия образуется вращающееся электромагнитное поле ротора (рис. 7.2, б) неподвижное относительно вызвавшего его поля статора.

Таким образом, при симметричном роторе, т. е. при равенстве $x'_d = x'_q$, а также $x''_d = x''_q$ пульсирующее поле статора не создает высших гармоник в цепях обмоток машины. По этой причине, если у гидротенератора при несимметричном режиме наличие высших

гармонических заметно, то у турбогенераторов они практически не проявляются.

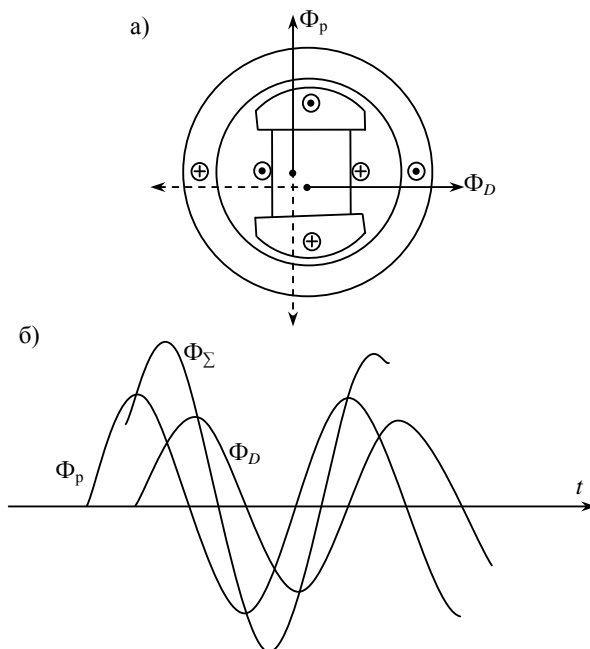


Рис. 7.2. Конструктивная модель синхронного явнополюсного генератора с демперными обмотками (а); образование вращающегося поля ротора (б)

§ 7.2. Метод симметричных составляющих и его применение для расчета несимметричных режимов

В случае расчета режима установившегося трехфазного короткого замыкания в трехфазной симметричной системе цепь короткого замыкания представляют в виде одной фазы, так как явления в двух других фазах подобны.

При несимметричных коротких замыканиях в трехфазной симметричной системе явления во всех трех фазах различны, ибо не одинаковы токи, напряжения в фазах и различны углы сдвига между векторами этих величин. Поэтому обычным способом нельзя рассчитывать изменение тока и напряжения только в одной фазе системы,

необходимо составить достаточное число уравнений для контуров всех трех фаз. Очевидно, количество необходимых уравнений значительно возрастает и увеличивается трудность и объем вычислений. Задача может быть упрощена, если применить для расчета метод симметричных составляющих. Этот метод предложил Фортеस्कью*.

Метод позволяет рассматривать несимметричную трехфазную систему токов, напряжений (в симметричной трехфазной системе сопротивлений), состоящую из нескольких симметричных систем токов и напряжений, для каждой из которых явления в фазах подобны. При таком приеме можно ограничиться расчетом процесса только для одной фазы - в этом заключается достоинство указанного метода.

Основные свойства метода заключаются в следующих положениях. Несимметричную систему трех векторов можно разложить на три симметричные системы: прямую $\dot{A}_1\dot{B}_1\dot{C}_1$, обратную $\dot{A}_2\dot{B}_2\dot{C}_2$ и нулевую $\dot{A}_0\dot{B}_0\dot{C}_0$ последовательности. На рис. 7.3 показаны векторы трех названных симметричных систем, являющихся составными векторами несимметричной системы $\dot{A}\dot{B}\dot{C}$.

Система прямой последовательности состоит из трех равных векторов $\dot{A}_1\dot{B}_1\dot{C}_1$, вращающихся с угловой скоростью ω_c и сдвинутых относительно друг друга по фазе на угол $\frac{2\pi}{3}$, с тем же порядком чередования векторов, что и в несимметричной системе. Система обратной последовательности состоит также из трех равных между собой векторов $\dot{A}_2\dot{B}_2\dot{C}_2$, вращающихся с такой же угловой скоростью ω_c и сдвинутых по фазе на угол $\frac{2\pi}{3}$, но с обратным порядком чередования фаз.

Система нулевой последовательности состоит из трех одинаковых векторов $\dot{A}_0, \dot{B}_0, \dot{C}_0$, вращающихся с угловой скоростью ω_c и совпадающих по направлению друг с другом.

Таким образом, несимметричная система векторов $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ состоит из трех симметричных систем, а именно

*Fortescue G.L., Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. Trans. A.I.E.E. v.37, pt. II, 1918.

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0; \\ \dot{C} &= \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0.\end{aligned}\quad (7.1)$$

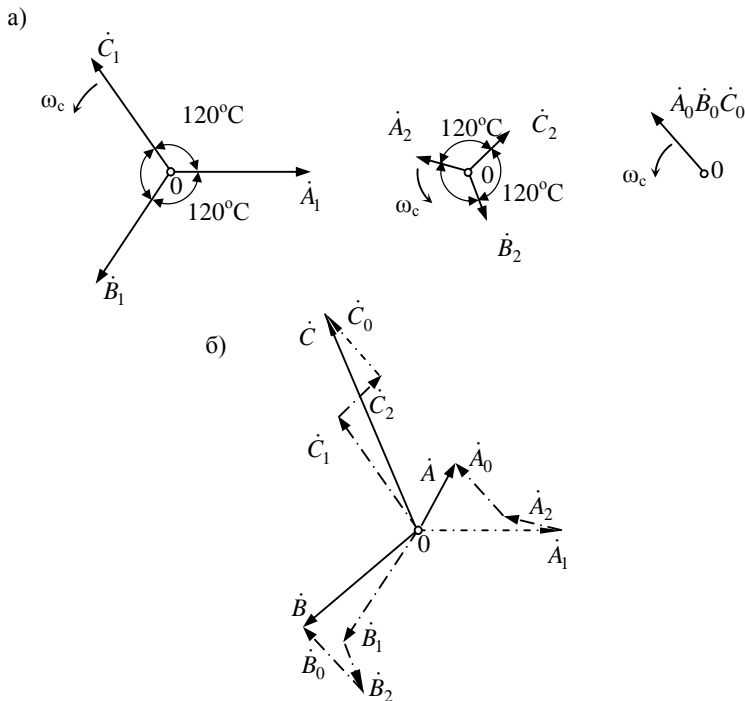


Рис. 7.3. Три симметричные системы векторов: прямой ($\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{C}_1$), обратной ($\dot{A}_2, \dot{B}_2, \dot{C}_2$) и нулевой ($\dot{A}_0, \dot{B}_0, \dot{C}_0$) последовательности (а); образование несимметричной системы векторов ($\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$) – (б)

Внутри каждой симметричной системы любой вектор может быть представлен вектором другой фазы при помощи оператора поворота a , который выражается комплексным числом

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j\beta} \quad (\text{или } a = -0,5 + j0,87), \quad (7.2)$$

где $\beta = \arctg -\sqrt{3} = 120^\circ$.

Это утверждение иллюстрируется рис. 7.4, на котором показана система симметричных составляющих прямой последовательности $\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{C}_1$, помещенная в комплексной плоскости.

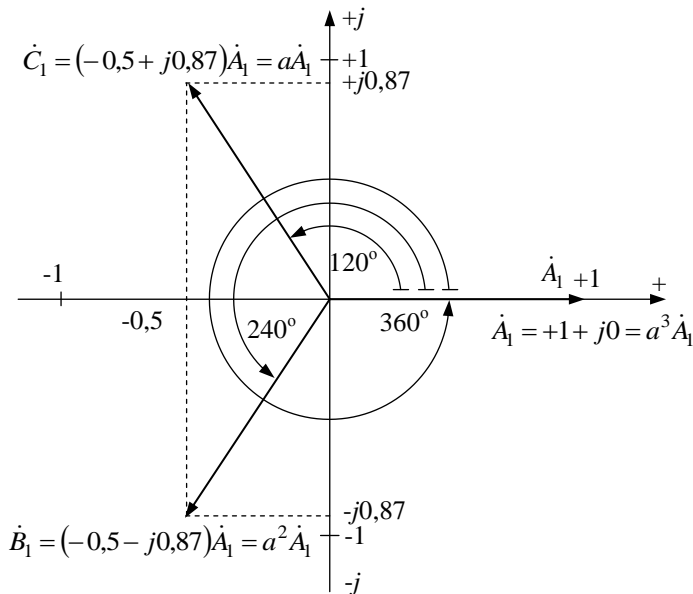


Рис. 7.4. Расположение векторов симметричной системы прямой последовательности в комплексной плоскости

Система векторов прямой последовательности расположена так, что вектор \dot{A}_1 , равный +1, совпадает с осью вещественных. Тогда координаты векторов \dot{C}_1 и \dot{B}_1 будут соответственно равны $-0,5 + j0,87$ и $-0,5 - j0,87$. Таким образом, векторы \dot{C}_1 и \dot{B}_1 могут быть выражены при помощи вектора \dot{A}_1 так

$$\begin{aligned}\dot{C}_1 &= (-0,5 + j0,87)\dot{A}_1 = a\dot{A}_1; \\ \dot{B}_1 &= (-0,5 - j0,87)\dot{A}_1 = a^2\dot{A}_1,\end{aligned}$$

где величина a - является оператором поворота вектора \dot{A}_1 на 120° , а величина $a^2 = -0,5 - j0,87$ обуславливает поворот на 240° против часовой стрелки. Подобным образом при помощи оператора поворота

представляются векторы системы обратной последовательности \dot{B}_2 и \dot{C}_2 через вектор \dot{A}_2 , т. е.

$$\dot{B}_2 = a \dot{A}_2, \quad \dot{C}_2 = a^2 \dot{A}_2.$$

Следовательно, несимметричную систему векторов (7.1) можно выразить через векторы трех симметричных систем одной фазы, «А», так

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= a^2 \dot{A}_1 + a \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{C} &= a \dot{A}_1 + a^2 \dot{A}_2 + \dot{A}_0, \end{aligned} \quad (7.3)$$

это формулы образования несимметричной системы.

Можно теперь решить обратную задачу: располагая данными несимметричной системы \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} можно получить значения величин в фазе А для каждой симметричной системы, иначе говоря, эти зависимости позволяют выделить из несимметричной системы симметричные составляющие.

Вектор нулевой последовательности в фазе А отыскивается сложением левой и правой частей всех уравнений (7.3), а именно:

$\dot{A} + \dot{B} + \dot{C} = (1 + a + a^2)(\dot{A}_1 + \dot{A}_2) + 3\dot{A}_0$, и учитывая, что $1 + a + a^2 = 0$, имеем

$$\dot{A}_0 = \frac{\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}}{3}. \quad (7.4)$$

Вектор прямой последовательности в фазе А отыскивается умножением второго уравнения (7.3) на a , а третьего на a^2 . Тогда после сложения левых и правых частей всех трех уравнений (7.3) имеем

$$\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C} = (1 + a^3 + a^3)\dot{A}_1 + (1 + a^2 + a^4)\dot{A}_2 + (1 + a + a^2)\dot{A}_0$$

и затем, так как $a^3 = e^{j360} = 1$ и $1 + a^2 + a^4 = 1 + a^2 + a \cdot 1 = 0$, получаем

$$\dot{A}_1 = \frac{\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}}{3}. \quad (7.5)$$

Вектор обратной последовательности в фазе А отыскивается умножением второго уравнения (7.3) на a^2 , а третьего на a . Тогда после соответствующего сложения всех трех уравнений (7.3) имеем

$$\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C} = (1 + a^4 + a^2)\dot{A}_1 + (1 + a^3 + a^3)\dot{A}_2 + (1 + a^2 + a)\dot{A}_0,$$

а затем по аналогии с предыдущим получаем

$$\dot{A}_2 = \frac{\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}}{3}. \quad (7.6)$$

Зависимости (7.4), (7.5), (7.6) называются формулами разложения несимметричной системы на три симметричные: прямой, обратной и нулевой последовательности.

Метод симметричных составляющих применяют для расчетов несимметричных режимов электрических цепей при условии ограничения спектра колебаний тока и напряжения основной гармоникой; высшими гармоническими пренебрегают. Очевидно погрешность в расчетах несимметричных режимов будет наименьшей в сетях с турбогенераторами, у которых, как показано в предыдущих параграфах, высшие гармонические практически отсутствуют; в цепях с гидрогенераторами даже при наличии демпферной обмотки высшие гармонические будут обуславливать погрешность в расчете.

Применение метода симметричных составляющих для расчета несимметричных режимов электрической сети основывается на следующих положениях:

каждая фаза электрической цепи рассматривается в виде трех, одновременно существующих отдельных цепей, соответствующих трем симметричным системам прямой, обратной и нулевой последовательностей;

так как в отдельно взятой фазе имеют место токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, то каждый ток протекает в «своей» цепи;

элементы, входящие в рассматриваемую электрическую цепь, представляются в указанных трех системах соответствующими параметрами z_1 , z_2 , z_0 . Иными словами, один и тот же элемент цепи, например, генератор, будет иметь различные сопротивления в цепях прямой, обратной и нулевой последовательностей;

источники ЭДС имеются только в цепи прямой последовательности (потому что роторы источников энергии не могут одновременно вращаться в ту и другую сторону);

напряжения в цепях трех последовательностей $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ считаются приложенными (возникающими) в месте повреждения рассматриваемой цепи.

Таким образом, электрическая цепь, в которой рассматриваются несимметричные режимы, представляется в виде трех эквивалентных схем (рис. 7.5): прямой, обратной и нулевой последовательностей. На схемах рис. 7.5, б стрелкой указано положительное направление только тока прямой последовательности.

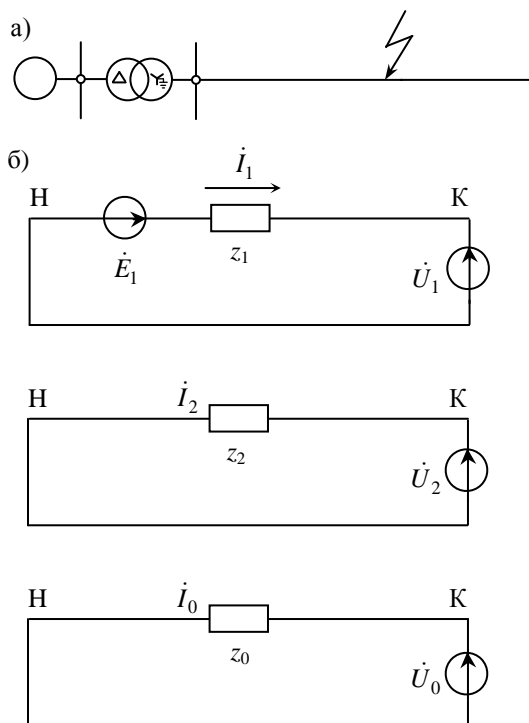


Рис. 7.5. Принципиальная схема (а) и эквивалентные схемы (б) прямой, обратной и нулевой последовательностей электрической цепи для расчета режимов с поперечной несимметрией (Н, К – начало и конец схемы)

Для всех трех контуров справедлив второй закон Кирхгофа и поэтому можно написать

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A1} &= \dot{E}_{A1} - \dot{z}_{A1} \dot{I}_{A1}; \\ \dot{U}_{A2} &= 0 - \dot{z}_{A2} \dot{I}_{A2}; \\ \dot{U}_{A0} &= 0 - \dot{z}_{A0} \dot{I}_{A0} \end{aligned} \right\}, \quad (7.7)$$

где \dot{z}_{A1} , \dot{z}_{A2} , \dot{z}_{A0} - полное сопротивление цепей прямой, обратной и нулевой последовательностей в фазе A рассматриваемой схемы; \dot{E}_{A1} - ЭДС в цепи прямой последовательности фазы A рассматриваемой схемы;

$\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}, \dot{I}_{A0}$ - токи в цепях соответствующих последовательностей фазы A ; $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}, \dot{U}_{A0}$ - напряжения в цепях соответствующих последовательностей фазы A .

Здесь формальное написание во втором и третьем уравнениях нуля подчеркивает отсутствие ЭДС обратной и нулевой последовательностей.

Система уравнений (7.7) представляет одну фазу A , для фаз B и C могут быть записаны подобные системы уравнений, но так как при помощи формул образования несимметричной системы (7.3) режимы всех трех фаз могут быть представлены при помощи одной «основной» фазы, в этом нет необходимости.

В цепях напряжением выше 1000 В активным сопротивлением при расчете начальных значений токов короткого замыкания пренебрегают. В этом случае система (7.7) будет представлена так

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - jx_1 \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 &= 0 - jx_2 \dot{I}_2; \\ \dot{U}_0 &= 0 - jx_0 \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

Здесь и ниже индекс A , указывающий основную фазу, опущен.

Напряжения и токи фаз рассматриваемой цепи вычисляются по формулам образования

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0, \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

а также

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

Используя системы уравнений (7.8), (7.9), (7.10), можно рассчитать токи и напряжения в фазе при любом несимметричном коротком замыкании [27].

Следует отметить, что симметричное трехфазное короткое замыкание представляется схемой замещения прямой последовательности, как показано на рис. 7.6.

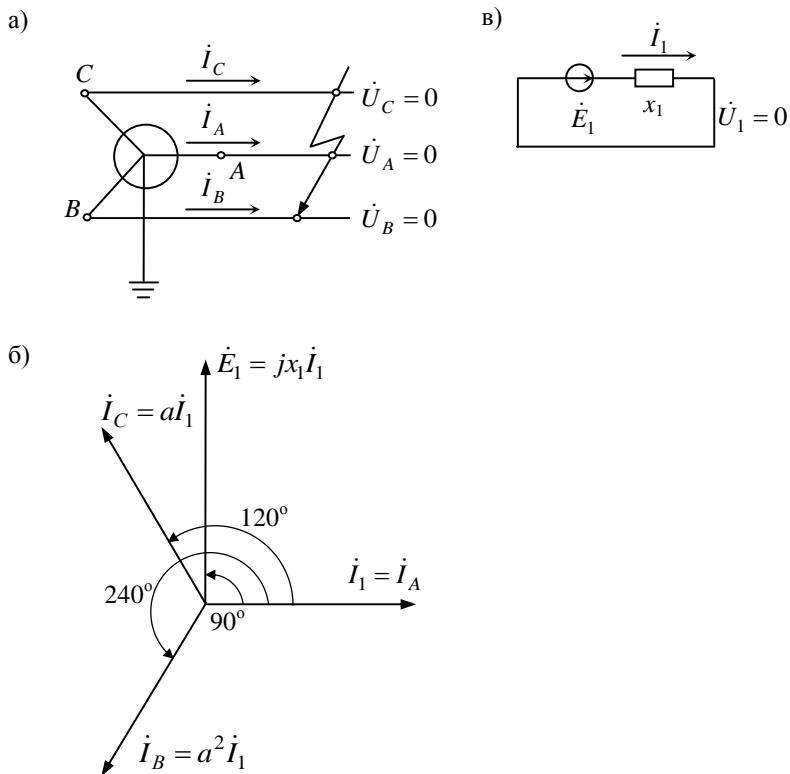


Рис. 7.6. Схема (а), векторная диаграмма (б) и комплексная схема замещения (в) при трехфазном коротком замыкании

Глава 8

Аварийные режимы при поперечном нарушении симметрии цепи

§ 8.1. Режим при двухфазном коротком замыкании

Принципиальная схема для этого режима показана на рис. 8.1, а. Граничные условия запишутся так: потенциалы фаз B и C в точке к.з. равны $\dot{U}_B = \dot{U}_C$; ток в неповрежденной фазе отсутствует, $\dot{I}_A = 0$, а токи в фазах B, C уравновешены, $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$ (это следует из того, что в симметричной конструкции $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$). Прежде всего необходимо определить ток прямой последовательности.

Для отыскания тока \dot{I}_1 используем граничные условия. Из формулы (7.10) следует: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = (1 + a^2 + a)\dot{I}_1 + (1 + a + a^2)\dot{I}_2 + 3\dot{I}_0 = 0$. Так как $(1 + a + a^2) = 0$, то $\dot{I}_0 = 0$. Из последнего равенства (7.8) получим $\dot{U}_0 = 0$. Таким образом, при двухфазном к.з. напряжение и ток нулевой последовательности отсутствуют. Для значения $\dot{I}_0 = 0$ и граничных условий $\dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ можно написать, что $\dot{I}_B + \dot{I}_C = (a^2 + a)\dot{I}_1 + (a^2 + a)\dot{I}_2 = 0$ или $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$.

С другой стороны, из формулы (7.9) для граничных условий следует $\dot{U}_B - \dot{U}_C = (a^2 - a)\dot{U}_1 - (a^2 - a)\dot{U}_2 = 0$ или $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$.

На основании этого соотношения, полученного равенства $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$ и равенств (7.8), можно получить: $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = -jx_1\dot{I}_2 = jx_2\dot{I}_1$; далее $jx_2\dot{I}_1 = \dot{E}_1 - jx_1\dot{I}_1$ и окончательно получаем расчетную формулу

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j(x_1 + x_2)}. \quad (8.1)$$

Токи в фазах по формуле (7.10) равны

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= 0 \text{ (по условию режима);} \\ \dot{I}_B &= (a^2 - a)\dot{I}_1 = -j\sqrt{3}\dot{I}_1; \\ \dot{I}_C &= (a - a^2)\dot{I}_1 = +j\sqrt{3}\dot{I}_1. \end{aligned} \quad (8.2)$$

Отношение тока в фазе к току прямой последовательности - модуль

$$m^{(2)} = \left| \frac{\dot{I}_B}{\dot{I}_1} \right| = \sqrt{3}. \quad (8.3)$$

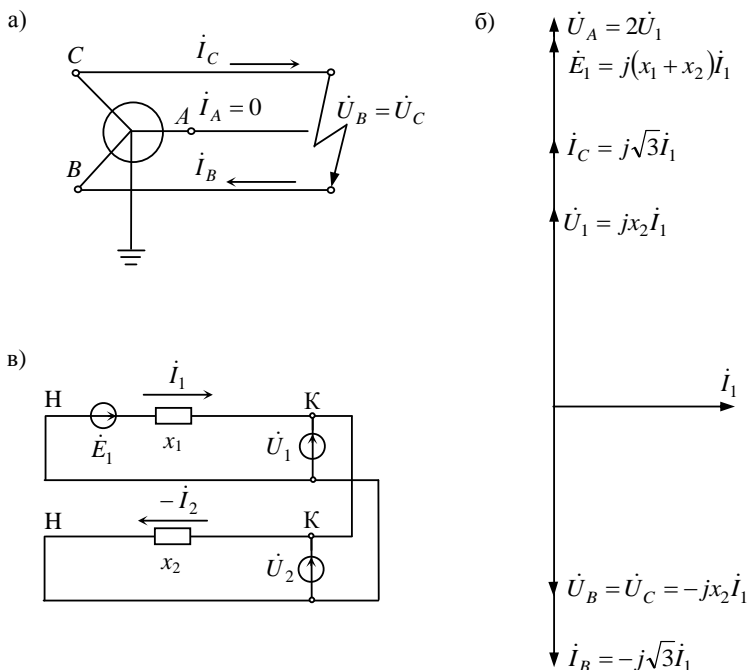


Рис. 8.1. Схема (а), векторная диаграмма токов и напряжений (б) и комплексная схема замещения (в) при двухфазном коротком замыкании

Напряжения в фазах из формулы (7.9)

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 2\dot{U}_1 = j2x_2\dot{I}_1; \\ \dot{U}_B &= (a^2 + a)\dot{U}_1 = -jx_2\dot{I}_1; \\ \dot{U}_C &= (a + a^2)\dot{U}_1 = -jx_2\dot{I}_1. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Выражения (8.1), (8.2) и (8.4) позволяют построить векторные диаграммы токов и напряжений относительно тока \dot{I}_1 , отражающие режим двухфазного к.з. Построение начинается с вектора \dot{I}_1 (рис. 8.1, б), затем откладываются векторы $\dot{U}_1, \dot{I}_C, \dot{E}_1$, опережающие (так как имеется

сомножитель j) вектор тока \dot{I}_1 на 90° . Поскольку величина напряжения на фазе A равна двойному значению \dot{U}_1 , то вектор \dot{U}_A откладывается совпадающим по направлению с \dot{U}_1 . Векторы напряжения $\dot{U}_B = \dot{U}_C = jx_2\dot{I}_1$ в месте нарушения симметрии, как видно из формул (8.4), отстают от вектора тока \dot{I}_1 на 90° (вследствии наличия сомножителя $-j$); на этот же угол отстает и вектор тока в фазе $\dot{I}_B = -j\sqrt{3}\dot{I}_1$.

Комплексная схема замещения (рис. 8.1, в), как следует из выражения (8.1), должна, во-первых, включать в себя эквивалентную схему прямой (x_1) и обратной (x_2) последовательностей (см. рис. 7.5), а во-вторых, сопротивления этих схем соединяются последовательно. Причем, как следует из равенства $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$, ток обратной последовательности по сравнению с током прямой последовательности будет иметь противоположное направление и эквивалентные схемы соединяются в соответствии с указанными направлениями токов.

§ 8.2. Режим при однофазном коротком замыкании

Принципиальная схема для этого режима показана на рис. 8.2, а. Граничные условия запишутся так: аварийные токи в неповрежденных фазах отсутствуют, $\dot{I}_B = 0$, $\dot{I}_C = 0$; напряжение в месте короткого замыкания равно нулю, $\dot{U}_A = 0$. Используя граничные условия, следует найти ток \dot{I}_1 , а затем все остальные величины. Из формулы (7.10) для разности токов \dot{I}_B и \dot{I}_C с учетом граничных условий следует $\dot{I}_B - \dot{I}_C = (a^2 - a)\dot{I}_1 - (a^2 - a)\dot{I}_2 = 0$ или $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$.

Для суммы токов \dot{I}_B , \dot{I}_C справедливо $\dot{I}_B + \dot{I}_C = (a^2 + a)\dot{I}_1 + (a^2 + a)\dot{I}_2 + 2\dot{I}_0 = 0$, но с учетом равенства $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$ получается $-2\dot{I}_1 + 2\dot{I}_0 = 0$, $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$ и, следовательно, $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0$.

Таким образом, токи всех последовательностей при однофазном к.з. равны между собой. Тогда из суммы уравнений Кирхгофа (7.8) можно получить $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = \dot{E}_1 - j(x_1 + x_2 + x_0)\dot{I}_1$, но так как по условию $\dot{U}_A = 0$, то $\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0$ и, следовательно,

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j(x_1 + x_2 + x_0)}. \quad (8.5)$$

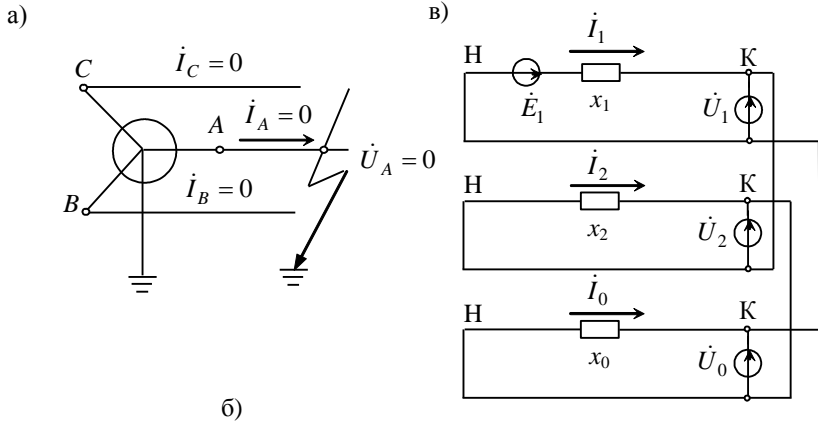


Рис. 8.2. Схема (а), векторная диаграмма токов и напряжений (б) и комплексная схема замещения (в) при однофазном коротком замыкании

Токи в фазах $\dot{I}_B = 0$; $\dot{I}_C = 0$ (по условию режима), а ток в аварийной фазе по формуле (7.10)

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = 3\dot{I}_1. \quad (8.6)$$

Отношение тока в фазе к току прямой последовательности

$$m^{(1)} = \left| \frac{\dot{I}_A}{I_1} \right| = 3. \quad (8.7)$$

Напряжения симметричных составляющих из формулы (7.9) $\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0$ или $\dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0)$, а из (7.8) следует, что

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= -jx_2 \dot{I}_2 = -jx_2 \dot{I}_1, \quad \dot{U}_0 = -jx_0 \dot{I}_0 = -jx_0 \dot{I}_1; \\ \dot{U}_1 &= -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0) = j(x_2 + x_0) \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (8.8)$$

Тогда напряжения фаз из формул (7.9) с учетом (8.8) будут равны

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 0 \quad (\text{по условию режима}); \\ \dot{U}_B &= a^2 j(x_2 + x_0) \dot{I}_1 - ajx_2 \dot{I}_1 - jx_0 \dot{I}_1; \\ \dot{U}_C &= aj(x_2 + x_0) \dot{I}_1 - a^2 jx_2 \dot{I}_1 - jx_0 \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (8.9)$$

Величина напряжения между двумя неповрежденными фазами определяется как разность их потенциалов

$$\begin{aligned} \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C = (a^2 - a)j(x_2 + x_0) \dot{I}_1 + (a^2 - a)jx_2 \dot{I}_1 = \\ &= (a^2 - a)j(2x_2 + x_0) \dot{I}_1 = \sqrt{3}(2x_2 + x_0) \dot{I}_1. \end{aligned}$$

Выражения (8.5), (8.6) и (8.9) позволяют построить векторные диаграммы токов и напряжений, отражающие режим однофазного к.з. (рис. 8.2, б). Построение начинается с вектора \dot{I}_1 , затем откладываются векторы \dot{E}_1 и \dot{U}_1 , опережающие вектор \dot{I}_1 (как показывает сомножитель j) на 90° . Векторы \dot{U}_2 , \dot{U}_0 , как видно из формул (8.8), должны (из-за сомножителя $-j$) отставать от вектора \dot{I}_1 на 90° .

Вектор тока в поврежденной фазе \dot{I}_A совпадает с направлением вектора \dot{I}_1 , но увеличен по сравнению с последним в три раза (см. формулу (8.6)). Векторы напряжений \dot{U}_B и \dot{U}_C строятся по формулам (8.9). Проще строить эти вектора по порядку следования составляющих. Так, например, для векторы \dot{U}_B сначала откладывается вектор величиной $(x_2 + x_0) \dot{I}_1$ под углом $a^2 j \rightarrow (240 + 90)^\circ$ от вектора \dot{I}_1 против часовой стрелки, затем в этом же направлении под углом $-aj \rightarrow (-180 + 120 + 90)^\circ$ откладывается вектор величиной $x_2 \dot{I}_1$ и присоединяется к концу предыдущего вектора (см. рис. 8.2, б). В заключение строится вектор величиной $x_0 \dot{I}_1$ под углом $-j \rightarrow -90^\circ$. Результирующий вектор из центра диаграммы 0 до конца последнего вектора

является вектором напряжения \dot{U}_B . Аналогичным образом строится вектор \dot{U}_C . Вектор \dot{U}_{BC} (см. рис. 8.2.,б), представляющий собой напряжение между фазами B и C , совпадает по направлению с током, так как равен

$$\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}(2x_2 + x_0)\dot{I}_1.$$

Комплексная схема замещения для этого режима, как видно из формулы (8.5), будет состоять из всех трех эквивалентных схем, сопротивления которых x_1, x_2, x_0 соединяются последовательно. При этом, имеет место соотношение $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0$ и поэтому эквивалентные схемы (см. рис. 7.5) должны быть соединены так, чтобы токи, протекающие в них, сохранили положительное направление. Кроме того, напряжение в эквивалентных схемах соотносятся так: $\dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0)$ (см. формулу (8.8)). Следовательно, соединения эквивалентных схем в комплексную схему должно быть таким, как показано на рис. 8.2, в, в соответствии с направлениями токов.

§ 8.3. Режим при двухфазном коротком замыкании на землю

Принципиальная схема для этого режима показана на рис. 8.3, а. Граничные условия запишутся так: напряжения в поврежденных фазах равны $\dot{U}_B = 0$, $\dot{U}_C = 0$, аварийный ток в фазе A отсутствует $\dot{I}_A = 0$. Ток прямой последовательности отыскивается исходя из граничных условий. Для разности напряжений \dot{U}_B и \dot{U}_C (см. формулу (7.9)),

$$\dot{U}_B - \dot{U}_C = (a^2 - a)\dot{U}_1 - (a^2 - a)\dot{U}_2 = 0 \text{ или } \dot{U}_1 = \dot{U}_2.$$

Для суммы напряжений \dot{U}_B и \dot{U}_C имеем $\dot{U}_B + \dot{U}_C = (a^2 + a)\dot{U}_1 + (a + a^2)\dot{U}_2 + 2\dot{U}_0 = 0$, так как $a^2 + a = -1$ и $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$, то $-2\dot{U}_1 + 2\dot{U}_0 = 0$ или $\dot{U}_1 = \dot{U}_0$ и, следовательно,

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_0.$$

Напряжение в неповрежденной фазе относительно земли из формулы (7.9) равно $\dot{U}_A = 3\dot{U}_1$, а в аварийных фазах по условию $\dot{U}_B = 0$, $\dot{U}_C = 0$.

Соотношение токов симметричных составляющих из выражения (7.10) для граничного условия $\dot{I}_A = 0$ имеет вид

$$\dot{I}_1 = -(\dot{I}_2 + \dot{I}_0). \quad (8.10)$$

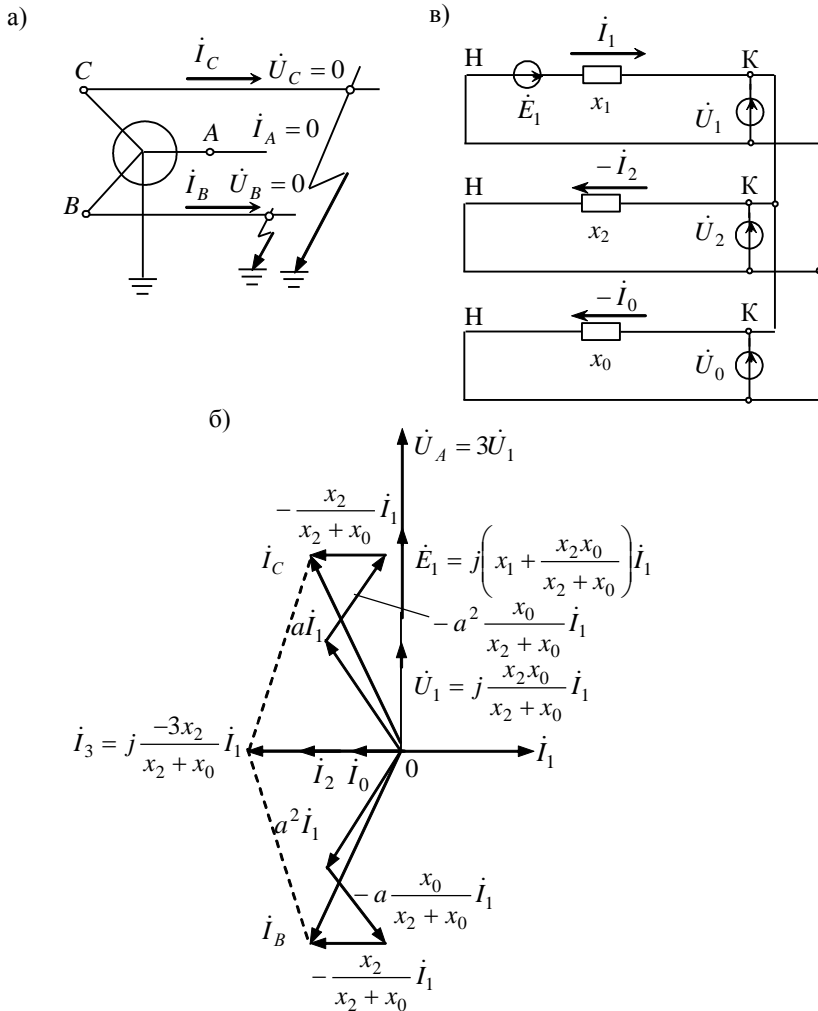


Рис. 8.3. Схема (а), векторная диаграмма токов и напряжений (б) и комплексная схема замещения (в) при двухфазном коротком замыкании на землю

Токи симметричных составляющих из уравнений Кирхгофа (7.8) равны

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_2}{jx_2} = -\frac{\dot{U}_1}{jx_2}, \quad \dot{I}_0 = -\frac{\dot{U}_0}{jx_0} = -\frac{\dot{U}_1}{jx_0}, \quad (8.11)$$

но, так как по условию $\dot{I}_A = 0$, то из формулы (7.10) следует

$$\dot{I}_1 - \frac{x_2 + x_0}{jx_2x_0} \dot{U}_1 = 0 \quad \text{или} \quad \dot{U}_1 = j \frac{x_2x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1. \quad (8.12)$$

Подставляя это значение \dot{U}_1 в первое уравнение (7.8), имеем

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j \left(x_1 + \frac{x_2x_0}{x_2 + x_0} \right)}. \quad (8.13)$$

Токи в фазах из формулы (7.10) с учетом выражений (8.11) и (8.12)

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= 0 \quad (\text{по условию режима}); \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_1 - a \frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 - \frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1; \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_1 - a^2 \frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 - \frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (8.14)$$

Отношение тока в фазе к току прямой последовательности можно определить из (8.14) по модулю комплексных чисел в правой части этих уравнений

$$m^{(1,1)} = \left| \frac{\dot{I}_B}{\dot{I}_1} \right| = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_2x_0}{(x_2 + x_0)^2}}. \quad (8.15)$$

При $x_2 = x_0$ значение $m^{(1,1)} = 1,5$, а при $\frac{x_2}{x_0} = 0$ (или ∞) значение

$m^{(1,1)} = \sqrt{3}$, т. е. отношение токов $m^{(1,1)}$ лежит в пределах

$$1,5 \leq m^{(1,1)} \leq 1,73.$$

Выражения (8.10), (8.12), (8.13) и (8.14) позволяют построить векторную диаграмму токов и напряжений (относительно тока \dot{I}_1), отражающие режим двухфазного к.з. на землю (см. рис. 8.3, б). Построение векторной диаграммы начинается с вектора \dot{I}_1 . Затем под углом 90° «против часовой стрелки» откладываются векторы \dot{U}_1, \dot{E}_1 (выражения которых (8.12), (8.13) имеют в правой части множитель j); откладывается вектор $\dot{U}_A = 3\dot{U}_1$. В противоположном вектору \dot{I}_1 направлении

откладываются вектора \dot{I}_2, \dot{I}_0 , в соответствии с равенством (8.10). Вектора токов в фазах строятся на основании зависимостей (8.14) в виде составляющих. Построение векторы \dot{I}_B начинается с построения $a^2\dot{I}_1$. Видно, что эта составляющая равна величине вектора \dot{I}_1 , повернутого на 240° против часовой стрелки (см. рис. 8.3, б). К этой составляющей пристраивается вектор $-a\frac{x_0}{x_2+x_0}\dot{I}_1$, откладываемый относительно \dot{I}_1 под углом $(-180+120)=-60^\circ$; наконец, последняя составляющая $-\frac{x_2}{x_2+x_0}\dot{I}_1$ откладывается относительно \dot{I}_1 под углом 180° и пристраивается к предыдущему вектору. Замыкающий вектор является вектором тока \dot{I}_B . Аналогичным образом строится вектор \dot{I}_C .

Величина тока к.з., поступающая в нейтраль системы, равна геометрической сумме векторов \dot{I}_B и \dot{I}_C , т. е.

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_B + \dot{I}_C = (a^2 + a)\dot{I}_1 - (a^2 + a)\frac{x_0}{x_2 + x_0}\dot{I}_1 - \frac{2x_2}{x_2 + x_0}\dot{I}_1;$$

так как $a^2 + a = -1$, то $\dot{I}_3 = \frac{-3x_2}{x_2 + x_0}\dot{I}_1$. Таким образом, вектор тока \dot{I}_3

откладывается в противоположном направлении вектору \dot{I}_1 .

Комплексная схема замещения составляется из эквивалентных схем (рис.7.5) с учетом полученных зависимостей (8.13, 8.10). Эти формулы свидетельствуют, во-первых, о том, что сопротивления эквивалентных схем x_2 и x_0 соединяются между собой параллельно и образуют последовательную цепь с сопротивлением x_1 ; во-вторых, схемы обратной и нулевой последовательностей должны быть соединены так, чтобы токи в них имели противоположные направления по сравнению с током прямой последовательности $\dot{I}_1 = -(\dot{I}_2 + \dot{I}_0)$. Для этого должны быть соединены между собой схемы, как показано на рис. 8.3, в. В этом случае выполняется полученное равенство $U_1 = U_2 = U_0$.

§ 8.4. Режим при замыкании фазы на землю в системе с изолированной нейтралью

При замыкании фазы на землю в системе с изолированной нейтралью в этой фазе (благодаря наличию емкостной проводимости фаз системы относительно земли и друг друга) появляется ток.

Однако этот ток будет значительно меньше тока однофазного короткого замыкания, и поэтому можно считать, что напряжение источника питания остается постоянным, не равным нулю.

Режим замыкания фазы на землю представляет собой несимметричный режим, поэтому для его анализа применим метод симметричных составляющих.

На рис. 8.4, а показана принципиальная схема электрической сети, в которой произошло замыкание фазы A на землю. В схеме условно принимается, что распределенные вдоль линий фаз емкости сосредоточены в одном месте. Ток замыкания по земле и емкостям неповрежденных фаз возвращается к источнику энергии. Емкостная проводимость поврежденной фазы A оказывается зашунтированной замыканием на землю, и поэтому за точкой замыкания в этой фазе тока замыкания нет.

Поскольку емкостные сопротивления элементов сетевой сети x_C относительно земли и друг относительно друга значительно превышают индуктивные и активные сопротивления, влиянием последних можно пренебречь и считать, что величина тока замыкания не зависит от места замыкания в электрически связанной сети. Тогда ток в месте замыкания на землю (см. 8.6) будет равен

$$\dot{I}_3 = 3\dot{I}_1 = 3 \frac{\dot{U}}{-\sqrt{3}jx_C} = 3 \frac{\dot{U}_\phi}{-jx_C}, \quad (8.16)$$

а при замыкании через дугу, сопротивление которой r_D ,

$$\dot{I}_3 = 3 \frac{\dot{U}_\phi}{3r_D - jx_C}. \quad (8.17)$$

Формула (8.16) показывает, что ток замыкания на землю в три раза больше емкостного тока на землю одной фазы в нормальном режиме.

Комплексные схемы замещения рассматриваемого режима показаны на рис. 8.4, б, в. Они состоят из трех эквивалентных схем: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Во все три схемы вводятся емкостные сопротивления, а в схеме нулевой последовательности разземляются все нейтрали.

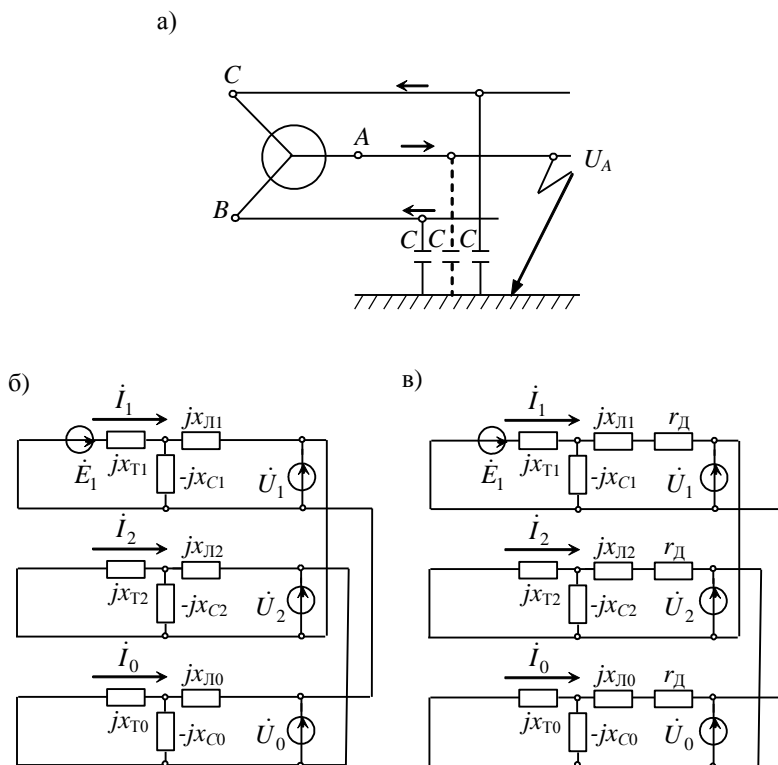


Рис. 8.4. Принципиальная схема замыкания фазы на землю в системе с изолированной нейтралью (а); комплексные схемы замещения режима без учета (б) и с учетом (в) сопротивления дуги в месте замыкания (схемы замещения показаны для случая сети с трансформатором и линией электропередачи)

Глава 9

Аварийные режимы при продольном нарушении симметрии цепи

§ 9.1. Режим при разрыве одной фазы

Наиболее часто в практике эксплуатации линий электропередач встречается разрыв одной фазы, реже – двух. Разрыв фазы обуславливает так называемую продольную несимметрию цепи. Режимы при разрывах фаз являются несимметричными режимами, и поэтому для анализа применим метод симметричных составляющих. Считают, что в месте разрыва фазы, разрыва цепи, включаются сопротивления большой величины, вследствие чего и нарушается симметрия режима. Для такого асимметричного или несимметричного режима справедливы исходные соотношения (7.8–7.10) с той лишь разницей, что взамен напряжений $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ появляются падения напряжений в месте разрыва $\Delta\dot{U}_1, \Delta\dot{U}_2, \Delta\dot{U}_0$.

Тогда исходные уравнения Кирхгофа и формулы образования несимметричной системы запишутся так

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - jx_1\dot{I}_1; \\ \Delta\dot{U}_2 &= 0 - jx_2\dot{I}_2; \\ \Delta\dot{U}_0 &= 0 - jx_0\dot{I}_0, \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{I}_B &= a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{I}_C &= a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 + \dot{I}_0, \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_A &= \Delta\dot{U}_1 + \Delta\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_0; \\ \Delta\dot{U}_B &= a^2\Delta\dot{U}_1 + a\Delta\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_0; \\ \Delta\dot{U}_C &= a\Delta\dot{U}_1 + a^2\Delta\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_0, \end{aligned} \right\} \quad (9.3)$$

где $\Delta\dot{U}_1, \Delta\dot{U}_2, \Delta\dot{U}_0$ — симметричные составляющие падения напряжения в фазе A на несимметричном участке цепи.

Используя зависимости (9.1-9.3), можно определить токи и напряжения в месте несимметричного режима.

Эквивалентные схемы замещения в соответствии с уравнениями Кирхгофа (9.1) показаны на рис. 9.1.

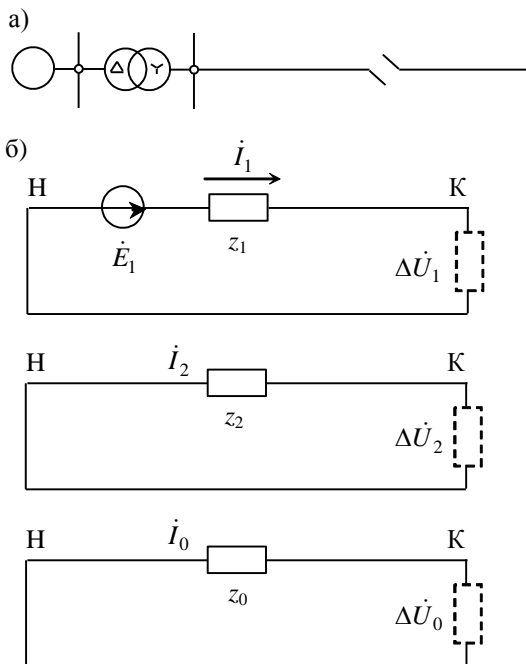


Рис. 9.1. Принципиальная схема (а) и схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей (б) электрической цепи для расчета режимов с продольной несимметрией

В случае разрыва одной фазы принципиальная схема электрической цепи может быть представлена, как показано на рис. 9.2, а. Граничные условия запишутся так: $\dot{I}_A = 0$, $\Delta\dot{U}_B = 0$, $\Delta\dot{U}_C = 0$. Для нахождения тока прямой последовательности и остальных зависимостей используются уравнения (9.1-9.3). С учетом граничных условий разность последних равенств (9.3)

$$\Delta\dot{U}_B - \Delta\dot{U}_C = (a^2 - a)\Delta\dot{U}_1 - (a^2 - a)\Delta\dot{U}_2 = 0 \text{ или } \Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2.$$

Сумма этих равенств

$$\Delta\dot{U}_B + \Delta\dot{U}_C = (a^2 + a)\Delta\dot{U}_1 + (a^2 + a)\Delta\dot{U}_2 + 2\Delta\dot{U}_0 = 0,$$

т. е. $-2\Delta\dot{U}_1 + 2\Delta\dot{U}_0 = 0$,

тогда
$$\Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2 = \Delta\dot{U}_0. \quad (9.4)$$

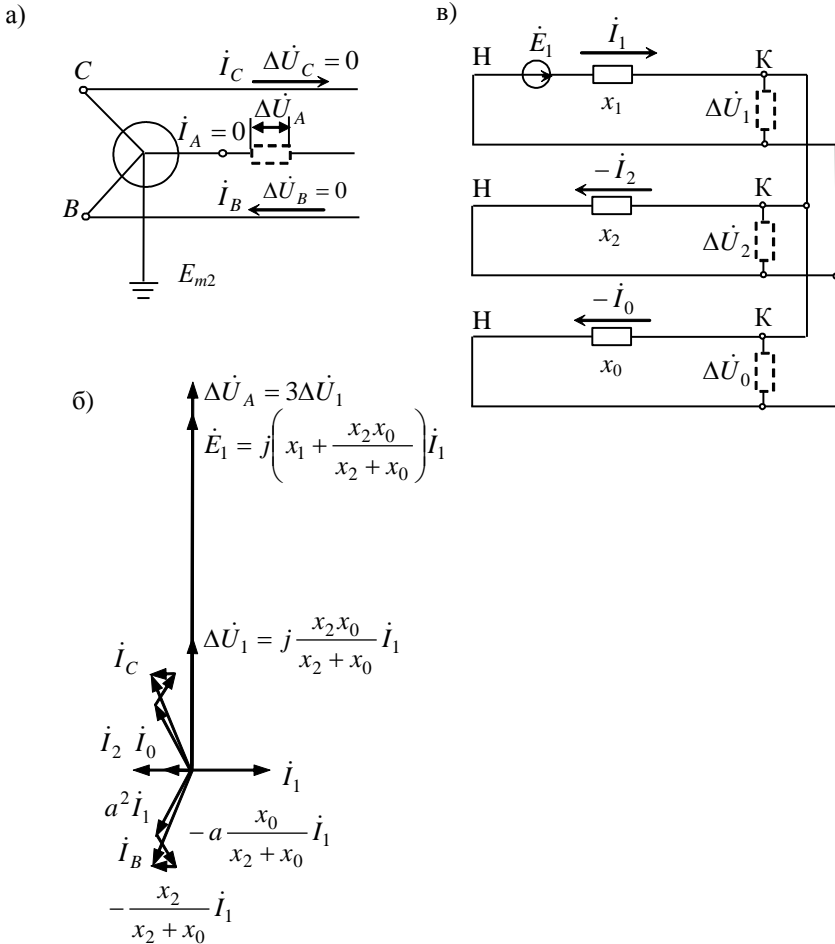


Рис. 9.2. Схема (а), векторная диаграмма токов и напряжений (б) и комплексная схема замещения (в) при разрыве одной фазы

Напряжение на концах разрыва в аварийной фазе определяется с учетом полученного соотношения из первого уравнения (9.3)

$$\Delta \dot{U}_A = 3\Delta \dot{U}_1, \quad (9.5)$$

а в «здоровых» фазах по условию режима $\Delta \dot{U}_B = 0, \Delta \dot{U}_C = 0$.

Токи симметричных составляющих определяются из уравнений Кирхгофа (9.1)

$$\dot{I}_2 = -\frac{\Delta\dot{U}_2}{jx_2} = -\frac{\Delta\dot{U}_1}{jx_2}, \quad \dot{I}_0 = -\frac{\Delta\dot{U}_0}{jx_0} = -\frac{\Delta\dot{U}_1}{jx_0}, \quad (9.6)$$

и так как по условию $\dot{I}_A = 0$, то из системы уравнений (9.2) с учетом (9.6) следует, что $\dot{I}_1 = -(\dot{I}_2 + \dot{I}_0)$ и

$$\dot{I}_1 - \frac{x_2 + x_0}{jx_2x_0} \Delta\dot{U}_1 = 0 \quad \text{или} \quad \Delta\dot{U}_1 = j \frac{x_2x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1. \quad (9.7)$$

Подставляя это значение $\Delta\dot{U}_1$ в первое уравнение (9.1), имеем

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1}{j \left(x_1 + \frac{x_2x_0}{x_1 + x_0} \right)}. \quad (9.8)$$

Токи обратной и нулевой последовательности определяются из уравнений (9.6) подстановкой (9.7)

$$\dot{I}_2 = -\frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1, \quad \dot{I}_0 = -\frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1. \quad (9.9)$$

Зная токи всех последовательностей, можно найти из системы уравнений (9.2) токи в фазах, а именно

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= 0 \quad (\text{по условию режима}); \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_1 - a \frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 - \frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1; \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_1 - a^2 \frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 - \frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (9.10)$$

Для определения напряжений на другой стороне разрыва следует по схемам отдельных последовательностей найти симметричные составляющие напряжений по формулам (9.1), а затем прибавить к ним значения $\Delta\dot{U}_1, \Delta\dot{U}_2, \Delta\dot{U}_0$.

Векторная диаграмма токов режима строится на основании формул (9.8), (9.5), (9.7) и (9.10); построение начинается с вектора \dot{I}_1 (рис. 9.2, б).

Затем откладываются под углом 90° против часовой стрелки от вектора \dot{I}_1 векторы $\Delta\dot{U}_1, \Delta\dot{U}_A$ и \dot{E}_1 . Векторы токов в фазах \dot{I}_B и \dot{I}_C строятся как результирующие векторы отдельных составляющих (9.10). Построение вектора \dot{I}_B начинается с построения $a^2 \dot{I}_1$. Эта составляющая

равна по величине вектору \dot{I}_1 , но повернута относительно последнего на 240° против часовой стрелки; к этой составляющей, как показано на рис. 9.2, б, пристраивается вектор $-a \frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1$, который откладывается относительно \dot{I}_1 под углом $(-180^\circ + 120^\circ) = -60^\circ$. Последняя составляющая $-\frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1$ откладывается относительно вектора \dot{I}_1 под углом -180° и пристраивается к предыдущему вектору. Вектор \dot{I}_B является замыкающим. Аналогичным образом строится вектор тока \dot{I}_C .

Комплексная схема замещения составляется из эквивалентных схем (рис. 9.1, б) на основании полученных зависимостей (9.8), (9.4) и (9.9). Из (9.8) следует, что комплексная схема должна включать в себя все три эквивалентные схемы, так как величина тока \dot{I}_1 зависит от сопротивлений x_1, x_2, x_0 . Причем видно, что два сопротивления x_2, x_0 должны быть соединены параллельно и вместе последовательно с x_1 . Соединение должно быть выполнено так [см. (9.9)], чтобы токи \dot{I}_2 и \dot{I}_0 имели противоположное с током \dot{I}_1 направление. Комплексная схема показана на рис. 9.2, в.

§ 9.2. Режим при разрыве двух фаз

Принципиальная схема этого режима показана на рис. 9.3, а. Граничные условия записываются так: $\Delta \dot{U}_A = 0; \dot{I}_B = 0; \dot{I}_C = 0$.

Порядок нахождения необходимых расчетных зависимостей прежний. С учетом граничных условий разность двух последних равенств (9.2) дает $\dot{I}_B - \dot{I}_C = (a^2 - a)\dot{I}_1 - (a^2 - a)\dot{I}_2 = 0$ или $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$.

Сумма этих же равенств $\dot{I}_B + \dot{I}_C = (a^2 + a)\dot{I}_1 + (a^2 + a)\dot{I}_2 + 2\dot{I}_0 = 0$, т. е. $-2\dot{I}_1 + 2\dot{I}_0 = 0$, и тогда

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0. \quad (9.11)$$

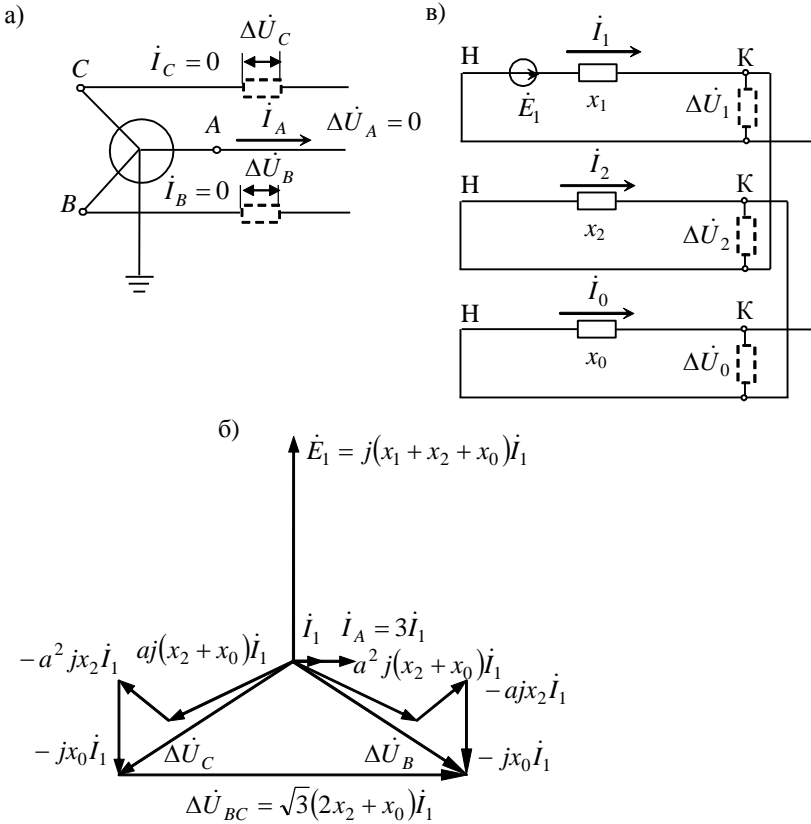


Рис. 9.3. Схема (а), векторная диаграмма токов и напряжений (б) и комплексная схема замещения (в) при разрыве двух фаз

Величина тока \dot{I}_1 определяется из суммы уравнений Кирхгофа (9.1) с учетом равенства токов симметричных составляющих и граничного условия $\Delta\dot{U}_A = 0$ и, следовательно,

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{j(x_1 + x_2 + x_0)}. \quad (9.12)$$

Величина тока в «здоровой» фазе из системы (9.2) равна

$$\dot{I}_A = 3\dot{I}_1, \quad (9.13)$$

а в аварийных фазах по условию режима $\dot{I}_B = 0, \dot{I}_C = 0$.

Падения напряжения симметричных составляющих определяются из системы уравнений (9.1)

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_2 &= -jx_2 \dot{I}_2 = -jx_2 \dot{I}_1, & \Delta \dot{U}_0 &= -jx_0 \dot{I}_0 = -jx_0 \dot{I}_1; \\ \Delta \dot{U}_1 &= -(\Delta \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_0) = j(x_2 + x_0) \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (9.14)$$

Тогда напряжения в месте разрыва фаз из системы (9.3) равны

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_B &= a^2 j(x_2 + x_0) \dot{I}_1 - ajx_2 \dot{I}_1 - jx_0 \dot{I}_1; \\ \Delta \dot{U}_C &= aj(x_2 + x_0) \dot{I}_1 - a^2 jx_2 \dot{I}_1 - jx_0 \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (9.15)$$

Напряжения между разрывами фаз

$$\Delta \dot{U}_{BC} = \Delta \dot{U}_B - \Delta \dot{U}_C = \sqrt{3}(2x_2 + x_0) \dot{I}_1. \quad (9.16)$$

Выражения (9.12), (9.13), (9.15) позволяют построить векторную диаграмму токов и напряжений (относительно тока \dot{I}_1), отражающую режим обрыва двух фаз сети. Построение начинается с вектора \dot{I}_1 (см. рис. 9.3, б). Вектор тока в фазе \dot{I}_A , как видно из формулы (9.13), совпадает с вектором \dot{I}_1 и равен его утроенному значению. Вектор ЭДС, как следует из выражения (9.12), опережает \dot{I}_1 на угол 90° . Векторы напряжений $\Delta \dot{U}_B$ и $\Delta \dot{U}_C$ строятся как геометрическая сумма своих составляющих по (9.15). Напряжение между разрывами фаз B и C равно геометрической разности $\Delta \dot{U}_B - \Delta \dot{U}_C$ и соответствует формуле (9.16).

Комплексная схема замещения, как видно из выражения (9.12), должна состоять из трех эквивалентных схем, соединяемых последовательно и так, чтобы токи в них в соответствии с формулой (9.11) имели положительное направление. Причем соотношение между падениями напряжения должно удовлетворять последнему равенству (9.14). Комплексная схема показана на рис. 9.3, в.

§ 9.3. Режим при конечном сопротивлении в месте разрыва фазы

Метод исследования продольной несимметрии приложим не только к случаю разрывов, но и к изменению сопротивлений в фазах, когда, например, при одновременном расхождении контактов полюсов выключателя дуга отключаемого тока возникает еще не на всех полюсах.

Случай отключения одной лишь фазы можно рассматривать в виде значительного увеличения сопротивления фазы до величины z_A (или

наоборот - в виде значительного уменьшения сопротивлений двух других фаз). Граничные условия этого режима будут записаны так

$$\Delta\dot{U}_A = \dot{z}_A \dot{I}_A, \quad \Delta\dot{U}_B = 0, \quad \Delta\dot{U}_C = 0. \quad (9.17)$$

Два последних условия позволяют найти необходимые соотношения, а именно, вычитая, а затем складывая два последних равенства (9.3), имеем

$$\Delta\dot{U}_B - \Delta\dot{U}_C = (a^2 - a)\Delta\dot{U}_1 - (a^2 - a)\Delta\dot{U}_2 = 0, \quad \text{т.е. } \Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2;$$

$$\Delta\dot{U}_B + \Delta\dot{U}_C = (a^2 + a)\Delta\dot{U}_1 + (a^2 + a)\Delta\dot{U}_2 + 2\Delta\dot{U}_0 = -2\Delta\dot{U}_1 + 2\Delta\dot{U}_0 = 0$$

и поэтому

$$\Delta\dot{U}_1 = \Delta\dot{U}_2 = \Delta\dot{U}_0. \quad (9.18)$$

Значение тока \dot{I}_1 отыскивается при помощи первого равенства системы (9.2) с учетом условия задачи $\Delta\dot{U}_A = \dot{z}_A \dot{I}_A$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \frac{\Delta\dot{U}_A}{\dot{z}_A}.$$

Подставляя сюда значения I_2 и I_0 из системы (9.1), получаем

$$\dot{I}_1 - \frac{\Delta\dot{U}_2}{jx_2} - \frac{\Delta\dot{U}_0}{jx_0} = \frac{\Delta\dot{U}_A}{\dot{z}_A}$$

или с учетом системы (9.3) и формулы (9.18)

$$\dot{I}_1 - \frac{\Delta\dot{U}_1}{jx_2} - \frac{\Delta\dot{U}_1}{jx_0} = \frac{3\Delta\dot{U}_1}{\dot{z}_A},$$

отсюда

$$\dot{I}_1 = \left(\frac{3}{\dot{z}_A} + \frac{1}{jx_2} + \frac{1}{jx_0} \right) \Delta\dot{U}_1 = \frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{z}_\Sigma}, \quad (9.19)$$

где

$$\dot{z}_\Sigma = \frac{1}{\frac{3}{\dot{z}_A} + \frac{1}{jx_2} + \frac{1}{jx_0}}. \quad (9.20)$$

Таким образом, учет сопротивления \dot{z}_A , включенного в одну фазу и влияющего на токи и напряжения, сводится к определению общего сопротивления \dot{z}_Σ по формуле (9.20) и к расчету искомых величин по зависимостям (9.1-9.3) для случая обрыва одной фазы. Действительно, подставляя значение $\Delta\dot{U}_1$ (9.19) в первое уравнение системы (9.1) имеем

$$\dot{z}_\Sigma \dot{I}_1 = \dot{E}_1 - jx_1 \dot{I}_1.$$

Отсюда

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{z_\Sigma + jx_1}.$$

Располагая значением тока I_1 , можно определить все остальные величины, характеризующие этот режим.

Глава 10

Практические методы расчета несимметричных режимов

§ 10.1. Правило эквивалентности прямой последовательности*

Сопоставляя расчетные формулы для тока прямой последовательности в различных несимметричных режимах (см. гл. 8 и 9), можно записать для них общее выражение

$$I_1^{(n)} = \frac{E_1}{z_1 + \Delta z^{(n)}}, \quad (10.1)$$

где E_1 - эквивалентное значение всех ЭДС в эквивалентной схеме прямой последовательности; $\Delta z^{(n)}$ - величина сопротивления, зависящая от вида режима, а именно:

при трехфазном коротком замыкании $\Delta z^{(3)} = 0$,
 при двухфазном к.з. $\Delta z^{(2)} = z_2$,
 при однофазном к.з. $\Delta z^{(1)} = z_2 + z_0$,
 при двухфазном к.з. на землю $\Delta z^{(1,1)} = z_2 \parallel z_0$,

для разрыва одной фазы $\Delta z^{(1p)} = z_2 \parallel z_0$,

для разрыва двух фаз $\Delta z^{(2p)} = z_2 + z_0$

(без учета активных сопротивлений цепи вместо z следует писать x).

Величина фазных токов при несимметричном режиме также определяется общей формулой

$$I^{(n)} = m^{(n)} I_1^{(n)}, \quad (10.2)$$

где

$$m^{(3)} = 1, \quad m^{(2)} = \sqrt{3}, \quad m^{(1)} = m^{(2p)} = 3,$$

$$m^{(1,1)} = m^{(1p)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_2 x_0}{(x_2 + x_0)^2}}.$$

*Впервые предложил Н.Н. Щедрин в книге К.Ф. Вагнера, Р.Д. Эванса «Метод симметричных составляющих», Энергоиздат, 1933 г., а также в своей книге «Токи короткого замыкания высоковольтных систем». ОНТИ. М., Л. 1935.

Очевидно, из выражения (10.1) следует, что ток при любом несимметричном режиме может быть рассчитан как ток симметрично-го трехфазного короткого замыкания за дополнительным сопротивлением $\Delta x^{(n)}$, включающим в себя результирующие сопротивления схем обратной и нулевой последовательности, - это правило эквивалентности прямой последовательности любому режиму цепи, иначе - несимметричное к.з. рассматривается как эквивалентное трехфазное к.з.

Отметим, что это правило справедливо только для основной гармоники тока несимметричного режима*.

Величина напряжения прямой последовательности в различных режимах цепи имеет также общую формулу (см. гл. 8 и 9)

$$U_1^{(n)} = \Delta z^{(n)} I_1^{(n)}. \quad (10.3)$$

Выражения (10.1) - (10.3) показывают, что все расчетные зависимости для симметричного режима (трехфазного к.з.) могут быть распространены на случаи несимметричных режимов. Так, например, постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока определяется как

$$T_a^{(n)} = \frac{x_1 + \Delta x^{(n)}}{\omega(r_1 + \Delta r^{(n)})}, \quad \text{с}, \quad (10.4)$$

где $\Delta r^{(n)}$ - дополнительное активное сопротивление для данного режима (n) , вычисляемое подобно $\Delta x^{(n)}$.

Постоянная времени затухания периодической составляющей генератора без демпферных обмоток для несимметричного режима рассчитывается так

$$T_d^{(n)} = \frac{x'_{d\Sigma} + \Delta x^{(n)}}{x_{d\Sigma} + \Delta x^{(n)}} T_{d0}, \quad \text{с}. \quad (10.5)$$

§ 10.2. Расчет токов несимметричных коротких замыканий методом расчетных кривых

Метод расчетных кривых используется для приближенного расчета тока трехфазного короткого замыкания в различные моменты времени по известной величине результирующего сопротивления цепи между ЭДС и точкой короткого замыкания.

*«Этот вывод хотя и основан на пренебрежении высшими гармоническими, но для практики его точность является исчерпывающей» Н.Н. Щедрин [2]

Обращаясь к правилу эквивалентности прямой последовательности, выражаемой формулой (10.1), можно отметить, что если за результирующее сопротивление цепи к.з. принимать сумму сопротивлений $x_1 + \Delta x^{(n)}$ (без учета активных сопротивлений), то расчетные кривые рис. 5.1 могут быть использованы для определения тока прямой последовательности на заданный момент времени.

С этой целью необходимо на основе эквивалентных схем замещения составить комплексные схемы замещения, соответствующие несимметричному режиму « n » и определить $\Delta x^{(n)}$.

Затем, используя коэффициенты токораспределения, вычислить результирующие сопротивления ветвей (лучей) схемы (см. рис. 5.2, б) по формуле (5.6) и рассчитать токи прямой последовательности в этих лучах в начальный момент времени к.з.

$$I_{1n0}^{(n)} = \frac{E}{x_1 + \Delta x^{(n)}}.$$

Последующий расчет аналогичен расчету при трехфазном к.з.: определяются по формуле (5.1) значения

$$I_{1n0(\text{НОМ})}^{(n)} = \frac{I_{1n0}^{(n)}}{I_{\text{Л.НОМ}}},$$

где $I_{\text{Л.НОМ}}$ по выражению (5.2);

по графикам рис. 5.1 для $I_{1n0(\text{НОМ})}^{(n)}$ и для заданного времени τ определяется коэффициент затухания γ_τ .

Окончательно ток в фазе луча на момент времени τ при несимметричном режиме (n) определяется

$$I^{(n)} = m^{(n)} \gamma_\tau \cdot I_{1n0}^{(n)}. \quad (10.6)$$

§ 10.3. Расчет несимметричных режимов в сетях до 1000 В

Особенности расчетов токов при трехфазных коротких замыканиях в сетях до 1000 В изложены в § 6.2.

В этих сетях при наличии трансформаторов тока, устанавливаемых в двух фазах (при схеме с заземленной нейтралью), производится расчет двухфазного короткого замыкания между фазой, где есть трансформатор тока, и «свободной» фазой, а именно

$$I_{\text{К}}^{(2)} = \sqrt{3} I_{\text{К1}}^{(2)} = \frac{U(\text{В})}{\sqrt{(2x_1 + x_{\text{ТТ}})^2 + (2r_1 + r_{\text{ТТ}})}}, \quad \text{кА}, \quad (10.7)$$

где x_1, r_1 - соответственно результирующие реактивные и активные сопротивления схемы прямой последовательности, мОм; $x_{\text{ТТ}}, r_{\text{ТТ}}$ - сопротивления трансформатора тока, мОм.

В формуле (10.7) удвоенные значения индуктивного и активного сопротивлений взяты потому, что при двухфазном коротком замыкании сопротивление комплексной схемы замещения включает сопротивления прямой и обратной последовательностей, которые в сетях до 1000 В равны между собой, сопротивления трансформатора тока выделены отдельно, так как они установлены только в двух фазах и при циркуляции тока прямой последовательности последний проходит трансформатор тока один раз.

Для настройки релейной защиты от замыканий на землю производится расчет тока при однофазном коротком замыкании

$$I_{\text{К}}^{(1)} = 3I_{\text{К1}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U}{\sqrt{(2x_1 + x_0)^2 + (2r_1 + r_0)^2}}, \quad \text{кА}, \quad (10.8)$$

где x_0, r_0 - соответственно результирующие сопротивления схемы нулевой последовательности, мОм; в формуле они помещены отдельно, так как резко отличаются от $x_1 = x_2$.

Все рассчитанные значения токов по формулам (10.7) и (10.8) являются начальными значениями периодической составляющей тока короткого замыкания.

Глава 11

Расчеты аварийных несимметричных режимов

§ 11.1. Составление расчетных схем прямой и обратной последовательностей

При расчете токов и напряжений несимметричного режима должны быть, в соответствии с методом симметричных составляющих, определены схемы отдельных последовательностей и найдены их результирующие сопротивления. Схемы замещения составляют, руководствуясь указаниями, помещенными в гл. 4, а именно: элементы схем замещения выражают в одной системе единиц, приводят к базисным условиям и т. д.

Схема прямой последовательности является обычной схемой, составляемой для расчета симметричного режима с известными значениями ЭДС и сопротивлений.

Схема обратной последовательности по структуре одинакова со схемой прямой последовательности, так как пути циркуляции токов в них одни и те же. Различие заключается только в отсутствии ЭДС и в других значениях сопротивлений обратной последовательности генераторов и нагрузок.

За начало в схемах прямой и обратной последовательностей принимают точку, в которой объединяются начала всех ветвей с генераторными ЭДС и ЭДС нагрузки.

Концом в схемах прямой и обратной последовательностей в случае поперечной несимметрии является точка, в которой возникла рассматриваемая несимметрия. В случае продольной несимметрии у каждой из схем есть два конца, между которыми имеет место продольная несимметрия. Принимают, что к концам схем или между концами схем прямой и обратной последовательностей приложены напряжения или падения напряжений, возникающие в месте несимметрии.

Составление схем замещения прямой и обратной последовательностей иллюстрируется ниже на примере расчетов несимметричных режимов в точке $K1$ схемы электропередачи (рис. 11.1, а).

Параметры элементов схемы следующие:

генератор эквивалентный Г: 4×63 МВт, типа ТВФ-63-2,

$U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ, $x_d'' = 20$ %, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$;

трансформатор Т1: 2×125 МВ·А, типа ТДЦ-125000/110, при

$U_B = 121$ кВ, $u_k = 10,5$ % ;

линия электропередачи двухцепная Л1, Л2, с хорошо проводящими грозозащитными тросами длиной $l = 100$ км, $x_{уд} = 0,40$ Ом/км ;

трансформатор Т2 имеет такие же параметры, как Т1; в нейтраль трансформатора включена дугогасительная катушка $x_{дуг} = 10$ Ом ;

нагрузка, обобщенная $P_H = 200$ МВт, $\cos \varphi_H = 0,8$, $E_H'' = 0,85$ о. е., сопротивления нагрузки прямой и обратной последовательностей $x_1 = x_2 = 0,35$ о. е.

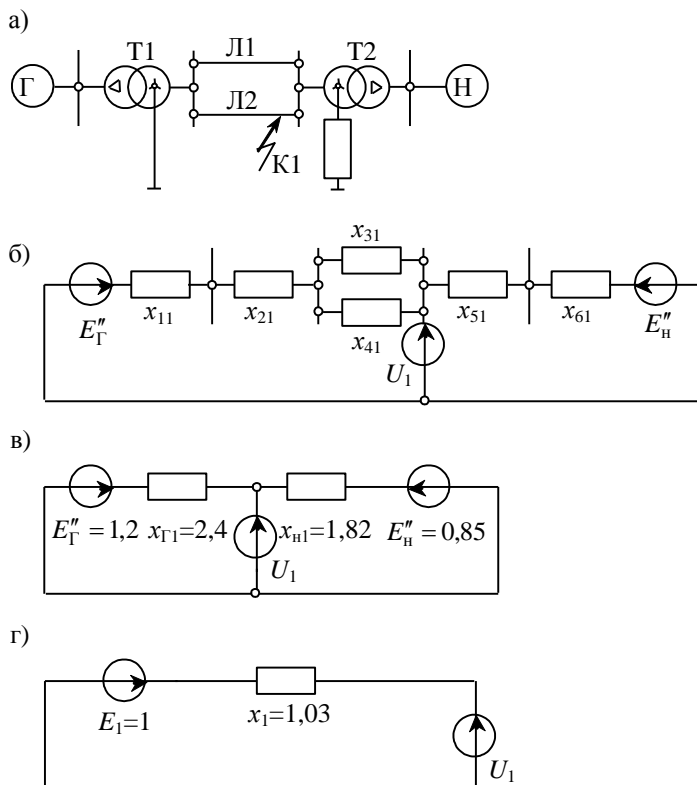


Рис. 11.1 Схема замещения (а) и эквивалентные схемы замещения (б, в, г) прямой последовательности при поперечной несимметрии – короткое замыкание в точке К1

Схема замещения данной электропередачи, являющаяся схемой прямой последовательности, показана на рис. 11.1, б.

Приведение сопротивлений элементов электропередачи к базисным условиям точки короткого замыкания К1 производится для $S_{\text{б}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{б}} = 121 \text{ кВ}$, $I_{\text{б}} = 4,8 \text{ кА}$, а именно:

$$x_{11} = \frac{x_d'' S_{\text{б}}}{100 \Sigma S_{\Gamma, \text{НОМ}}} = \frac{20 \cdot 1000}{100 \cdot 4 \cdot 79} = 0,63,$$

где

$$S_{\Gamma, \text{НОМ}} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{63}{0,8} = 79 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$x_{21} = \frac{u_{\text{к}}}{100} \frac{S_{\text{б}}}{\Sigma S_{\Gamma, \text{НОМ}}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 2 \cdot 125} = 0,42;$$

$$x_{31} = x_{41} = x_{\text{уд}} I \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б}}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{121^2} = 2,7,$$

где

$$U_{\text{б}} = U_{\text{ТВ}} = 121 \text{ кВ};$$

$$x_{51} = x_{21} = 0,42, \quad x_{61} = x_{\text{н}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = 0,35 \frac{1000}{250} = 1,4,$$

где вторая цифра в индексе условных обозначений соответствует данной последовательности.

Результирующее сопротивление ветвей элементов, генерирующих ток короткого замыкания,

$$x_{\Gamma 1} = x_{11} + x_{21} + \frac{x_{31}}{2} = 0,63 + 0,42 + \frac{2,7}{2} = 2,4;$$

$$x_{\text{н}1} = x_{51} + x_{61} = 0,42 + 1,4 = 1,82.$$

ЭДС эквивалентного генератора при нагрузке 200 МВт

$$E_{\Gamma}'' = \sqrt{(x_d'' P)^2 + (1 + x_d'' Q)^2} = \sqrt{(0,2 \cdot 0,64)^2 + (1 + 0,2 \cdot 0,48)^2} = 1,2,$$

где

$$P = S_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64, \quad Q = S_{\text{н}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}} = 0,8 \cdot 0,6 = 0,48.$$

Схема прямой последовательности с результирующими сопротивлениями показана на рис. 11.1, в. Эквивалентное сопротивление схемы

$$x_{\text{э}1} = \frac{x_{\Gamma 1} x_{\text{н}1}}{x_{\Gamma 1} + x_{\text{н}1}} = \frac{2,4 \cdot 1,82}{2,4 + 1,82} = 1,03.$$

Эквивалентная ЭДС

$$E_3'' = x_{31} \left(\frac{E_{Г1}''}{x_{Г1}} + \frac{E_{Н1}''}{x_{Н1}} \right) = 1,03 \left(\frac{1,2}{2,4} + \frac{0,85}{1,82} \right) = 1.$$

Эквивалентная схема прямой последовательности, в которой $x_1 = x_{31} = 1,03$ и $E_1 = E_3'' = 1$, показана на рис. 11.1, г.

Схема замещения обратной последовательности данной электропередачи приведена на рис. 11.2, а. В этой схеме все сопротивления элементов обратной последовательности равны сопротивлениям прямой последовательности за исключением сопротивления генератора, которое определяется в относительных базисных единицах

$$x_{12} = 1,22 \cdot x_{11} = 1,22 \cdot 0,63 = 0,77.$$

Остальные значения записываются так

$$x_{22} = x_{21} = 0,42, \quad x_{32} = x_{42} = x_{31} = 2,7,$$

$$x_{52} = x_{51} = 0,42, \quad x_{62} = x_{61} = 1,4.$$

Результирующее сопротивление схемы обратной последовательности при поперечной несимметрии

$$x_2 = (x_{12} + x_{22} + 0,5x_{32}) // (x_{52} + x_{62}) = (2,54) // (1,82) = \frac{2,54 \cdot 1,82}{2,54 + 1,82} = 1,06.$$

Эквивалентная схема обратной последовательности, в которой $x_2 = 1,06$, показана на рис. 11.2, б.

В случае продольной несимметрии в рассматриваемой электропередаче при разрыве цепи, например, в выключателе со стороны высокового напряжения трансформатора Т2 схемы замещения прямой и обратной последовательностей будут включать в себя те же элементы, что и при поперечной несимметрии.

Результирующее сопротивление этих схем замещения вычисляется с учетом последовательного включения в цепь сопротивления в месте разрыва, на котором наблюдается падение напряжения соответствующей последовательности. На рис. 11.3 и 11.4 помещены схемы замещения (а) и эквивалентные схемы замещения (б) прямой и обратной последовательностей. Для схемы прямой последовательности результирующее сопротивление

$x_1 = x_{11} + x_{21} + (x_{31} // x_{41}) + x_{51} + x_{61} = 0,63 + 0,42 + 1,35 + 0,42 + 1,4 = 4,22$; для схемы обратной последовательности

$$x_2 = x_{12} + x_{22} + (x_{32} // x_{42}) + x_{52} + x_{62} = 0,77 + 0,42 + 1,35 + 0,42 + 1,4 = 4,36.$$

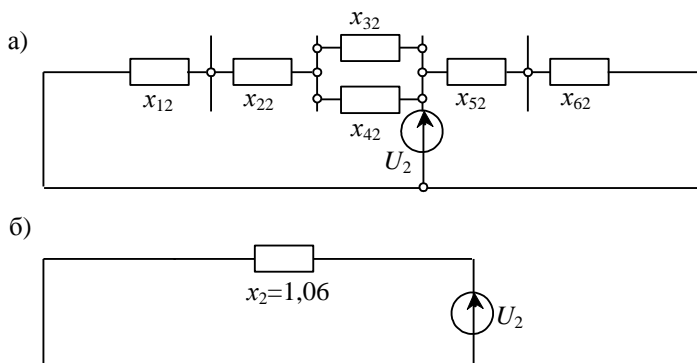


Рис. 11.2. Схема замещения (а) и эквивалентная схема замещения (б) обратной последовательности при поперечной несимметрии – короткое замыкание в точке К1

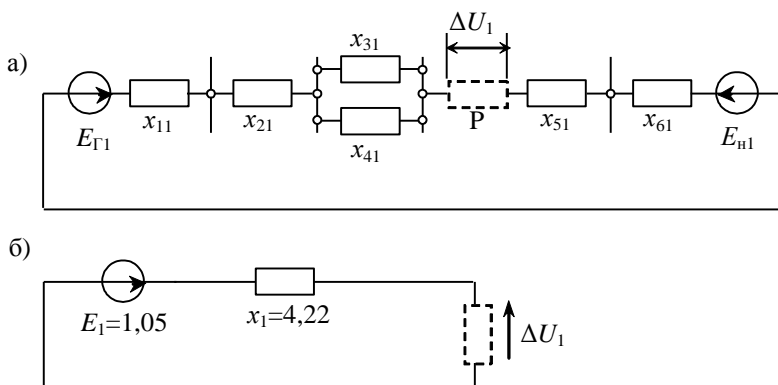


Рис. 11.3. Схема замещения (а) и эквивалентная схема замещения (б) прямой последовательности при продольной несимметрии – разрыв цепи в месте Р

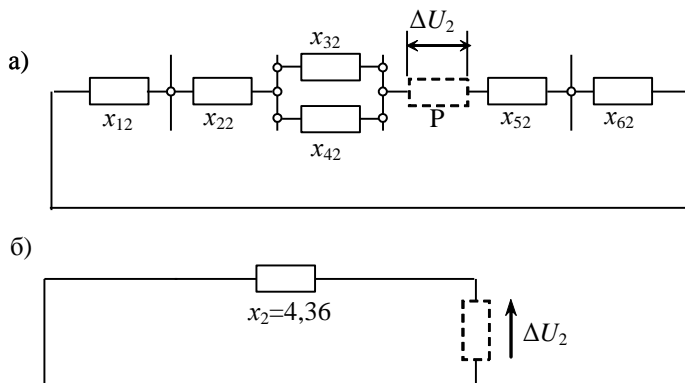


Рис 11.4. Схема замещения (а) и эквивалентная схема замещения (б) обратной последовательности при продольной несимметрии – разрыв цепи в месте P

§ 11.2. Составление расчетной схемы нулевой последовательности

Ток нулевой последовательности является однофазным током, который протекает от места повреждения цепи одновременно по проводам трех фаз и возвращается через землю и параллельные ей токопроводящие цепи.

Составление схемы нулевой последовательности начинают обычно от места возникновения несимметрии цепи, считая, что в этом месте все три фазы замкнуты между собой накоротко и к ним приложено напряжение нулевой последовательности (рис. 11.5).

В случае поперечной несимметрии, т. е. при коротком замыкании в цепи, когда напряжение U_0 приложено относительно земли (см. рис. 11.5, а), для циркуляции тока нулевой последовательности в цепи необходима хотя бы одна заземленная нейтраль (при отсутствии емкостной проводимости); при нескольких заземленных нейтралях для тока нулевой последовательности образуется несколько параллельных контуров.

В случае продольной несимметрии, т. е. при разрыве цепи, когда напряжение U_0 приложено последовательно с проводами цепи (см. рис. 11.5, б), необходимо наличие хотя бы двух заземленных

нейтралей - по обе стороны от места повреждения. Если же в схеме имеется замкнутый контур через обходные пути, циркуляция тока нулевой последовательности обеспечивается даже при отсутствии заземлений. При этом в земле по трассе контура циркулирует наведенный ток.

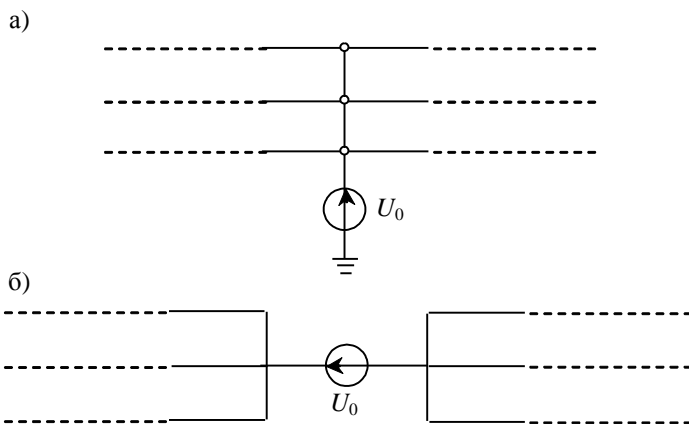


Рис. 11.5. Принципиальная схема приложения напряжения нулевой последовательности для поперечной (а) и продольной (б) несимметрии

В случае заземления нейтрали трансформаторов, генераторов, нагрузки через сопротивление, последнее в схему замещения нулевой последовательности должно быть введено утроенной величиной, так как схема составляется для одной фазы, а через указанное сопротивление протекает ток нулевой последовательности всех трех фаз.

В качестве примера составления схемы замещения нулевой последовательности на рис. 11.6, а приведена исходная схема, состоящая из двух генераторов, автотрансформатора, трансформаторов связи, и схема замещения (рис. 11.6, б) при возникновении поперечной несимметрии. Видно, что путь циркуляции токов нулевой последовательности зависит от схемы соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов и поэтому при составлении схемы замещения следует руководствоваться указаниями, приведенными в приложении.

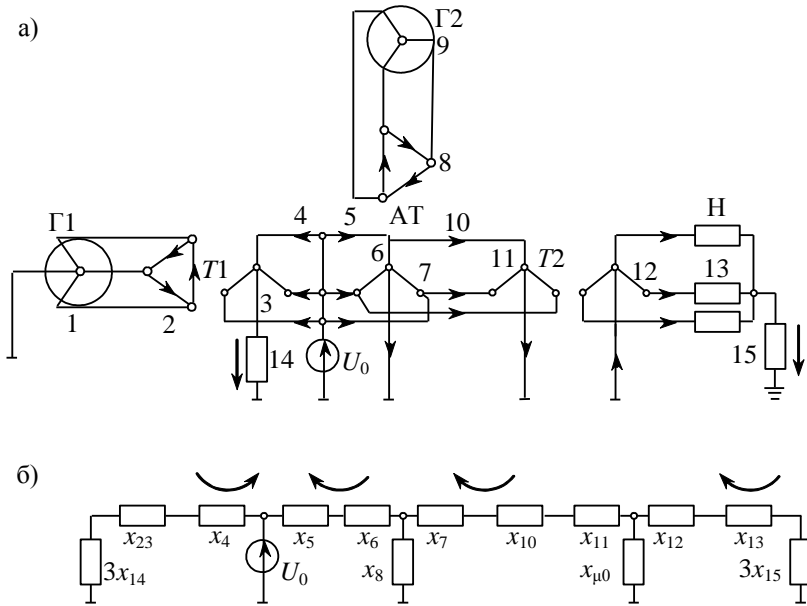


Рис. 11.6. Пример составления на основе исходной схемы (а) схемы замещения (б) нулевой последовательности

Возвращаясь к примеру § 11.1, можно теперь составить схему замещения нулевой последовательности. В эту схему, как видно из рис. 11.7, а, не входит сопротивление нулевой последовательности генератора и обобщенной нагрузки, так как при указанном соединении обмоток трансформаторов Т1и Т2 (см. рис. 11.1) нет пути токам нулевой последовательности через «треугольник». Сопротивление нулевой последовательности линии со стальным грозозащитным тросом, в соответствии с табл. П.2 приложения, будет равно трехкратному значению сопротивления прямой последовательности. Сопротивление дугогасящей катушки, включенной в нейтраль трансформатора,

$$x_{70} = 3x_7 (\text{о. е.}) = 3 \cdot x_7 (\text{Ом}) \frac{S_{\delta}}{U_{\text{Л.6}}^2} = 3 \cdot 10 \frac{1000}{121^2} = 2.$$

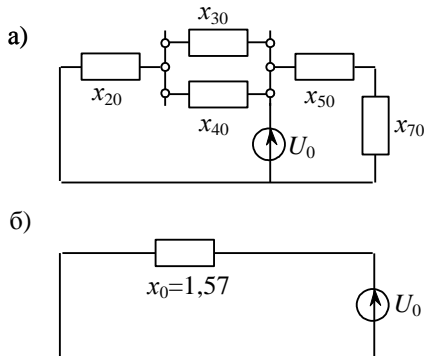


Рис. 11.7. Схема замещения (а) и эквивалентная схема замещения (б) нулевой последовательности при поперечной несимметрии – короткое замыкание в точке К1 на рис. 11.1

Таким образом, численные значения сопротивлений схемы замещения нулевой последовательности таковы

$$x_{20} = x_{21} = 0,42, \quad x_{30} = x_{40} = 3 \cdot x_{31} = 8,1, \\ x_{50} = x_{51} = 0,42, \quad x_{70} = 2.$$

Результирующее сопротивление схемы нулевой последовательности при поперечной несимметрии

$$x_0 = \left(x_{20} + \frac{x_{30}}{2} \right) // (x_{50} + x_{70}) = (4,47) // (2,42) = 1,57.$$

Эквивалентная схема замещения нулевой последовательности, в которой $x_0 = 1,57$, помещена на рис. 11.7, б.

В случае продольной несимметрии в рассматриваемой электропередаче при разрыве цепи в выключателе со стороны высокого напряжения трансформатора Т2 схема замещения нулевой последовательности будет включать те же элементы, что и при поперечной несимметрии, однако результирующее сопротивление схемы замещения вычисляется с учетом последовательного включения в цепь падения напряжения нулевой последовательности в месте разрыва Р, как показано на рис. 11.8, а.

Результирующее сопротивление схемы вычисляется так

$$x_0 = x_{20} + (x_{30} // x_{40}) + x_{50} + x_{70} = 0,42 + 4,05 + 0,42 + 2 = 6,9.$$

Эквивалентная схема нулевой последовательности при продольной несимметрии помещена на рис. 11.8, б.

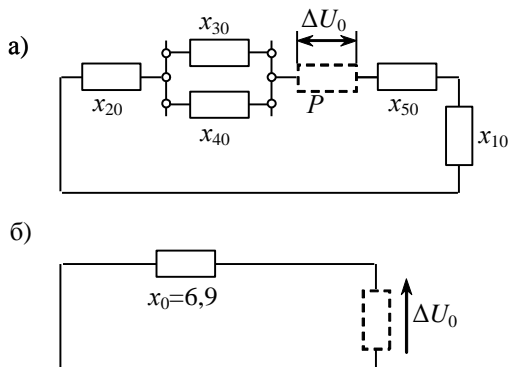


Рис. 11.8. Схема замещения (а) и эквивалентная схема замещения (б) нулевой последовательности при продольной несимметрии – разрыв цепи в месте P

§ 11.3. Составление комплексных схем замещения и построение векторных диаграмм

Составление комплексных схем замещения осуществляется на основе аналитических зависимостей, характеризующих вид несимметрии, как показано в гл. 8 и 9. Так, например, в электропередаче рис 11.1 для различных видов нарушения режима будет соответствующая схема замещения.

Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании в точке K1 (рис. 11.1, а) будет состоять из двух эквивалентных схем, электрически соединенных так, как показано на рис. 11.9, а. Ток прямой последовательности и напряжения в этой схеме определяются по формулам, помещенным в § 8.1,

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + x_2} = \frac{1}{1,03 + 1,06} = 0,48,$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = jx_2 \dot{I}_1 = j0,51.$$

Токи в фазах цепи и напряжения фаз

$$\dot{I}_B = -j\sqrt{3}\dot{I}_1 = -j0,83, \quad \dot{I}_C = j\sqrt{3}\dot{I}_1 = j0,83,$$

$$\dot{U}_A = 2\dot{U}_1 = j1,02, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_C = -jx_2 \dot{I}_1 = -j0,51.$$

Векторная диаграмма режима для рассматриваемой электропередачи построена на рис. 11.9, б по вычисленным значениям.

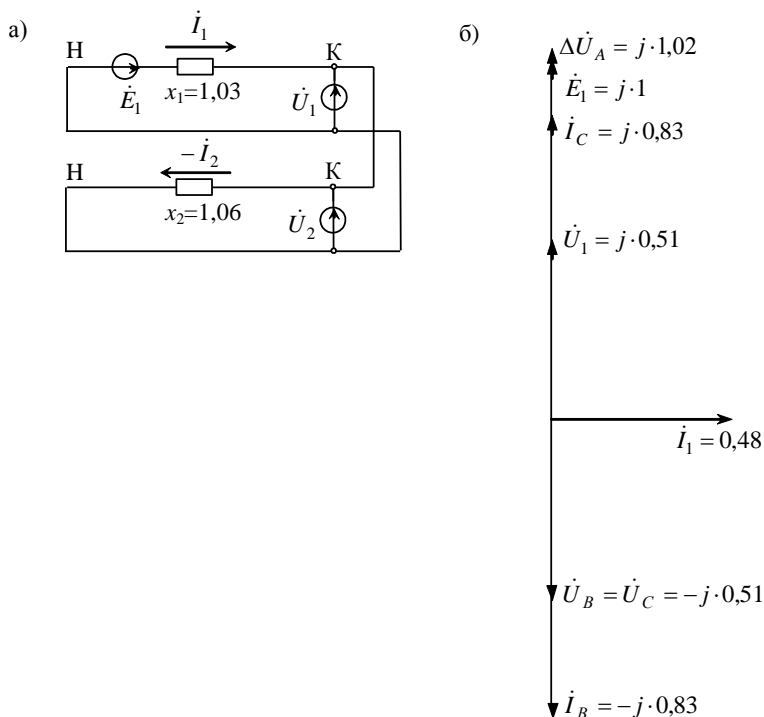


Рис. 11.9. Комплексная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) при двухфазном коротком замыкании

Комплексная схема замещения при однофазном к.з. в точке К1 (см. рис. 11.1, а) будет состоять из трех эквивалентных схем, электрически соединенных так, как показано на рис. 11.10, а.

Ток прямой последовательности и напряжения в этой схеме определяются по следующим зависимостям:

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + x_2 + x_0} = \frac{1}{3,66} = 0,27 ;$$

$$\dot{U}_1 = j(x_2 + x_0)I_1 = j2,63 \cdot 0,27 = j0,72 ;$$

$$\dot{U}_2 = -jx_2 I_1 = -j0,29; \quad \dot{U}_0 = -jx_0 I_1 = -j0,43.$$

Токи в фазах цепи и напряжение фаз

$$\dot{I}_A = 3\dot{I}_1 = 0,81;$$

$$\dot{U}_B = a^2 j(x_2 + x_0)\dot{I}_1 - ajx_2\dot{I}_1 - jx_0\dot{I}_1 = a^2 j0,72 - aj0,29 - j0,43;$$

$$\dot{U}_C = aj(x_2 + x_0)\dot{I}_1 - a^2 jx_2\dot{I}_1 - jx_0\dot{I}_1 = aj0,72 - a^2 j0,29 - j0,43;$$

$$\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}(2x_2 + x_0)\dot{I}_1 = \sqrt{3}(2,12 + 1,57)0,27 = 1,75.$$

Векторная диаграмма режима построена по вычисленным значениям на рис. 11.10, б. Из нее видно, что фазные напряжения \dot{U}_B, \dot{U}_C возрастают до 1,1 о.е., т. е. на 10 %.

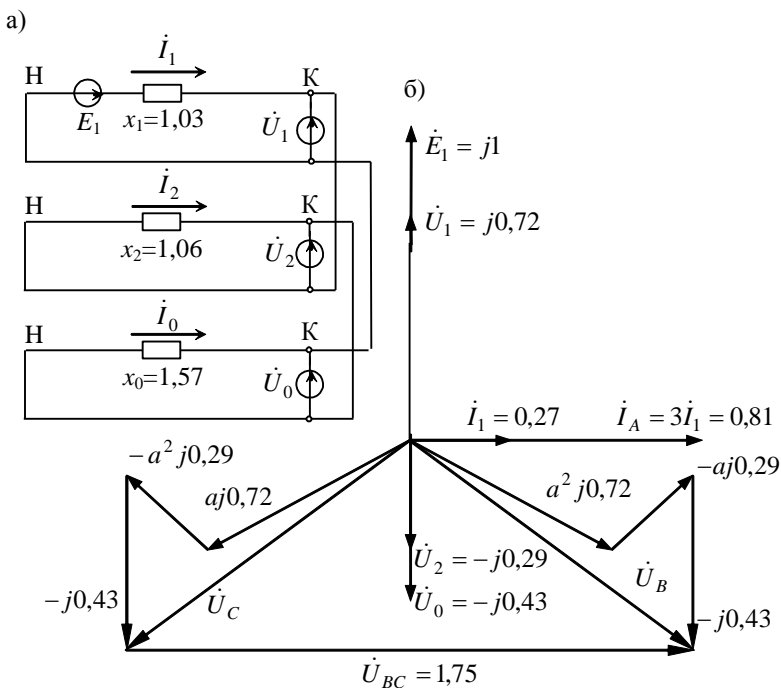


Рис. 11.10. Комплексная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) при однофазном коротком замыкании

Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании на землю в точке К1 (см. рис. 11.1, а) будет состоять из трех эквива-

лентных схем, электрически соединяемых, как показано на рис. 11.11, а.

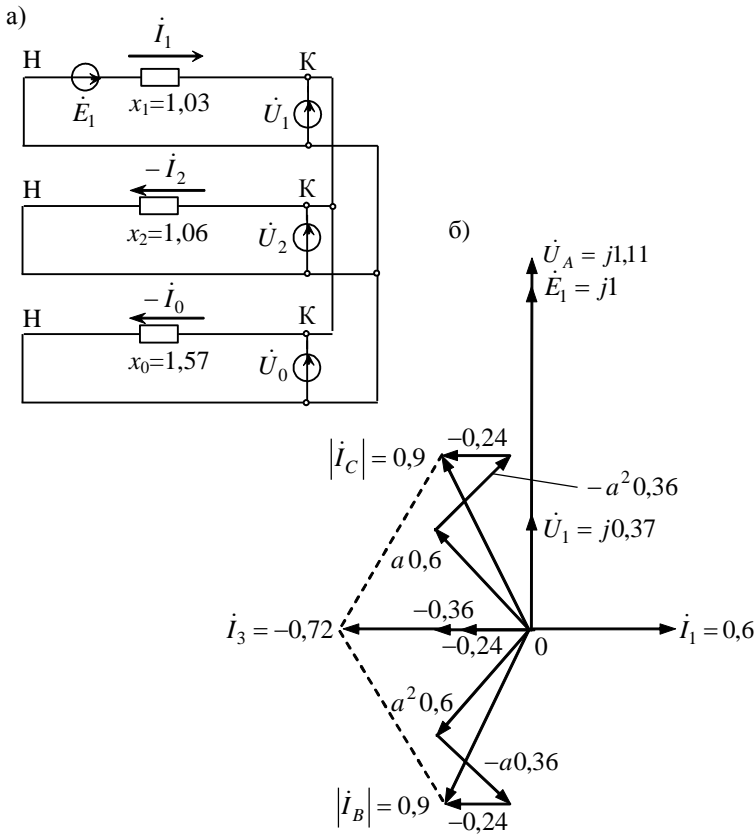


Рис. 11.11. Комплексная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) при двухфазном коротком замыкании на землю

Ток прямой последовательности и напряжения в этой схеме определяются по следующим зависимостям:

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0}} = \frac{1}{1,03 + \frac{1,06 \cdot 1,57}{1,06 + 1,57}} = 0,6 ;$$

$$\dot{U}_1 = j \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 = j0,63 \cdot 0,6 = j0,37, \quad U_A = 3\dot{U}_1 = j \cdot 1,11;$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_1}{jx_2} = -0,36, \quad \dot{I}_0 = -\frac{\dot{U}_1}{jx_0} = -0,24.$$

Токи в фазах цепи и напряжения фаз

$$\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 - a \frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 - \frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 = a^2 0,6 - a0,36 - 0,24;$$

$$\dot{I}_C = a0,6 - a^2 0,36 - 0,24;$$

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_2 \cdot x_0}{(x_2 + x_0)^2}} = \sqrt{3} \sqrt{1 - 0,24} = 1,5;$$

$$|\dot{I}_B| = |\dot{I}_C| = m^{(1,1)} \cdot \dot{I}_1 = 1,5 \cdot 0,6 = 0,9.$$

Ток в землю (ток в нейтрали)

$$\dot{I}_3 = -\frac{3x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 = -1,21 \cdot 0,6 = -0,72.$$

Векторная диаграмма режима по вычисленным значениям построена на рис. 11.11, б.

Комплексная схема замещения при разрыве одной фазы цепи в месте P (рис. 11.3) будет состоять из трех эквивалентных схем, электрически соединенных, как показано на рис. 11.12, а.

Ток прямой последовательности и напряжения в этой схеме определяется по зависимостям, помещенным в §. 9.1, а именно

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + x_2 // x_0} = \frac{1}{4,22 + 4,36 // 6,9} = 0,15;$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 = -0,6 \cdot 0,15 = -0,09;$$

$$\dot{I}_0 = -\frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 = -0,4 \cdot 0,15 = -0,06;$$

$$\Delta \dot{U}_1 = j(x_2 // x_0) \dot{I}_1 = j2,67 \cdot 0,15 = j0,4.$$

Напряжение между концами разрыва и аварийные токи в фазах

$$\Delta \dot{U}_A = 3\Delta \dot{U}_1 = j1,2;$$

$$\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 - a \frac{x_0}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 - \frac{x_2}{x_2 + x_0} \dot{I}_1 = a^2 \cdot 0,15 - a \cdot 0,09 - 0,06;$$

$$\dot{I}_C = a \cdot 0,15 - a^2 \cdot 0,09 - 0,06;$$

$$m = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_2 x_0}{(x_2 + x_0)^2}} = \sqrt{3} \sqrt{1 - 0,24} = 1,5 ;$$

$$|\dot{I}_B| = |\dot{I}_C| = m \dot{I}_1 = 1,5 \cdot 0,15 = 0,22.$$

Векторная диаграмма режима построена по вычисленным значениям на рис. 11.12, б.

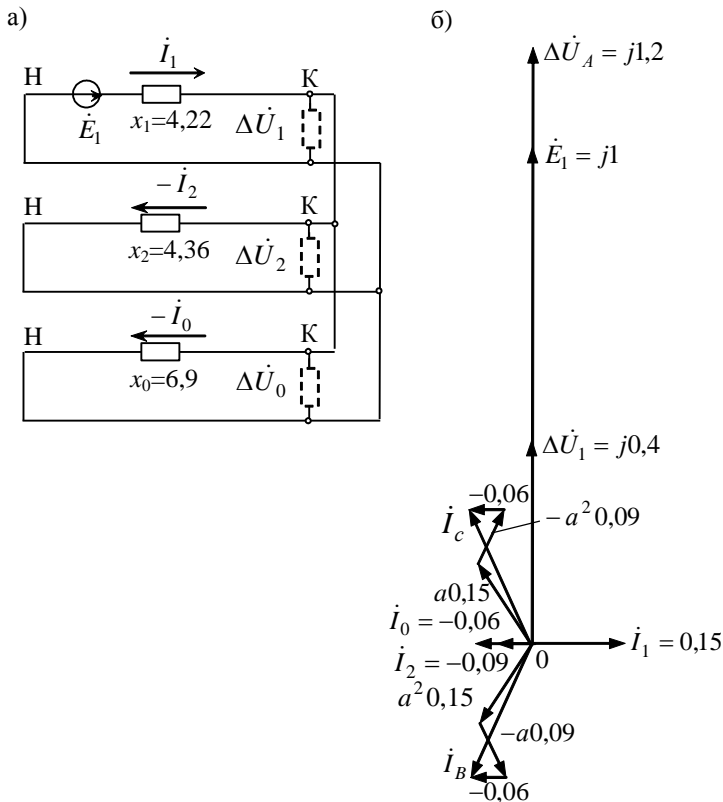
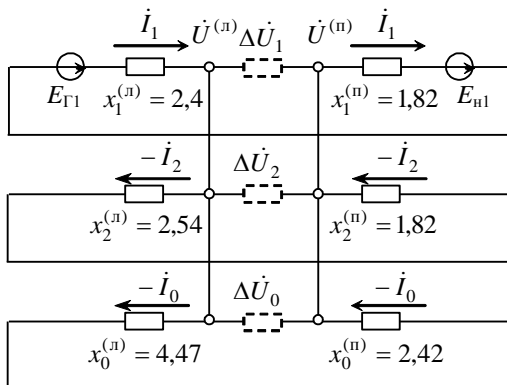


Рис. 11.12. Комплексная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) при разрыве одной фазы

В случае необходимости расчета величин напряжений в месте разрыва цепи составляется схема замещения, как показано на рис. 11.13, а. В этой схеме напряжения слева от разрыва равны

$$\dot{U}_1^{(n)} = j(\Delta x + x_1^{(n)})\dot{I}_1 = j(2,67 + 1,82) \cdot 0,15 = j0,67,$$

а)



б)

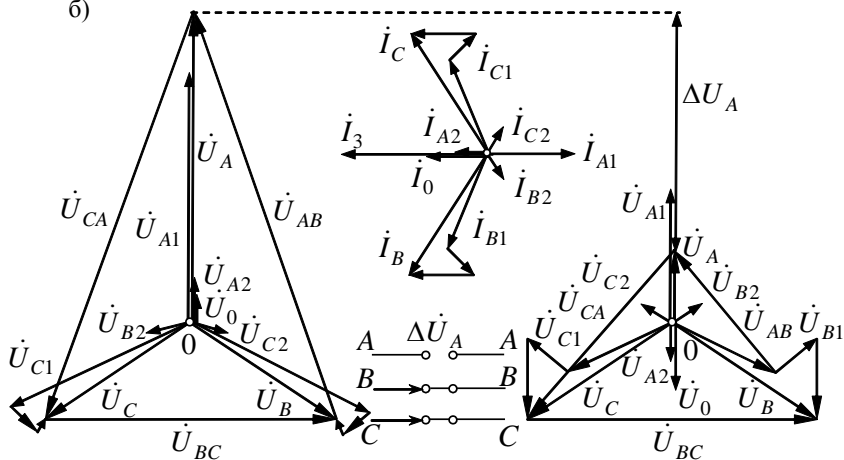


Рис. 11.13. Комплексная схема замещения (а) и векторные диаграммы напряжения (б) в месте разрыва цепи одной фазы

где

$$\Delta x = x_2 // x_0 = 4,36 // 6,9 = 2,67;$$

$$x_2 = 4,36, \text{ (см. рис. 11.4), } x_0 = 6,9 \text{ (см. рис. 11.8, б);}$$

$$x_1^{(n)} = x_{51} + x_{61} = 0,42 + 1,4 = 1,82 \text{ (см. рис. 11.3, а);}$$

$$\dot{U}_2^{(n)} = -jx_2^{(n)}\dot{I}_2 = -j2,54(-0,09) = j0,23;$$

$$x_1^{(n)} = x_{12} + x_{22} + x_{32} // x_{42} = 0,77 + 0,42 + 1,35 = 2,54 \text{ (см. рис. 11.4, а);}$$

$$\dot{U}_0^{(n)} = -jx_0^{(n)}\dot{I}_0 = -j4,47(-0,06) = j0,27;$$

$$x_0^{(n)} = x_{20} + x_{30} // x_{40} = 0,42 + 4,05 = 4,47 \text{ (см. рис. 11.8, а),}$$

напряжения справа от разрыва

$$U_1^{(n)} = jx_1^{(n)}\dot{I}_1 = 1,82 \cdot 0,15 = 0,27;$$

$$\dot{U}_2^{(n)} = jx_2^{(n)}\dot{I}_2 = j1,82(-0,09) = -0,16;$$

$$\dot{U}_0^{(n)} = jx_0^{(n)}\dot{I}_0 = j2,42(-0,06) = -0,14.$$

По вычисленным значениям строятся векторные диаграммы напряжений в месте разрыва, слева и справа от разрыва (рис. 11.13, б).

Построение производится относительно тока прямой последовательности. Сначала строится векторная диаграмма напряжений слева от разрыва для фаз A, B, C , а затем – векторная диаграмма напряжений справа от разрыва с учетом величины напряжения между концами разрыва фазы $\Delta U_A = 1,2$.

Комплексная схема замещения при разрыве двух фаз цепи в месте Р (см. рис. 11.3, а) будет состоять из трех эквивалентных схем, электрически соединенных, как показано на рис. 11.14, а. Ток прямой последовательности и напряжения в этой схеме определяются по зависимостям (см. § 9.2)

$$I_1 = \frac{E_1}{(x_1 + x_2 + x_0)} = \frac{1}{(4,22 + 4,36 + 6,9)} = 0,07;$$

$$\Delta \dot{U}_1 = j(x_2 + x_0)\dot{I}_1 = j11,25 \cdot 0,07 = j0,8;$$

$$\Delta \dot{U}_2 = -jx_2\dot{I}_2 = -j \cdot 4,36 \cdot 0,07 = -j \cdot 0,3;$$

$$\Delta \dot{U}_0 = -jx_0\dot{I}_0 = -j \cdot 6,9 \cdot 0,07 = -j \cdot 0,5.$$

Напряжения между концами разрывов и аварийный ток

$$\Delta \dot{U}_B = a^2 j(x_2 + x_0)\dot{I}_1 - ajx_2\dot{I}_1 - jx_0\dot{I}_1 = a^2 j0,8 - aj0,3 - j0,5;$$

$$\Delta \dot{U}_C = aj0,8 - a^2 j0,3 - j0,5;$$

$$\Delta \dot{U}_{BC} = \Delta \dot{U}_B - \Delta \dot{U}_C = \sqrt{3}(2x_2 + x_0)\dot{I}_1 = \sqrt{3}(2 \cdot 4,36 + 6,9) \cdot 0,07 = 1,9;$$

$$\dot{I}_A = 3\dot{I}_1 = 0,21.$$

Векторная диаграмма режима построена по вычисленным значениям на рис. 11.14, б.

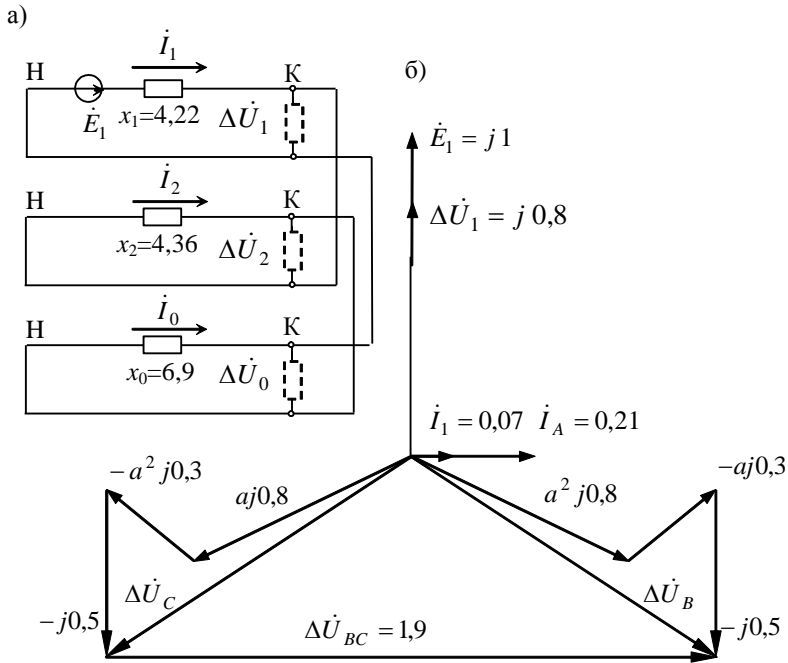


Рис. 11.14. Комплексная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) при разрыве двух фаз

При необходимости расчета величин напряжений в месте разрыва цепи составляется развернутая комплексная схема замещения, как показано на рис. 11.15, а. В этой схеме напряжения слева от разрыва равны

$$\dot{U}_1^{(n)} = j(x_1^{(n)} + \Delta x) \dot{I}_1 = j(1,82 + 11,25) \cdot 0,07 = j0,91,$$

где

$$\Delta x = x_2^{(n)} + x_2^{(n)} + x_0^{(n)} + x_0^{(n)} = x_2 + x_0 = 11,25;$$

$$\dot{U}_2^{(n)} = -jx_2^{(n)} \dot{I}_2 = -j2,54 \cdot 0,07 = -j0,18;$$

$$\dot{U}_0^{(n)} = -jx_0^{(n)} \dot{I}_0 = -j4,47 \cdot 0,07 = -j0,3,$$

напряжения справа от разрыва равны

$$\dot{U}_1^{(m)} = jx_1^{(m)} \dot{I}_1 = j1,82 \cdot 0,07 = j0,13;$$

$$\dot{U}_2^{(m)} = jx_2^{(m)} \dot{I}_2 = j1,82 \cdot 0,07 = j0,13;$$

$$\dot{U}_0^{(n)} = jx_0^{(n)} \dot{I}_0 = j2,42 \cdot 0,07 = j0,17.$$

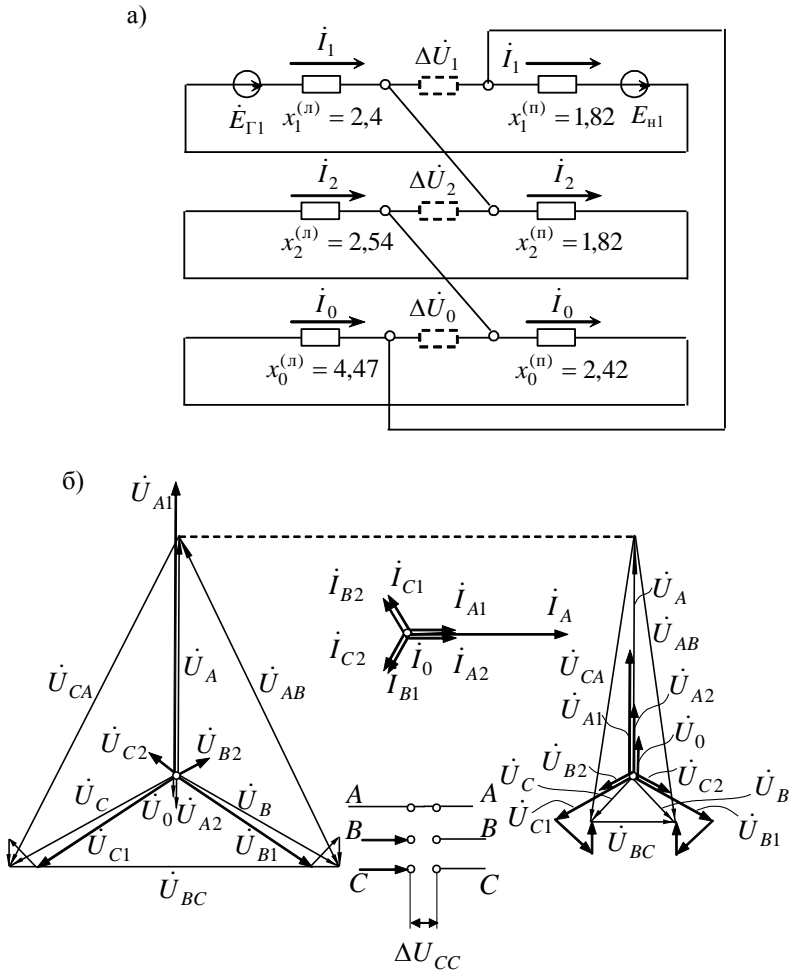


Рис. 11.15. Развернутая комплексная схема замещения (а) и векторные диаграммы напряжений (б) в месте разрыва цепи двух фаз

По вычисленным значениям строятся векторные диаграммы напряжений в месте разрыва, слева и справа от разрыва (рис. 11.15, б). Построение производится относительно тока прямой последовательности. Сначала

строится векторная диаграмма напряжений слева от разрыва для фаз A , B , C , а затем - векторная диаграмма напряжений справа от разрыва с построением векторов напряжений между фазами A , B , C .

§ 11.4. Расчет тока в обмотке статора синхронного генератора при несимметричных коротких замыканиях

В соответствии с ПУЭ [20] у синхронных генераторов должна быть предусмотрена релейная защита от повреждений при возникновении многофазных к.з. и однофазных коротких замыканий на землю на выводах статорной обмотки генератора.

Представляет интерес сопоставить величины токов при этих коротких замыканиях.

При трехфазном к.з. величина тока

$$I^{(3)} = \frac{E''}{x_d''}. \quad (11.1)$$

При однофазном к.з. величина тока рассчитывается так (см. формулы (8.5), (8.7)):

ток прямой последовательности

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + x_2 + x_0} \quad \text{или} \quad I_1 = \frac{E''}{x_d'' + x_2 + x_0}; \quad (11.2)$$

и ток в фазе

$$I^{(1)} = m^{(1)} I_1 = 3 \cdot I_1. \quad (11.3)$$

Для турбогенератора ТВФ-100-2 и гидрогенератора СВ-1130/250-48, параметры которых указаны в табл. 13.1, имеем

для турбогенератора по формулам (11.1), (11.2), (11.3)

$$I^{(3)} = \frac{1}{0,214} = 4,67 \text{ о.е.}, \quad I_1 = \frac{1}{0,214 + 0,261 + 0,11}$$

$$I^{(1)} = 3 \cdot 1,71 = 5,13 \text{ о.е.}$$

для гидрогенератора

$$I^{(3)} = \frac{1}{0,205} = 4,87 \text{ о.е.}, \quad I_1 = \frac{1}{0,205 + 0,2 + 0,11}$$

$$I^{(1)} = 3 \cdot 1,94 = 5,82 \text{ о.е.}$$

При двухфазном к.з. величина токов рассчитывается так (см. формулы (8.1), (8.3)):

ток прямой последовательности

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + x_2} \quad \text{или} \quad I_1 = \frac{E''}{x_d'' + x_2}, \quad (11.4)$$

ток в фазе

$$I^{(2)} = m^{(2)} I_1 = \sqrt{3} I_1. \quad (11.5)$$

Соответственно

для турбогенератора по формулам (11.4), (11.5)

$$I_1 = \frac{1}{0,214 + 0,261} = 2,1,$$

$$I^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 2,1 = 3,64;$$

для гидрогенератора

$$I_1 = \frac{1}{0,205 + 0,2} = 2,47,$$

$$I^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 2,47 = 4,27.$$

При двухфазном к.з. на землю величина токов рассчитывается (см. формулы (8.13), (8.15)):

ток прямой последовательности

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0}} \quad \text{или} \quad I_1 = \frac{E''}{x_d'' + \frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0}}; \quad (11.6)$$

ток в фазе

$$I^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_1 = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_2 x_0}{(x_2 + x_0)^2}}. \quad (11.7)$$

Соответственно

для турбогенератора по формуле (11.6)

$$I_1 = \frac{1}{0,214 + \frac{0,261 \cdot 0,11}{0,261 + 0,11}} = 3,43,$$

$$I^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_1 = 1,54 \cdot 3,43 = 5,28;$$

для гидрогенератора

$$I_1 = \frac{1}{0,205 + \frac{0,2 \cdot 0,11}{0,2 + 0,11}} = 3,62,$$

$$I^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_1 = 1,52 \cdot 3,62 = 5,5.$$

В табл. 11.1 помещены для сопоставления полученные результаты.

Таблица 11.1

Вид короткого замыкания	Обозначение	Ток короткого замыкания, о.е.	
		Турбогенератор	Гидрогенератор
		ТВФ-100-2	СВ-1130/250-48
"3"	I_A	4,67	4,87
"1"	I_I	1,71	1,94
	I_A	5,13	5,82
"2"	I_I	2,1	2,47
	I_A	3,64	4,27
"1,1"	I_I	3,43	3,62
	I_A	5,28	5,5

Как видно из табл. 11.1, ток при однофазном к.з. превышает ток при трехфазном к.з. статорной обмотки генераторов на 12- 20 %, а при двухфазном к.з. на землю - на 13 %.

§ 11.5. Расчет режима асинхронного электродвигателя при разрыве фазы

Режим электродвигателя при разрыве одной фазы рассматривается как режим цепи с продольной несимметрией. На рис. 11.16, а показана принципиальная схема включения электродвигателя на шины трансформаторной подстанции. Разрыв фазы имеет место в выключателе *B* электродвигателя. При разрыве одной фазы цепи комплексная схема замещения должна включать три эквивалентные схемы: прямой, обратной и нулевой последовательностей. В данном случае схемы нулевой последовательности нет, так как нет пути циркуляции току нулевой последовательности через понижающую обмотку трансформатора и обмотку электродвигателя, соединенных в «треугольник».

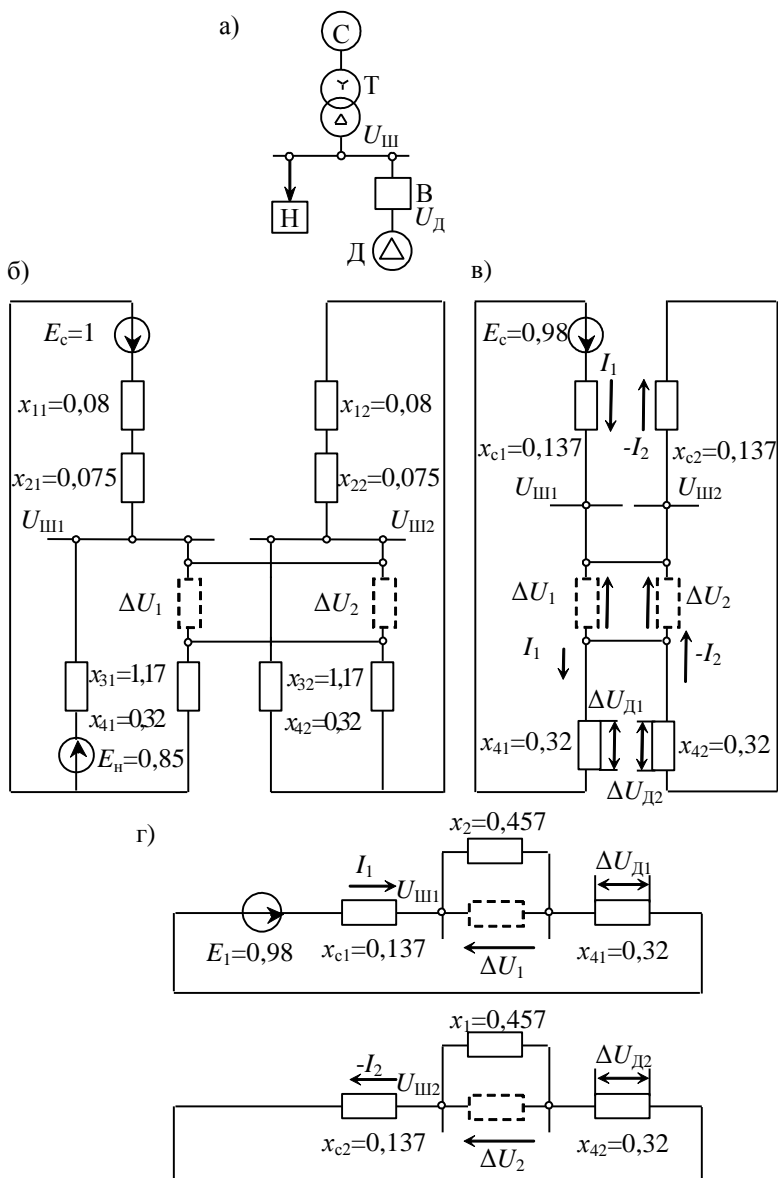


Рис. 11.16. Принципиальная схема (а) и комплексные схемы замещения (б, в, г) при включении электродвигателя на две фазы

Развернутая комплексная схема замещения, состоящая из эквивалентных схем замещения прямой и обратной последовательностей, показана на рис. 11.16, б. Порядок расчета иллюстрируется следующим примером. Электродвигатель типа АГД-4000, мощностью $P_{\text{ном}} = 4$ мВт при $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta = 0,96$, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,91$, $k_i = 6,3$, включается на шины трансформатора типа ТД-10000/35 мощностью 10 МВ·А при $U_{\text{H,ном}} = 6,3$ кВ, $u_{\text{к}} = 7,5$ %. Обобщенная асинхронная нагрузка трансформатора $S_{\text{H}} = 3$ МВ·А, $E''_{\text{H}} = 0,85$ о. е., $x''_{\text{H}} = x_{\text{H1}} = x_{\text{H2}} = 0,35$ о. е. Трансформатор включен на шины электрической системы, у которой $S_{\text{с}} = 4320$ МВ·А; $E''_{\text{с}} = 1$ о. е.; $x_{\text{с}} = 35$ о. е.

При заданных значениях параметров сопротивления схемы замещения для базисных значений $S_{\text{б}} = 10$ МВ·А и $U_{\text{б}} = 6,3$ кВ вычисляются так

$$x_{11} = x_{12} = x_{\text{с}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{с}}} = 35 \frac{10}{4320} = 0,08;$$

$$x_{21} = x_{22} = \frac{u_{\text{к}} \%}{100} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{T,ном}}} = \frac{7,5 \cdot 10}{100 \cdot 10} = 0,075;$$

$$x_{31} = x_{32} = x''_{\text{H}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{H}}} = 0,35 \frac{10}{3} = 1,17;$$

$$x_{41} = x_{42} = x_{\text{к.з}} = \frac{1}{k_i} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{Д,ном}}} \left(\frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{б}}} \right)^2 = \frac{1 \cdot 10}{6,3 \cdot 4,56} \left(\frac{6}{6,3} \right)^2 = 0,32.$$

Для комплексной схемы замещения эквивалентная ЭДС (см. рис. 11.16, б)

$$E_1 = \frac{x_{31} E''_{\text{с}} + (x_{11} + x_{21}) E''_{\text{H}}}{x_{31} + (x_{11} + x_{21})} = \frac{1,17 \cdot 1 + 0,155 \cdot 0,85}{1,325} = 0,98.$$

Результирующее сопротивление эквивалентных схем (рис. 11.16, в)

$$x_1 = x_2 = 0,457.$$

Пусковой ток прямой последовательности при включении электродвигателя на две фазы в сеть

$$I_1 = \frac{E_1}{x_1 + x_2} = \frac{0,98}{2 \cdot 0,457} = 0,9;$$

пусковой ток в фазе (для $x_0 = 0$)

$$I_{\text{ф}} = \sqrt{3} I_1 = 1,6.$$

Кратность пускового тока при разрыве одной фазы относительно номинального значения тока

$$k_i^{(1)} = \frac{I_{\Phi} I_{\delta}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{1,6 \cdot 0,92}{0,44} = 3,34,$$

где

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}} = \frac{10}{1,73 \cdot 6,3} = 0,92 \text{ кА};$$

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{Д,НОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}} = \frac{4,56}{1,73 \cdot 6} = 0,44 \text{ кА}.$$

Пусковой ток в фазе уменьшится в $k_i / k_i^{(1)} = 1,9$ раза.

Комплексная схема замещения рис 11.16, в для наглядности расчета напряжений может быть представлена в виде комплексных схем рис 11.16, г. Напряжение прямой и обратной последовательностей на шинах подстанции при включении электродвигателя

$$U_{\text{III1}} = (x_2 + x_{41})I_1 = 0,78 \cdot 0,9 = 0,7;$$

$$U_{\text{III2}} = x_{c2}(-I_2) = 0,137(-0,9) = -0,12.$$

Вращающие моменты электродвигателей в составе обобщенной нагрузки для прямого и обратного магнитных полей определяются так

$$M_1 = M_{\text{НОМ}} U_{\text{III1}}^2 = \left(0,7 \frac{6,3}{6}\right)^2 M_{\text{НОМ}} = 0,6 M_{\text{НОМ}};$$

$$M_2 = M_{\text{НОМ}} U_{\text{III2}}^2 = \left(0,12 \frac{6,3}{6}\right)^2 M_{\text{НОМ}} = 0,016 M_{\text{НОМ}}.$$

Таким образом, вращающие моменты работающих электродвигателей уменьшаются на 40 %. Вращающим моментом, создаваемым обратным полем в электродвигателях, можно пренебречь - его величина менее 2 %.

Вместе с тем напряжения прямой и обратной последовательностей на зажимах включаемого электродвигателя (см. рис. 11.16, г)

$$U_{\text{Д1}} = \Delta U_1 = x_{41} I_1 = 0,32 \cdot 0,9 = 0,29;$$

$$U_{\text{Д2}} = \Delta U_2 = x_{42} (-I_2) = 0,32(-0,9) = -0,29.$$

Следовательно, электродвигатель не будет разгоняться, потому что прямое и обратное магнитные поля создают равные по величине, но противоположные по знаку вращающие моменты.

§ 11.6. Расчет токов в схеме электроснабжения при несимметричных коротких замыканиях

Постановка задачи. Для схемы электрических соединений (см. рис. 5.5) и по исходным данным этой схемы требуется рассчитать для моментов времени $t=0$ и $t=0,1$ с в точке $K1$ токи короткого замыкания:

ток при однофазном к.з.;

ток при двухфазном к.з.;

ток при двухфазном к.з. на землю.

Отметим, что для всех указанных несимметричных к.з. будут общая схема замещения прямой последовательности и одинаковые численные значения сопротивлений элементов в схемах обратной и нулевой последовательностей, но соединение сопротивлений элементов в этих схемах будет различным.

Схема замещения прямой последовательности для короткого замыкания в точке $K1$ соответствует рис. 5.8. Сопротивление ветвей принимается из примера расчета § 5.3

$$x_{c.pez(1)} = 1,45, \quad x_{Г.pez(1)} = 1,05.$$

Результирующее сопротивление прямой последовательности

$$x_{pez(1)} = \frac{x_{c.pez(1)}x_{Г.pez(1)}}{x_{c.pez(1)} + x_{Г.pez(1)}} = \frac{1,45 \cdot 1,05}{2,5} = 0,61.$$

Схема замещения обратной последовательности также соответствует рис. 5.8, но без ЭДС. Сопротивление ветви системы

$$x_{c.pez(2)} = x_{c.pez(1)} = 1,45.$$

Сопротивление ветви генераторов

$$x_{Г.pez(2)} = \frac{(x_{16(2)} + x_{4(2)})(x_{17(2)} + x_{5(2)})}{x_{\Sigma(2)}} = \frac{(1,5 + 0,84)^2}{4,68} = 1,18,$$

где

$$x_{16(2)} = 1,2x_{16(1)} = 1,2 \cdot 1,25 = 1,5, \quad x_{17(2)} = 1,5,$$

$$x_{4(2)} = x_{4(1)} = 0,84, \quad x_{5(2)} = x_{5(1)} = 0,84,$$

$$x_{\Sigma(2)} = x_{16(2)} + x_{4(2)} + x_{17(2)} + x_{5(2)} = 2(1,5 + 0,84) = 4,68.$$

Результирующее сопротивление обратной последовательности

$$x_{pez(2)} = \frac{x_{c.pez(2)}x_{Г.pez(2)}}{x_{c.pez(2)} + x_{Г.pez(2)}} = \frac{1,45 \cdot 1,18}{1,45 + 1,18} = 0,65.$$

Схема замещения нулевой последовательности с учетом режима нейтрали соответствует схеме рис. 11.17, а, в которой

$$x_{1(0)} = x_{1(1)} = 0,1;$$

$$x_{18(0)} = 5,5 \cdot x_{18(1)} = 5,5 \cdot 1,35 = 7,4;$$

$$x_{4(0)} = x_{4(1)} = 0,84, \quad x_{5(0)} = x_{5(1)} = 0,84.$$

Результирующее сопротивление нулевой последовательности относительно точки К1

$$x_{\text{рез}(0)} = \frac{x_{4,5(0)}(x_{1(0)} + x_{18(0)})}{x_{4,5(0)} + x_{1(0)} + x_{18(0)}} = \frac{0,42(0,1 + 7,4)}{0,42 + 0,1 + 7,4} = 0,4;$$

где

$$x_{4,5(0)} = \frac{x_{4(0)}x_{5(0)}}{x_{4(0)} + x_{5(0)}} = \frac{0,84^2}{1,68} = 0,42.$$

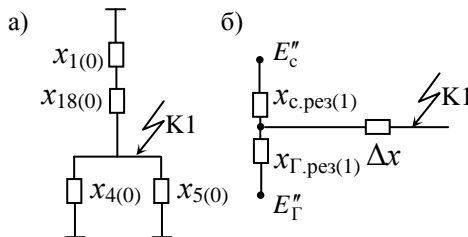


Рис. 11.17. Схемы замещения
а – нулевой последовательности;
б – комплексная схема замещения

Однофазное короткое замыкание

Комплексная схема замещения для однофазного к.з. показана на рис. 11.17, б. В этой схеме

$$\Delta x = x_{\text{рез}(2)} + x_{\text{рез}(0)} = 0,65 + 0,4 = 1,05.$$

Эквивалентное сопротивление (результирующее сопротивление прямой последовательности)

$$x_3 = x_{\text{рез}(1)} = \frac{x_{\text{с.pez}(1)} x_{\Gamma.\text{pez}(1)}}{x_{\text{с.pez}(1)} + x_{\Gamma.\text{pez}(1)}} = \frac{1,45 \cdot 1,05}{2,5} = 0,61.$$

Коэффициенты токораспределения

$$c_c = \frac{x_3}{x_{\text{с.pez}(1)}} = \frac{0,61}{1,45} = 0,42, \quad c_{\Gamma} = \frac{x_3}{x_{\Gamma.\text{pez}(1)}} = \frac{0,61}{1,05} = 0,58.$$

Результирующее сопротивление

$$x_{\text{рез}} = x_3 + \Delta x = 0,61 + 1,05 = 1,66.$$

Сопротивление ветвей:

для системы
$$x_{\text{в.с}} = \frac{x_{\text{рез}}}{c_c} = \frac{1,66}{0,42} = 3,95,$$

для генераторов
$$x_{\text{в.Г}} = \frac{x_{\text{рез}}}{c_{\Gamma}} = \frac{1,66}{0,58} = 2,86.$$

Ток прямой последовательности в луче системы для начального момента к.з. ($t = 0$)

$$I_{1c}''^{(1)} = \frac{E_{1c}''}{x_{\text{в.с}}} I_{61} = \frac{1}{3,95} \cdot 4,78 = 1,21 \text{ кА},$$

где базисный ток $I_{61} = 4,78$ кА из расчета § 5.3;

для луча генераторов
$$I_{1\Gamma}''^{(1)} = \frac{E_{1\Gamma}''}{x_{\text{в.Г}}} I_{61} = \frac{1,13}{2,86} \cdot 4,78 = 1,9 \text{ кА},$$

и токи в фазах

$$I_c''^{(1)} = m^{(1)} I_{1c}''^{(1)} = 3 \cdot 1,21 = 3,63 \text{ кА}, \quad I_{\Gamma}''^{(1)} = m^{(1)} I_{1\Gamma}''^{(1)} = 3 \cdot 1,9 = 5,7 \text{ кА}.$$

Ток к.з. прямой последовательности для момента времени $t = 0,1$ с в луче системы определяется по графикам рис. 5.1.

Отношение токов

$$I_{\text{п0с.ном}}^{(1)} = \frac{I_{1c}''^{(1)}}{I_{\text{Лс.ном}}} = \frac{1,21}{19,1} = 0,06,$$

где

$$I_{\text{Лс.ном}} = S_c / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}) = 4000 / (\sqrt{3} \cdot 121) = 19,1.$$

Так как это отношение меньше единицы, то принимается

$$I_{1c0,1}^{(1)} = I_{1c}''^{(1)} = 1,21 \text{ кА}$$

и, следовательно, ток в фазе от системы

$$I_{c0,1}^{(1)} = I_c''^{(1)} = m^{(1)} I_{1c0,1}^{(1)} = 3 \cdot 1,21 = 3,63 \text{ кА}.$$

Отношение токов в луче генераторов

$$I_{\text{п0Г.ном}}^{(1)} = \frac{I_{1\Gamma}''^{(1)}}{I_{\text{ЛГ.ном}}} = \frac{1,9}{1,5} = 1,27,$$

где

$$I_{\text{ЛГ.ном}} = \frac{\Sigma S_{\Gamma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{4 \cdot 79}{1,73 \cdot 121} = 1,5 \text{ кА};$$

по графикам рис. 5.1 для $t = 0,1$ с определяется

$$\gamma_{0,1} = 0,98.$$

Ток прямой последовательности в луче генераторов

$$I_{IG0,1}^{(1)} = \gamma_{0,1} I_{IG}''^{(1)} = 0,98 \cdot 1,9 = 1,86 \text{ кА}$$

и ток в фазе по формуле (10.6)

$$I_{IG0,1}^{(1)} = m^{(1)} I_{IG0,1}^{(1)} = 3 \cdot 1,86 = 5,58 \text{ кА.}$$

Суммарный ток однофазного короткого замыкания в точке К1

$$I''^{(1)} = I_c''^{(1)} + I_G''^{(1)} = 3,63 + 5,7 = 9,33 \text{ кА;}$$

$$I_{0,1}^{(1)} = I_{c0,1}^{(1)} + I_{IG0,1}^{(1)} = 3,63 + 5,58 = 9,21 \text{ кА.}$$

Двухфазное короткое замыкание

Схемы замещения прямой и обратной последовательностей будут соответствовать схемам при однофазном к.з. и результирующие сопротивления их вычислены в предыдущем расчете, а именно:

$$x_{\text{рез}(1)} = 0,61, \quad x_{\text{рез}(2)} = 0,65.$$

Для этого режима $\Delta x = x_{\text{рез}(2)} = 0,65$.

Коэффициенты токораспределения для схемы, подобной рис. 11.17, б из предыдущего расчета:

$$c_c = 0,42, \quad c_G = 0,58.$$

Результирующее сопротивление

$$x_{\text{рез}} = x_3 + \Delta x = 0,61 + 0,65 = 1,26.$$

Сопротивление ветвей:

для системы

$$x_{\text{в.с}} = \frac{x_{\text{рез}}}{c_c} = \frac{1,26}{0,42} = 3;$$

для генераторов

$$x_{\text{в.Г}} = \frac{x_{\text{рез}}}{c_G} = \frac{1,26}{0,58} = 2,17.$$

Ток прямой последовательности в луче системы для начального момента к.з. ($t = 0$)

$$I_{1c}''^{(2)} = \frac{E_{1c}''}{x_{\text{в.с}}} I_{\delta 1} = \frac{1}{3} 4,78 = 1,6 \text{ кА;}$$

в луче генераторов

$$I_{1G}''^{(2)} = \frac{E_{1G}''}{x_{\text{в.Г}}} I_{\delta 1} = \frac{1}{2,17} 4,78 = 2,2 \text{ кА;}$$

токи в фазах

$$I_c''^{(2)} = m^{(2)} I_{1c}''^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 1,6 = 2,77 \text{ кА,}$$

$$I_{\Gamma}^{(2)} = m^{(2)} I_{\Gamma}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 2,2 = 3,8 \text{ кА.}$$

Ток к.з. прямой последовательности для момента времени $t = 0,1$ с в луче системы определяется по графикам рис. 5.1.

Отношение токов в луче системы

$$I_{\text{пос.ном}}^{(2)} = \frac{I_{\text{лс}}^{(2)}}{I_{\text{лс.ном}}} = \frac{1,6}{19,1} = 0,084,$$

где

$$I_{\text{лс.ном}} = \frac{S_{\text{с}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{4000}{1,73 \cdot 121} = 19,1 \text{ кА.}$$

Так как отношение токов меньше единицы, то принимается

$$I_{\text{лс0,1}}^{(2)} = I_{\text{лс}}^{(2)} = 1,6 \text{ кА}$$

и, следовательно, ток в фазе от системы на момент 0,1 с

$$I_{\text{с0,1}}^{(2)} = I_{\text{с}}^{(2)} = m^{(2)} I_{\text{лс0,1}}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 1,6 = 2,77 \text{ кА.}$$

Отношение токов в луче генераторов

$$I_{\text{п0Г.ном}}^{(2)} = \frac{I_{\Gamma}^{(2)}}{I_{\Gamma.ном}} = \frac{2,2}{1,5} = 1,47,$$

где

$$I_{\Gamma.ном} = \frac{\Sigma S_{\Gamma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{4 \cdot 79}{1,73 \cdot 121} = 1,5 \text{ кА.}$$

По графикам рис. 5.1 для $t = 0,1$ определяется $\gamma_{0,1} = 0,97$.

Ток прямой последовательности в луче генераторов

$$I_{\Gamma 0,1}^{(2)} = \gamma_{0,1} I_{\Gamma}^{(2)} = 0,97 \cdot 2,2 = 2,13 \text{ кА}$$

и ток в фазе по формуле (10.6)

$$I_{\Gamma 0,1}^{(2)} = m^{(2)} I_{\Gamma 0,1}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 2,13 = 3,7 \text{ кА.}$$

Суммарный ток двухфазного короткого замыкания в точке К1

$$I^{(2)} = I_{\text{с}}^{(2)} + I_{\Gamma}^{(2)} = 2,77 + 3,8 = 6,57 \text{ кА;}$$

$$I_{0,1}^{(2)} = I_{\text{с0,1}}^{(2)} + I_{\Gamma 0,1}^{(2)} = 2,77 + 3,7 = 6,47 \text{ кА.}$$

Двухфазное короткое замыкание на землю

Схемы замещения прямой и обратной последовательностей будут соответствовать схемам при однофазном коротком замыкании и их результирующие сопротивления вычислены в предыдущем расчете

$$x_{\text{рез}(1)} = 0,61, \quad x_{\text{рез}(2)} = 0,65.$$

Схема замещения нулевой последовательности будет такой же, как и при расчете токов однофазного к.з., и поэтому ее результирующее сопротивление $x_{\text{рез}(0)} = 0,4$.

Комплексная схема замещения соответствует рис. 11.17, б, но величина Δx вычисляется так

$$\Delta x = x_{\text{рез}(2)} \parallel x_{\text{рез}(0)} = \frac{0,65 \cdot 0,4}{0,65 + 0,4} = 0,25.$$

Эквивалентное сопротивление схемы прямой последовательности и коэффициенты токораспределения принимаются из предыдущего расчета

$$x_3 = 0,61, \quad c_c = 0,42, \quad c_\Gamma = 0,58.$$

Результирующее сопротивление

$$x_{\text{рез}} = x_3 + \Delta x = 0,86,$$

сопротивления лучей:

для системы

$$x_{34} = \frac{x_{\text{рез}}}{c_c} = \frac{0,86}{0,42} = 2;$$

для генераторов

$$x_{35} = \frac{0,86}{0,58} = 1,5.$$

Ток прямой последовательности в луче системы:

для начального момента к.з.

$$I_{1c}''^{(1,1)} = \frac{E_{1c}''}{x_{34}} I_{61}'' = \frac{1}{2} 4,78 = 2,39 \text{ кА};$$

для луча генераторов

$$I_{1\Gamma}''^{(1,1)} = \frac{E_{1\Gamma}''}{x_{35}} I_{61}'' = \frac{1,13}{1,5} 4,78 = 3,6 \text{ кА}.$$

Полный ток в фазе, кА

$$I_c''^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{1c}''^{(1,1)} = 1,5 \cdot 2,39 = 3,6;$$

$$I_\Gamma''^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{1\Gamma}''^{(1,1)} = 1,5 \cdot 3,6 = 5,4,$$

где

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\text{рез}(2)} x_{\text{рез}(0)}}{(x_{\text{рез}(2)} + x_{\text{рез}(0)})^2}} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{0,65 \cdot 0,4}{(0,65 + 0,4)^2}} = 1,5.$$

Ток к.з. прямой последовательности для момента времени $t = 0,1$ с в луче системы

$$I_{\text{п0с.ном}}^{(1,1)} = \frac{I_{\text{лс}}''^{(1,1)}}{I_{\text{лс.ном}}} = \frac{2,39}{19,1} = 0,125.$$

Так как отношение меньше единицы, то принимается

$$I_{\text{лс0,1}}^{(1,1)} = I_{\text{лс}}''^{(1,1)} = 2,39 \text{ кА}$$

и, следовательно, полный ток в фазе

$$I_{\text{с0,1}}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{\text{лс0,1}}^{(1,1)} = 1,5 \cdot 2,39 = 3,6 \text{ кА}.$$

Отношение токов в луче генераторов

$$I_{\text{п0Г.ном}}^{(1,1)} = \frac{I_{\text{1Г}}''^{(1,1)}}{I_{\text{1Г.ном}}} = \frac{3,6}{1,5} = 2,4,$$

по графикам рис. 5.1. для $t = 0,1$ определяется

$$\gamma_{0,1} = 0,91.$$

Ток прямой последовательности в луче генераторов

$$I_{\text{1Г0,1}}^{(1,1)} = \gamma_{0,1} \cdot I_{\text{1Г}}''^{(1,1)} = 0,91 \cdot 3,6 = 3,28 \text{ кА}$$

и полный ток в фазе

$$I_{\text{1Г0,1}}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{\text{1Г0,1}}^{(1,1)} = 1,5 \cdot 3,28 = 4,9 \text{ кА}.$$

Суммарный ток двухфазного к.з. на землю в точке К1

$$I''^{(1,1)} = I_{\text{с}}''^{(1,1)} + I_{\text{Г}}''^{(1,1)} = 3,6 + 5,4 = 9 \text{ кА};$$

$$I_{0,1}^{(1,1)} = I_{\text{с0,1}}^{(1,1)} + I_{\text{Г0,1}}^{(1,1)} = 3,6 + 4,9 = 8,5 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов помещены в табл. 11.2

Таблица 11.2

Наименование	$S_{\text{ном}},$ МВ·А	Ток короткого замыкания, кА					
		Однофазное к.з.		Двухфазное к.з.		Двухфазное к.з. на землю	
		I''	$I_{0,1}$	I''	$I_{0,1}$	I''	$I_{0,1}$
Система	4000	3,63	3,63	2,77	2,77	3,6	3,6
Генераторы 1,2,3,4	4×79	5,7	5,58	3,8	3,7	5,4	4,9
Суммарное значение		9,33	9,21	6,57	6,47	9,0	8,5

§ 11.7. Графоаналитический метод расчета симметричных составляющих напряжения при несимметричном режиме

Для оценки качества напряжения по ГОСТ 13109-97 рассчитываются коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} 100, \%$$

и коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{\text{НОМ}}} 100, \%$$

Для вычисления напряжений U_2 и U_0 в ГОСТе приводятся следующие формулы:

$$U_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB} - \sqrt{4U_{BC}^2 - \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]};$$

$$U_0 = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\left(\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} - 3 \frac{U_B^2 - U_A^2}{U_{AB}} \right)^2 + \left[\sqrt{4U_{BC}^2 - \left(U_{AB} - \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2} - 3 \sqrt{4U_B^2 - \left(U_{AB} - \frac{U_B^2 - U_A^2}{U_{AB}} \right)^2} \right]^2}.$$

Заметим, что в ГОСТе формула для расчета напряжения прямой последовательности имеет подобный вид.

Вычисленные значения U_2, U_0 по приведенным формулам нельзя проверить на достоверность, так как фазовые углы остаются неизвестными.

Предлагается метод расчета этих напряжений с последующей проверкой достоверности.

Векторы напряжений фаз $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ определяются симметричными составляющими напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ по формулам образования (7.9).

По этим формулам вычисляются напряжения нулевой последовательности

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C}{3}; \quad (11.8)$$

обратной последовательности

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C}{3}; \quad (11.9)$$

прямой последовательности

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C}{3}. \quad (11.10)$$

Из этих формул видно, что для расчета симметричных составляющих $\dot{U}_0, \dot{U}_2, \dot{U}_1$ необходимо знать фазовые напряжения $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ несимметричного режима, и, если не известны фазовые углы между этими векторами, то необходимо знать междуфазовые напряжения $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ и тогда можно определить углы между векторами напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$.

Указанные величины напряжений измеряются в соответствии со схемой рис. 11.18: $U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$.

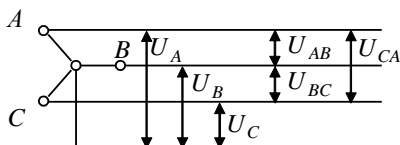


Рис. 11.18. Фазовые и линейные напряжения при несимметричном режиме трехфазной симметричной системы

Для определения фазовых углов строится векторная диаграмма (рис. 11.19) в такой последовательности:

откладывается в принятом масштабе вектор напряжения \dot{U}_A ;

радиусом $|\dot{U}_B|$ из центра диаграммы описывается дуга «BB»;
 из конца вектора \dot{U}_A (точка «1») радиусом $|\dot{U}_{AB}|$ проводится дуга «AB» для получения точки пересечения «2» – имеем вектор \dot{U}_{AB} ;
 вектор \dot{U}_B - отрезок «0-2»;
 радиусом $|\dot{U}_C|$ из центра диаграммы описывается дуга «CC»;
 из конца вектора \dot{U}_A (точка «1») радиусом $|\dot{U}_{CA}|$ проводится дуга для получения точки пересечения «3» – имеем вектор \dot{U}_{CA} ;
 вектор \dot{U}_C - отрезок 0-3.

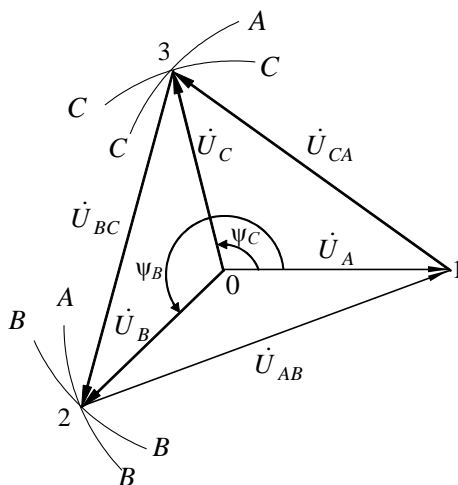


Рис. 11.19. Построение векторной диаграммы векторов несимметричного режима для определения фазовых углов

Фазовые углы ψ_B, ψ_C определяются из построенной векторной диаграммы.

Векторы фазовых напряжений равны

$$\dot{U}_A = U_A e^{j\psi_A}, \quad \dot{U}_B = U_B e^{j\psi_B}, \quad \dot{U}_C = U_C e^{j\psi_C}.$$

Если вектор \dot{U}_A располагается по оси вещественных чисел, то $\psi_A = 0$.

После подстановки полученных величин в формулы (11.8-11.10) имеем:

симметричная составляющая нулевой последовательности

$$\dot{U}_0 = \frac{U_A + U_B e^{j\psi_B} + U_C e^{j\psi_C}}{3}; \quad (11.11)$$

симметричная составляющая обратной последовательности

$$\dot{U}_2 = \frac{U_A + a^2 U_B e^{j\psi_B} + a U_C e^{j\psi_C}}{3}; \quad (11.12)$$

симметричная составляющая прямой последовательности

$$\dot{U}_1 = \frac{U_A + a U_B e^{j\psi_B} + a^2 U_C e^{j\psi_C}}{3}. \quad (11.13)$$

Может представиться случай, когда одна из величин фазного напряжения, например, фазы «С», неизвестна. Эта величина \dot{U}_C может быть определена изложенным выше методом.

Построение выполняется в такой последовательности (рис. 11.20):

откладывается вектор напряжения \dot{U}_A ;

радиусом $|\dot{U}_B|$ из центра диаграммы описывается дуга «BB»;

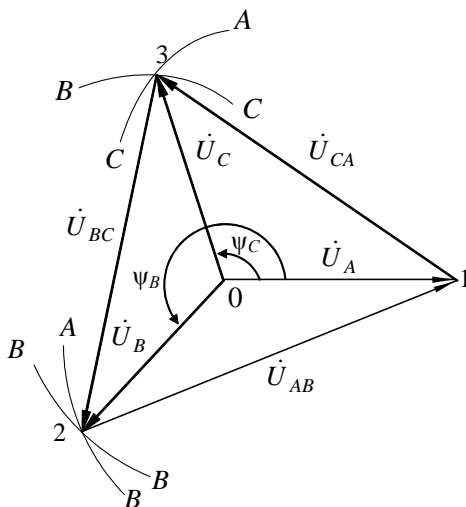


Рис. 11.20. Построение векторной диаграммы для определения вектора фазного напряжения \dot{U}_C при несимметричном режиме

из конца вектора \dot{U}_A (точка «1») радиусом $|\dot{U}_{AB}|$ проводится дуга «AB» для получения точки пересечения «2» – имеем вектор \dot{U}_{AB} ;
 вектор \dot{U}_B - отрезок «0-2»;
 из точки «2» радиусом $|\dot{U}_{BC}|$ проводим дугу «BC»;
 из точки «1» радиусом $|\dot{U}_{CA}|$ проводим дугу «CA» для получения точки пересечения «3»;
 отрезок «1-3» - вектор \dot{U}_{CA} ;
 отрезок «0-3» - искомый вектор напряжения \dot{U}_C ;
 из векторной диаграммы определяются углы ψ_C , ψ_B .

Пример. Расчет симметричных составляющих

По результатам замеров известны линейные напряжения:

$$U_{AB} = 405 \text{ В}, \quad U_{BC} = 395 \text{ В}, \quad U_{CA} = 375 \text{ В};$$

фазные напряжения: $U_A = 230 \text{ В}$, $U_B = 210 \text{ В}$.

Требуется:

1. Определить вектор фазного напряжения \dot{U}_C .
2. Рассчитать симметричные составляющие нулевой \dot{U}_0 , обратной \dot{U}_2 и прямой последовательности \dot{U}_1 .

1. Вектор фазного напряжения \dot{U}_C определяется построением векторной диаграммы

Векторная диаграмма построена на рис. 11.20 по исходным данным примера; принят масштаб, в котором единичным значением напряжения является $U_A = 230 \text{ В}$. Из векторной диаграммы искомое напряжение U_C равно 244 В; фазовые углы из диаграммы определены $\psi_A = 0$; $\psi_C = 106^\circ$; $\psi_B = 228^\circ$.

2. Расчет симметричных составляющих

Составляющая нулевой последовательности рассчитывается по формуле (11.11)

$$\dot{U}_0 = \frac{U_A e^{j\psi_A} + U_B e^{j\psi_B} + U_C e^{j\psi_C}}{3} = \frac{230 e^{j0} + 210 e^{j228} + 244 e^{j106}}{3},$$

здесь $e^{j0} = 1$;

$$e^{j228} = \cos 228^\circ + j \sin 228^\circ = -0,67 - j0,74;$$

$$e^{j106} = -0,275 + j0,96.$$

После подстановки этих значений и вычислений имеем

$$\dot{U}_0 = 7,4 + j26,2 = 27,2e^{j74,2} \text{ В.}$$

Составляющая обратной последовательности рассчитывается по формуле (11.12)

$$\dot{U}_2 = \frac{U_A e^{j\psi_A} + a^2 U_B e^{j\psi_B} + a U_C e^{j\psi_C}}{3} = \frac{230e^{j0} + a^2 210e^{j228} + a244e^{j106}}{3},$$

здесь

$$e^{j0} = 1, \quad a^2 e^{j228} = e^{j240} e^{j228} = e^{j468}, \quad a e^{j108} = e^{j120} e^{j106} = e^{j226},$$

и далее

$$e^{j468} = \cos 108 + j \sin 108 = -0,31 + j0,95;$$

$$e^{j226} = \cos 226 + j \sin 226 = -0,7 - j0,72.$$

После подстановки этих значений и вычислений имеем

$$\dot{U}_2 = -1,97 + j7,93 = 8,17e^{-j76} \text{ В.}$$

Составляющая прямой последовательности рассчитывается по формуле (11.13)

$$\dot{U}_1 = \frac{U_A e^{j\psi_A} + a U_B e^{j\psi_B} + a^2 U_C e^{j\psi_C}}{3} = \frac{230e^{j0} + a210e^{j228} + a224e^{j106}}{3},$$

здесь

$$e^{j0} = 1, \quad a e^{j228} = e^{j120} e^{j228} = e^{j348}, \quad a^2 e^{j106} = e^{j240} e^{j106} = e^{j346}$$

и далее

$$e^{j348} = \cos 348 + j \sin 348 = 0,98 - j0,2;$$

$$e^{j346} = \cos 346 + j \sin 346 = 0,97 - j0,24.$$

После подстановки этих значений и вычислений имеем

$$\dot{U}_1 = 224,2 - j33,5 = 226,7e^{-j8,5} \text{ В.}$$

Проверка полученных результатов производится по первому уравнению системы (7.9)

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 226,7 \cdot e^{-j8,5} + 8,17 \cdot e^{-j76} + 27,2 \cdot e^{j74,2} = \\ &= 229,6 - j0,63 = 229,6 \cdot e^{-j0,15} \text{ В.} \end{aligned}$$

Имеем расчетную величину $U_A = 229,6 \text{ В}$ против исходной

$U_A = 230 \text{ В}$ и угол $\psi_A = 0,15^\circ$ против $\psi_A = 0$. Расчетные и исходные

величины практически совпадают – расчет симметричных составляющих выполнен правильно.

Коэффициенты по ГОСТ 13109-97 равны

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} 100 = \frac{8,17}{226,7} 100 = 3,6 \%, \quad K_{0U} = \frac{U_0}{U_1} 100 = \frac{27,2}{226,7} 100 = 11,9 \%$$

Глава 12

Уровень токов короткого замыкания и стойкость электрооборудования к токам короткого замыкания

§ 12.1. Уровень токов короткого замыкания

Уровень токов к.з. является показателем надежности, живучести и устойчивости работы электрической схемы; определяет требования к электрооборудованию, технико-экономические показатели и предопределяет параметры устройств ограничения токов к.з., параметры релейной защиты, автоматики, защиты от перенапряжений и заземляющих устройств [25].

При проектировании и при обслуживании электрооборудования важно иметь данные по уровню токов к.з., по величине которых задают параметры электрооборудования. В табл. 12.1 приведены данные по уровням токов к.з. Видно, что ток однофазного к.з. при всех напряжениях 35-750 кВ превышает ток трехфазного к.з. – это требует решения проблемы ограничения токов к.з. на землю и предъявления повышенных требований к коммутационной способности выключателей.

Таблица 12.1

Максимальные уровни токов к.з. в сетях 35-750 кВ энергосистем

Год	Ток макс. к.з., кА	Напряжение, кВ						
		35	110	150	220	330	500	750
1972	$I^{(3)}$	36,5	36	23,1	37,2	31	19,45	7,25
	$I^{(1)}$	-	36,4	27,5	44,6	32,4	22,9	7,4
1978	$I^{(3)}$	39,4	50	27	42	49	22,9	11
	$I^{(1)}$	-	52	28,7	52,2	54	25,5	11
1983	$I^{(3)}$	40,9	49	30,8	42,4	47	27	12
	$I^{(1)}$	-	54	31,5	54	53	30,9	12
1990	$I^{(3)}$	39,6	46	30,8	55,6	47	50,6	27,2
	$I^{(1)}$	-	50	33	62,4	53	57,8	30,6

§ 12.2. Проверка электрооборудования на стойкость к токам короткого замыкания

По режиму к.з. должны проверяться [20]:

1. В электроустановках выше 1 кВ:

электрические аппараты, токопроводы, кабели и другие проводники, а также опорные и несущие конструкции для них;

воздушные линии электропередачи при ударном токе к.з. 50 кА и более для предупреждения схлестывания проводов при динамическом действии токов к.з.; для линий с расщепленными проводами должны быть проверены расстояния между распорками расщепленных проводов для предупреждения повреждения распорок и проводов при схлестывании; провода ВЛ, оборудованные устройствами быстродействующего автоматического повторного включения, следует проверять и на термическую стойкость.

2. В электроустановках до 1 кВ – только распределительные щиты, токопроводы и силовые шкафы; трансформаторы тока по режиму к.з. не проверяются.

Аппараты, которые предназначены для отключения токов к.з. или могут по условиям своей работы включать короткозамкнутую цепь, должны, кроме того, обладать способностью производить эти операции при всех возможных токах к.з.

Стойкими при токах к.з. являются те аппараты и проводники, которые при расчетных условиях выдерживают воздействия этих токов, не подвергаясь электрическим, механическим и иным разрушениям или деформациям, препятствующим их дальнейшей нормальной эксплуатации.

Электрооборудование по электродинамической стойкости к току к.з. проверяется неравенством

$$i_{\text{дин}} \geq i_y, \quad (12.1)$$

где $i_{\text{дин}}$ - нормированное значение тока электродинамической стойкости электрооборудования; i_y - ударный ток к.з.

Ударный ток вычисляется по формуле

$$i_y = \sqrt{2}k_y I'', \quad (12.2)$$

где I'' - действующее значение начального сверхпереходного тока к.з.; k_y - ударный коэффициент.

Ударный коэффициент рассчитывается по зависимости

$$k_y = \left(1 - e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right), \quad (12.3)$$

где $T_a = \frac{x_k}{\omega r_k}$ - электромагнитная постоянная времени цепи к.з., с.

Электрооборудование по термической стойкости к току к.з. проверяется неравенством [26]

$$I_T^2 t_T \geq B_k, \quad (12.4)$$

где I_T - нормированное значение тока термической стойкости электрооборудования; t_T - допустимое время прохождения тока термической стойкости; B_k - тепловой импульс, определяемый интегралом Джоуля.

Интеграл Джоуля, выражаемый через ток к.з., равен

$$B_k = \int_0^{t_{откл}} i_k^2 dt. \quad (12.5)$$

Так как ток i_k состоит из периодической и аperiodической составляющих

$$i_k = i_n + i_a,$$

то тепловой импульс состоит также из двух составляющих

$$B_k = B_{к.п} + B_{к.а}. \quad (12.6)$$

Интеграл Джоуля от периодической составляющей тока к.з. равен

$$B_{к.п} = I''^2 t_{откл}, \quad (12.7)$$

где I'' - действующее значение начального сверхпереходного тока к.з.; $t_{откл}$ - время отключения к.з.

Интеграл Джоуля от аperiodической составляющей тока к.з.

$$B_{к.а} = \int_0^{t_{откл}} \left(\sqrt{2} I'' e^{-\frac{t}{T_a}} \right)^2 dt = 2 I''^2 \int_0^{t_{откл}} e^{-\frac{2t}{T_a}} dt = I''^2 T_a \left(1 - e^{-\frac{2t_{откл}}{T_a}} \right). \quad (12.8)$$

Если $t_{откл} \gg T_a$, то

$$B_{к.а} \cong I''^2 T_a. \quad (12.8, а)$$

Тепловой импульс от полного тока к.з.

$$B_k = B_{к.п} + B_{к.а} = I''^2 (t_{откл.} + T_a). \quad (12.9)$$

РАЗДЕЛ IV ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Глава 13 Параметры, определяющие электромагнитный переходный процесс в синхронной машине

§ 13.1. Основные виды переходного процесса в синхронной машине

Переходные процессы в синхронной машине возникают при нормальной эксплуатации и в аварийных режимах.

При исследовании режимов синхронного генератора представляет интерес переходный процесс, обусловленный включением возбуждения, при котором ток в обмотке ротора и напряжение на зажимах статорной обмотки изменяются от нуля до конечных значений.

В момент включения синхронного генератора в сеть на параллельную работу методом самосинхронизации в цепи статорной обмотки возникает ток большой величины, а напряжение на зажимах этой обмотки резко уменьшается. Возникающие в этом случае переходные процессы оказывают влияние на работу других генераторов и потребителей.

Очень опасным режимом для синхронной машины и для всех элементов электроустановок является режим внезапного короткого замыкания, при котором ток в статорной обмотке резко увеличивается, обуславливая появление громадных механических сил в конструкции машины. Радикальным средством предотвращения разрушения машины является гашение ее поля. Происходящие переходные процессы оказывают влияние на режим работы всей электрической системы в целом. Эти переходные процессы в синхронной машине рассматриваются ниже.

1. После разгона генераторного агрегата включается возбуждение, обеспечивающее при синхронной скорости вращения генератора номинальное статорное напряжение.

При изучении этого процесса представляют интерес характер и длительность нарастания тока в обмотке ротора и напряжения на зажимах статора генератора.

2. До включения генератора в сеть на его зажимах может возникнуть трехфазное короткое замыкание. В этом случае переходный процесс изучается с целью определения величины и длительности изменения тока, что имеет решающее значение для оценки электродинамической и термической стойкости элементов статорной и роторной обмоток генератора.

3. При коротком замыкании на зажимах генератора важно изучить процесс гашения его магнитного поля, рассматриваемого в качестве средства быстрой ликвидации режима короткого замыкания в обмотке статора генератора.

4. Процесс включения генератора в сеть на параллельную работу методом точной синхронизации представляет интерес с точки зрения больших токов, возникновение которых возможно в статорной и роторной обмотках вследствие несовпадения фазы напряжения генератора и сети.

5. При включении генератора в сеть на параллельную работу методом самосинхронизации возникают переходные процессы, изучение которых важно для определения бросков тока в статорной и роторной обмотках.

6. В случае удаленного короткого замыкания для надежного срабатывания релейной защиты и для предотвращения значительного снижения напряжения генератор оснащается устройством форсировки возбуждения. Определение влияния этого устройства на процесс короткого замыкания является важной задачей.

Переходные процессы в синхронном двигателе (или в синхронном компенсаторе) отличаются от переходных процессов в синхронном генераторе только в случае асинхронного пуска этих машин. Процессы должны быть изучены с точки зрения бросков тока в статорной и роторной обмотках машин в момент их включения в сеть и при подаче возбуждения.

Переходные процессы, перечисленные выше, рассматриваются на основе уравнений Парка-Горева; начальные условия процессов определяются из векторных диаграмм синхронной машины.

§ 13.2. Параметры и векторные диаграммы синхронной машины

Синхронная машина имеет три обмотки: статорную, заложенную в пазы железа статора и состоящую из обмоток трех фаз, роторную (обмотку возбуждения) и демпферную. Оси трех фаз обмотки статора OA , OB и OC сдвинуты по окружности статора относительно друг друга на 120 эл. град. (рис. 13.1).

Роторная обмотка, вращаясь вместе с ротором в расточке железа статора с круговой частотой вращения ω , наводит в каждой фазе статорной обмотки ЭДС \bar{E} . При симметричном токе нагрузки \bar{I} напряжение на концах каждой фазы статорной обмотки

$$\bar{U} = \bar{E} - (r_a + j\omega L_a)\bar{I}, \quad (13.1)$$

где r_a , ωL_a - активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки статора.

Векторная диаграмма для одной фазы статора генератора, соответствующая уравнению, при известных значениях U (кВ, В), I (кА, А), $\cos \varphi$, r_a (Ом), $x = \omega L_a$ (Ом) строится следующим образом: откладывается вектор напряжения \bar{U} в масштабе m_U , кВ/мм (рис. 13.2) под углом φ° к нему вектор тока \bar{I} в масштабе m_I , кА/мм. Затем от конца вектора напряжения \bar{U} по линии, параллельной вектору тока, откладывается вектор падения напряжения $r_a \bar{I}$ в масштабе m_U , а от конца последнего по линии, перпендикулярной вектору тока, также в масштабе m_U - вектор падения напряжения $\omega L_a \bar{I} = x \bar{I}$ (в соответствии с оператором поворота j). Замыкающий вектор, проведенный из начала диаграммы в конец вектора $j\omega L_a \bar{I}$, определит собой величину ЭДС машины в данном режиме, т. е.

$$E = m_U l, \text{ кВ,}$$

где m_U - масштаб напряжений; l - длина вектора, мм.

Величина индуктивности L_a - фазы обмотки статора, входящая в равенство (13.1), зависит от изменения сопротивления магнитной цепи машины.

В неявнополюсных машинах, к которым относятся турбогенераторы, это изменение незначительно, так как воздушный промежуток между железом статора и ротора при вращении последнего сохраняется практически постоянным (влиянием пазовых углублений ротора можно пренебречь).

Векторная диаграмма неявнополюсной синхронной машины предложена Бен-Эшенбургом*.

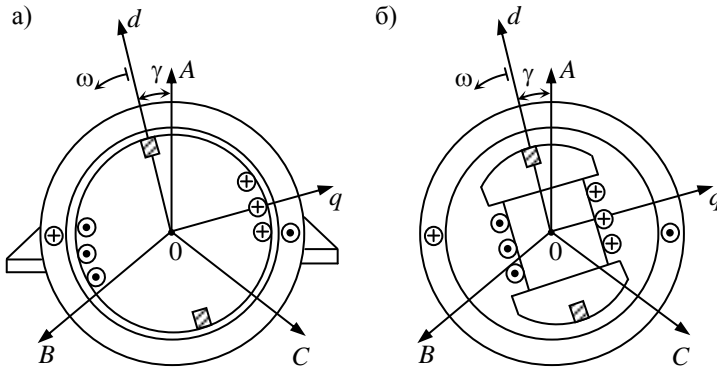


Рис.13.1. Взаимное положение неподвижных осей фаз A, B, C обмотки статора и вращающихся осей $d-q$ ротора синхронной машины в режиме генератора:

а - неявнополюсный ротор (турбогенератор); б - явнополюсный ротор (гидрогенератор, компенсатор, двигатель)

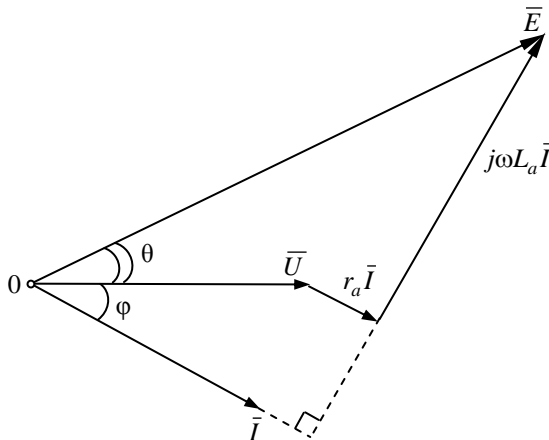


Рис. 13.2. Векторная диаграмма фазы обмотки неявнополюсного синхронного генератора

* Diagrammi vettoriali di Ben-Eschenburg. M. Kostenko, Piotrovsky. Electrical Machines (vol I e II), MIR Publishers, Moscow, 1968.

В явнополюсных машинах, к которым относятся гидрогенераторы, компенсаторы и синхронные двигатели, величина L_a периодически изменяется, так как при вращении ротора периодически изменяется положение железа полюсов относительно фаз обмотки статора, т. е. при совпадении продольной оси ротора dd с осью фазной обмотки статора OA индуктивность L_a имеет максимальное значение L_d (см. рис. 13.1, б), но по мере поворота ротора она уменьшается и в поперечном положении ротора относительно оси фазной обмотки статора OA индуктивность последней имеет минимальное значение L_q .

При переменном значении индуктивности $L_a = L_d \dots L_q$ рассмотрение установившихся режимов машины и особенно переходных процессов оказывается очень трудным. По этой причине Blondel и Дрейфус предложили применять для исследования режимов синхронной машины теорию двух полей или теорию двух реакций*. Это предложение было основано на том, что векторы векторной диаграммы (ЭДС, падений напряжений и тока любой фазы) можно представить в виде двух составляющих, действующих по осям d, q ротора. Действительно, магнитный поток, создаваемый обмоткой ротора Φ , действует вдоль продольной оси d ротора. Следовательно, при вращении ротора со скоростью ω поток, пронизывающий обмотку фазы статора, изменяется по закону $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$. ЭДС, индуктируемая в фазе статора, равна

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_m \omega \sin \omega t = E_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

т. е. ее вектор отстает от вектора потока на $\pi/2$.

Таким образом, если поток ротора направлен вдоль оси d , то вектор ЭДС направлен по поперечной оси q .

Следовательно, на векторной диаграмме (см. рис. 13.2) вектор ЭДС будет совпадать с направлением оси q , а ось d будет перпендикулярна этому направлению. По этим осям могут быть разложены все векторы диаграммы, как показано на рис. 13.3, а. Так, например, вектор напряжения U раскладывается на векторы U_d и U_q , направленные соответственно по продольной и поперечной осям ротора,

$$U_d = U \sin \theta; \quad U_q = U \cos \theta, \quad (13.2)$$

* Blondel A. Compliments a la theorie des alternateurs a deux reactions. Revue gene'rale de e'lectricite v. 12, 1922.

аналогично

$$I_d = I \sin(\theta + \varphi); \quad I_q = I \cos(\theta + \varphi). \quad (13.3)$$

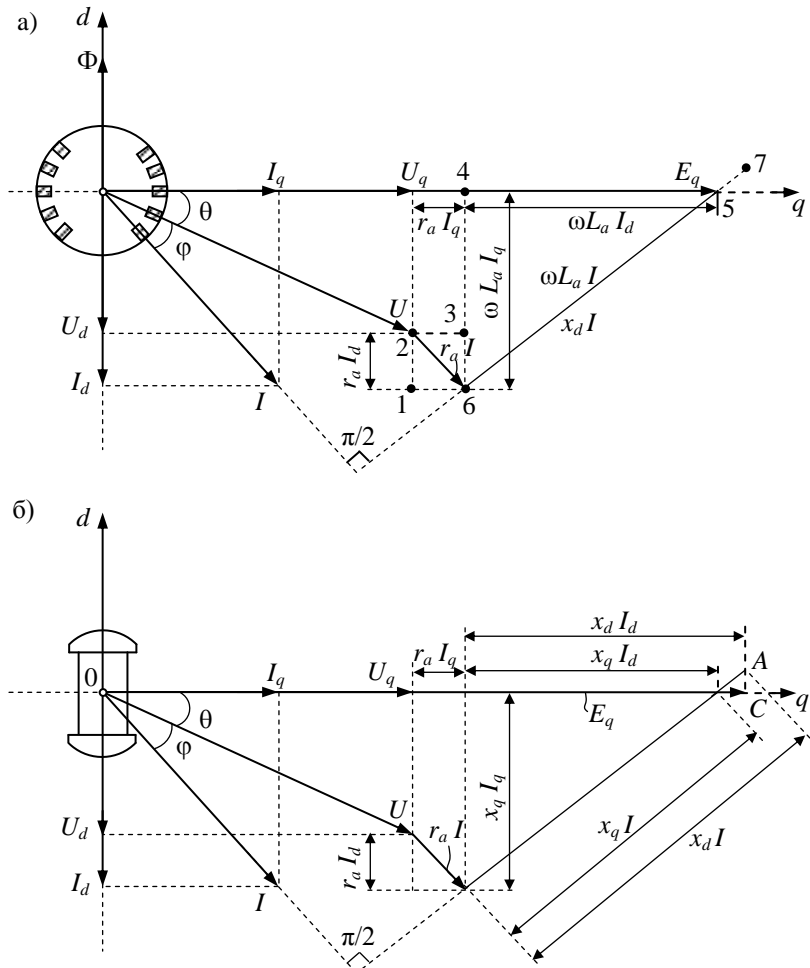


Рис. 13.3. Векторные диаграммы синхронного неявнополюсного генератора (а) и явнополюсного генератора - диаграмма Blondеля (б) в осях d - q

Падение напряжения на активном сопротивлении r_a соответственно раскладывается на составляющие:

$$\text{отрезок 1-2} = r_a I \sin(\theta + \varphi) = r_a I_d ;$$

$$\text{отрезок 2-3} = r_a I \cos(\theta + \varphi) = r_a I_q .$$

Падение напряжения на реактивном сопротивлении ωL_a раскладывается на следующие составляющие:

$$\text{отрезок 4-5} = \omega L_a I \sin(\theta + \varphi) = \omega L_a I_d = x I_d ;$$

$$\text{отрезок 4-6} = \omega L_a I \cos(\theta + \varphi) = \omega L_a I_q = x I_q ,$$

где x - синхронное индуктивное сопротивление машины.

Вместе с тем для упрощения исследований и расчетов все параметры синхронной машины, ее векторные диаграммы и уравнения представляются в системе относительных единиц. За базисные значения в этой системе принимаются величины, приведенные ниже.

Для статорной обмотки

1. Для всех напряжений $U_{\text{ф.ном}}$ - номинальное фазное напряжение, кВ, (В).

2. Для всех токов $I_{\text{ф.ном}}$ - номинальный фазный ток кА, (А).

3. Для всех сопротивлений $\frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}}$ - полное сопротивление фазы,

Ом.

4. Для всех потокоцеплений

$$\Psi_{\text{ф.ном}} = L_a I_{\text{ф.ном}} = \frac{x_{\text{ф}} I_{\text{ф.ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{ф.ном}}}{\omega_{\text{ном}}}$$

номинальные потокоцепления фазы, кВ·с, (В·с).

5. Для всех мощностей $S_{\text{ном}} = U_{\text{ф.ном}} I_{\text{ф.ном}}$ - полная номинальная фазная мощность МВ·А, (кВ·А).

6. Для частоты вращения $\omega_{\text{ном}}$ - номинальная синхронная частота вращения $\omega_{\text{ном}} = 2\pi f_{\text{ном}}$, 1/с.

7. Для всех вращающих моментов, приведенных к валу ротора генератора, $M_{\text{ном}}$ - номинальный вращающий момент при номинальной частоте вращения

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{975 n_{\text{ном}}}, \text{ кг} \cdot \text{м} ;$$

$$n_{\text{ном}} = \frac{30}{\pi p} \omega_{\text{ном}}, \text{ об/мин.}$$

Для роторной обмотки

1. Для токов $i_{в.х.х}$ - ток возбуждения на холостом ходу машины (А), обеспечивающий при номинальной частоте вращения $\omega_{ном}$ номинальное напряжение обмотки статора $U_{ф.ном}$.

2. Для напряжений $U_{в.х.х}$ - напряжение возбуждения (В) на холостом ходу машины при $\omega_{ном}$ и $U_{ф.ном}$ (очевидно, имеет место равенство $U_{в.х.х} = r_{в} i_{в.х.х}$).

3. Для потокосцеплений $\psi_{в.х.х} = L_{в} i_{в.х.х}$ - потокосцепления на холостом ходу машины при $\omega_{ном}$ и $U_{ф.ном}$.

Чтобы выразить параметры синхронной машины в системе относительных единиц, следует эти параметры разделить на соответствующие базисные значения.

Ниже все параметры машин и их векторные диаграммы будут приводиться в относительных единицах; именованные единицы будут оговариваться особо.

Из векторной диаграммы (см. рис. 13.3, б) можно получить следующие зависимости для поперечной и продольной осей:

$$\left. \begin{aligned} U_q + r_a I_q + x_d I_d &= E_q; \\ -U_d - r_a I_d + x_q I_q &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Эти равенства означают, что теперь напряжения и токи машины рассматриваются не в ее фазных обмотках, а в двух контурах, магнитные оси которых взаимно перпендикулярны и электромагнитные потоки которых направлены одного контура - по оси d , а другого - по оси q .

Для явнополюсной машины величина реактивного сопротивления $x = \omega L_a$ изменяется, как указывалось выше, в зависимости от изменения индуктивности от L_d до L_q . Если в векторной диаграмме неявнополюсного генератора (см. рис. 13.3, а) считать, что падение напряжения на индуктивном сопротивлении машины $\omega L_a I = xI$ соответствует падению напряжения в поперечной оси явнополюсной машины $\omega L_q I = x_q I$, то падение напряжения в продольной оси последней будет больше, так как $L_d > L_q$, и будет соответствовать отрезку 6-7 (см. рис. 13.3, а), равному $\omega L_d I = x_d I$. Следовательно, падение напряжения на реактивном сопротивлении явнополюсной машины по продольной и по поперечной осям будет различным. В один и тот же момент времени в машине, которая рассматривается по двум осям d и q , существуют падения напряжения $\omega L_d I$ и $\omega L_q I$. Раскладывая их по осям d, q , имеем

по оси d

$$\left. \begin{aligned} \omega L_d I \sin(\theta + \varphi) &= x_d I_d; \\ \omega L_q I \sin(\theta + \varphi) &= x_q I_d, \end{aligned} \right\} \quad (13.4)$$

по оси q

$$\left. \begin{aligned} \omega L_d I \cos(\theta + \varphi) &= x_d I_q; \\ \omega L_q I \cos(\theta + \varphi) &= x_q I_q, \end{aligned} \right\} \quad (13.5)$$

где x_d, x_q - синхронные реактивные сопротивления машины в продольной и в поперечной осях*, соответственно.

Векторная диаграмма явнополюсной машины с разложением векторов по осям d, q представлена на рис.13,б. На диаграмме вектор E_q - величина ЭДС, индуцируемая в обмотке статора магнитным потоком ротора, который создан током возбуждения i_b при напряжении U_b .

Из векторной диаграммы явнополюсной машины следует

$$\begin{aligned} E_q &= U \cos \theta + x_d I_d + r_a I_q; \\ \operatorname{tg} \theta &= \frac{x_q \cos \varphi - r_a \sin \varphi}{z_H + r_a \cos \varphi + x_q \sin \varphi}. \end{aligned} \quad (13.6)$$

Здесь $I_d = I \sin(\theta + \varphi)$, $I_q = I \cos(\theta + \varphi)$. Подставляя эти соотношения

в первое равенство (13.6) и учитывая, что $I = \frac{U}{z_H}$, $\cos \varphi = \frac{r_H}{z_H}$,

$\sin \varphi = \frac{x_H}{z_H}$, а также

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}} \quad \text{и} \quad \sin \theta = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}},$$

получаем

$$E_q = \frac{U}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}} \left\{ 1 + \frac{1}{z_H^2} [x_d (r_H \operatorname{tg} \theta + x_H) + r_a (r_H - x_H \operatorname{tg} \theta)] \right\}.$$

Это выражение после подстановки в него второго равенства (13.6) и преобразований позволяет найти зависимость напряжения явнополюсного генератора от величины и вида нагрузки при данной величине возбуждения. Получаем

*Расчет индуктивных сопротивлений синхронной машины опубликован Р.А. Лютером. «Теория переходных режимов синхронных машин с применением операторного анализа». Л., 1939.

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} E_q = \xi E_q. \quad (13.7)$$

Аналогично выводится формула для неявнополюсного генератора

$$U = \frac{z_H}{\sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}} E_q = \zeta E_q. \quad (13.8)$$

В этих формулах $x_{dH} = x_d + x_H$; $x_{qH} = x_q + x_H$; $r_{aH} = r_a + r_H$.

Коэффициенты

$$\xi = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2}, \quad \zeta = \frac{z_H}{\sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}} \quad (13.9)$$

могут быть названы коэффициентами синхронных ЭДС соответственно явнополюсного и неявнополюсного генераторов [27].

Подобным образом получается зависимость напряжения машины от переходной ЭДС E'_q :

для явнополюсной машины

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} E'_q = \xi' E'_q; \quad (13.10)$$

для неявнополюсной машины

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2} E'_q = \zeta' E'_q, \quad (13.11)$$

где $x'_{dH} = x'_d + x_H$.

Коэффициенты ξ' , ζ' - коэффициенты переходных ЭДС соответственно явнополюсной и неявнополюсной машины.

Аналогичную структуру имеют выражения для определения напряжения в зависимости от сверхпереходной ЭДС E''_q :

для явнополюсной машины

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x''_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2} E''_q = \xi'' E''_q; \quad (13.12)$$

для неявнополюсной машины

$$U = \frac{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}{x''_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2} E''_q = \zeta'' E''_q, \quad (13.13)$$

где $x''_{дн} = x''_d + x_n$.

Коэффициенты ξ'' , ζ'' - коэффициенты сверхпереходных ЭДС соответственно явнополюсной и неявнополюсной машины.

Зависимости (13.7-13.13) могут быть использованы для определения ЭДС машины E_q , E'_q , E''_q по параметрам установившегося режима машины.

Незначительной величиной активного сопротивления обмотки статора в расчетах характеристик можно пренебречь, и тогда при условии сохранения на зажимах генератора номинального напряжения ($U = 1$) изменение тока возбуждения i_b (или напряжения возбуждения) при изменении нагрузки определится для явнополюсного и неявнополюсного генераторов соответственно формулами

$$E_q = \frac{x_{дн}x_{qn} + r_n^2}{z_n \sqrt{x_{qn}^2 + r_n^2}} = i_b, \quad E_q = \frac{\sqrt{x_{дн}^2 + r_n^2}}{z_n} = i_b. \quad (13.14)$$

Задаваясь относительными значениями тока нагрузки 0,8; 0,7; ... и вычисляя z_n , можно по этим формулам построить регулировочные характеристики для различных значений коэффициента мощности нагрузки.

Для получения точных значений тока возбуждения (или напряжения возбуждения) следует учесть насыщение стали машины, т. е. учесть ту часть тока возбуждения генератора, которая необходима для «преодоления» насыщения стали ($i_{в.нас}$), чтобы напряжение на зажимах генератора было номинальным.

На рис. 13.4 величина $i_{в0}$ представляет собой значение тока возбуждения на холостом ходу машины, определенное по спрямленной характеристике холостого хода, т. е. эта величина непосредственно вычисляется по формулам (13.14). Действительное значение тока возбуждения больше на величину $i_{в.нас}$ и равно $i_{в0д}$. Для нагруженной машины эта поправка, учитывающая насыщение генератора при номинальном напряжении, сохраняется. Действительно, если, следуя Р. Рюденбергу [9], провести через точку номинального напряжения характеристики холостого хода луч нагрузки ЛН₁, то на оси абсцисс этот луч отметит ту величину тока возбуждения, которая необходима для поддержания номинального напряжения генератора при этой нагрузке. Естественно, для этой же величины нагрузки, характеризуемой углом наклона α , луч нагрузки ЛН₂, проведенный через точку номинального напряжения на спрямленной характеристике холостого хода, будет проходить параллельно предыдущему лучу и, следовательно, на оси

абсцисс отметит ток возбуждения $i_{в.н}$ меньше действительного $i_{в.н.д}$ на величину $i_{в.нас}$.

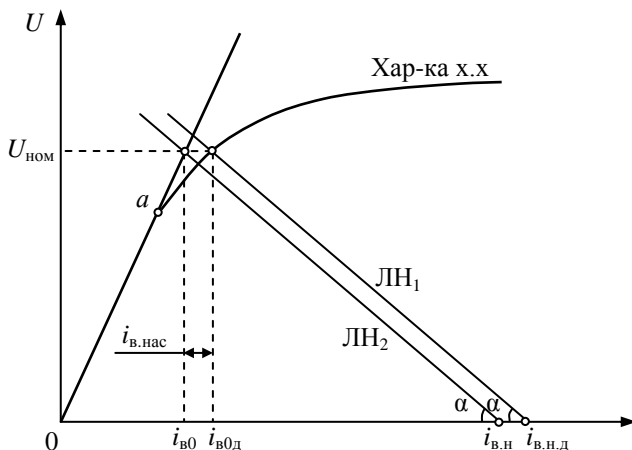


Рис. 13.4. Характеристика намагничивания стали синхронного генератора

Таким образом, к значениям тока возбуждения, вычисленным по формулам (13.14), следует прибавлять поправку на насыщение стали машины, определяемую из характеристики холостого хода, как указано на рис. 13.4. Отметим, что при расчетах, связанных с напряжением выше номинального значения, эта поправка увеличивается, а при напряжениях меньше номинального - поправка уменьшается и в точке a становится равной нулю. Ордината точки a может иметь величину, соответствующую 0,9-0,65 номинального значения напряжения, и поправка на насыщение стали может лежать в пределах 0,02-0,22. Поэтому в ряде случаев насыщением стали машины можно пренебречь.

Заметим, что зависимости (13.7)-(13.14) позволяют оценить влияние на режим генератора не только индуктивной нагрузки, но и емкостной. В этом случае величины реактивностей будут иметь значения $x_{дн} = x_d - x_n$, $x_{qn} = x_q - x_n$. Влияние насыщения стали машины при емкостной нагрузке учитывается также при помощи кривой намагничивания.

Величина тока статора генератора может быть вычислена по выведенным формулам.

Для явнополюсного генератора ток установившегося режима из формулы (13.7) равен

$$I = \frac{U}{z_H} = \frac{\xi E_q}{z_H} = \frac{E_q}{z_{qH}}, \quad (13.15)$$

для неявнополюсного генератора из выражения (13.8) получаем

$$I = \frac{\zeta E_q}{z_H} = \frac{E_q}{z_{dH}}. \quad (13.16)$$

Здесь символами полных сопротивлений обозначено

$$z_{qH} = \frac{x_{dH}x_{qH} + r_{aH}^2}{\sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}; \quad z_{dH} = \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}. \quad (13.17)$$

В общем случае связь между напряжением генератора, его ЭДС и нагрузкой может быть представлена в комплексной форме

$$\bar{U} = \bar{E}_q - \bar{I} \bar{z}_\Gamma,$$

где \bar{z}_Γ - комплексное сопротивление генератора.

При установившемся коротком замыкании $\bar{U} = 0$, и ток в этом режиме равен

$$\bar{I}_k = \frac{\bar{E}_q}{\bar{z}_{\Gamma k}}. \quad (13.18)$$

Отсюда комплекс сопротивления

$$\bar{z}_{\Gamma k} = \frac{\bar{E}_q}{\bar{I}_k} = \frac{E_q e^{j\varphi_E}}{I_k e^{j\varphi_I}} = z_{\Gamma k} e^{j\varphi_z},$$

где $\varphi_z = \varphi_E - \varphi_I$ - аргумент комплекса сопротивления.

Из сопоставления выражений (13.15), (13.16) и (13.18) следует, что величины z_{qH} , z_{dH} можно считать модулями соответствующих комплексов полных сопротивлений.

Комплекс сопротивления для установившегося режима будет иметь вид:

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}_{qH} = z_{qH} e^{j\varphi_{qH}} = \frac{x_{dH}x_{qH} + r_{aH}^2}{\sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}} e^{j\varphi_{qH}}; \quad (13.19)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}_{dH} = z_{dH} e^{j\varphi_{dH}} = \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2} e^{j\varphi_{dH}}. \quad (13.20)$$

Аргументы комплексных сопротивлений могут быть найдены из векторных диаграмм генераторов, где они определяют положение вектора тока относительно вектора ЭДС

Из диаграмм следует

$$\varphi_{qH} = \arctg \frac{x_{qH}}{r_{aH}}, \quad \varphi_{dH} = \arctg \frac{x_{dH}}{r_{aH}}. \quad (13.21)$$

Располагая значениями аргумента и модуля комплексного числа, легко найти его вещественную и мнимую части. Активная и реактивная составляющие комплекса полных сопротивлений определяются выражениями:

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}_{qH} = z_{qH} (\cos \varphi_{qH} + j \sin \varphi_{qH}) = r_{я.н} + jx_{я.н};$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}_{dH} = z_{dH} (\cos \varphi_{dH} + j \sin \varphi_{dH}) = r_{н.н} + jx_{н.н}.$$

При установившемся коротком замыкании на выводах генератора, когда $x_H = 0$, $r_H = 0$, комплекс полного сопротивления определяется из формул (13.19), (13.20):

для явнополюсного генератора

$$\bar{z}_{qK} = \frac{x_d x_q + r_a^2}{\sqrt{x_q^2 + r_a^2}} e^{j\varphi_{qK}}; \quad (13.19, a)$$

для неявнополюсного генератора

$$\bar{z}_{dK} = \sqrt{x_d^2 + r_a^2} e^{j\varphi_{dK}}. \quad (13.20, a)$$

Аргументы этих комплексных сопротивлений определяются по формулам (13.21) при $x_H = 0$, $r_H = 0$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{qK} &= \arctg \frac{x_q}{r_a}; \\ \varphi_{dK} &= \arctg \frac{x_d}{r_a}. \end{aligned} \right\} \quad (13.21, a)$$

Величина активного сопротивления обмотки статора r_a весьма мала по сравнению с ее индуктивным сопротивлением x_d . В табл. 13.1 приведены значения этих сопротивлений. Из таблицы видно, что активное

Таблица 13.1

Параметры		Турбогенераторы		Гидрогенераторы		
		ТВФ-100-2	ТВВ-200-2 (60 пазов)	СВ- 1500/200- 88	СВ- 1130/250- 48	
Номинальные данные	$P_{НОМ}$, МВт	100	200	115	200	
	$\cos\varphi_{НОМ}$	0,85	0,85	0,85	0,85	
	$S_{НОМ}$, МВ·А	117,5	235,3	127,8	235	
	$n_{НОМ}$, об/мин	3000	3000	68,2	125	
	$U_{НОМ}$, кВ	10,5	15,75	13,8	15,75	
	$I_{НОМ}$, кА	6,475	8,625	5,175	8,61	
	$\eta_{НОМ}$, %	98,5	98,6	97,6	98,3	
	$J, T \cdot M^2 \times 0,25$	13	21,1	100	50	
Реактивные сопротивления, о. е.	x_d''	0,214	0,1805	0,15	0,205	
	x_d'	0,314	0,272	0,2	0,345	
	x_d	2,155	2,106	0,52	1,915	
	x_q''			0,143	0,2	
	x_q			0,332	0,65	
	x_2	0,261	0,22	0,147	0,2	
	x_0	0,11	0,0995	0,054	0,11	
	T_{d0}, c	6,45	7,03	5,3	8	
Сопро- тивления при 15 °С, Ом (о. е.)	$R_{СТ}$	0,00104 (0,0011)	0,00152 (0,0014)			
	$R_{РОТ}$	0,1185	0,0878			
Возбудитель	$U_{В.НОМ}$, В	270	300	380		
	$I_{В.Х.Х}$, А	640	1025			
	$I_{В.НОМ}$, А	1605	2540	1820		
	$I_{В.НОМ}/I_{В.Х.Х}$	2,5	2,5	1,57		
	Кратность фикса- ровки k_{Φ}			4,0		
	Система	М	ВЧ	ИВВГ		
	Тип	ВТ-450-3000		Тиристорная система		
	$U_{В.НОМ}$, В	280/480	370/676			
	$I_{В.НОМ}$, А	1680/2880	2220/4040			
	Дли- тель- ный режим	$P_{НОМ}$, кВт	470	1230		
		$\cos\varphi$		0,87		
		η , %	90,4	89,1		
	При форс- ровке	$P_{пр}$, кВт	1380	4150		
$\cos\varphi$			0,87			
f , Гц			500			

сопротивление меньше индуктивного x'_d в 100-200 раз, а по сравнению с x_d - в 1000-2000 раз.

Поэтому векторные диаграммы синхронных машин для многих практических расчетов строятся без учета падения напряжения на активном сопротивлении $r_a I$. Такие векторные диаграммы построены на рис. 13.5, а для номинального режима турбогенератора, а на рис. 13.5, б для гидрогенератора (параметры машин приведены в табл. 13.1).

На векторной диаграмме (рис. 13.5, а): $U = \frac{15,75}{\sqrt{3}} = 9,1 \text{ кВ} = 1 \text{ о.е.}$,

$E_q = 2,78 \text{ о.е.}$, $I = 8,62 \text{ кА} = 1 \text{ о.е.}$, $x_d I = 2,1 \text{ о.е.}$ $\varphi = 32^\circ$, $\theta = 40^\circ$; на векторной диаграмме (рис. 13.5, б): $E_q = 2,48 \text{ о.е.}$, $x_d I = 1,95 \text{ о.е.}$,

$x_q I = 0,65$, $\varphi = 32^\circ$, $\theta = 24^\circ$

Из этих векторных диаграмм могут быть получены простые расчетные зависимости.

Так, из рис. 13.5 (для турбогенератора) следует

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

или после умножения на $\frac{U}{U}$

$$E_q = \sqrt{\frac{(U^2 + x_d Q)^2 + (x_d P)^2}{U^2}}. \quad (13.22)$$

Для номинального режима, когда $U_{\text{ном}} = 1$, получают

$$E_q = \sqrt{(1 + x_d Q)^2 + (x_d P)^2}. \quad (13.23)$$

Выражение для синхронной ЭДС E_q явнополюсной машины (гидрогенератора) можно определить из векторной диаграммы (см. рис. 13.5, б)

$$E_q = \frac{1}{U} \frac{(U^2 + x_q Q)^2 + (x_q P)^2 + (x_d - x_q) x_{qH} S^2}{\sqrt{(U^2 + x_q Q)^2 + (x_q P)^2}}, \quad (13.24)$$

где

$$x_{qH} = x_q + x_H; \quad x_H = S \sin \varphi; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

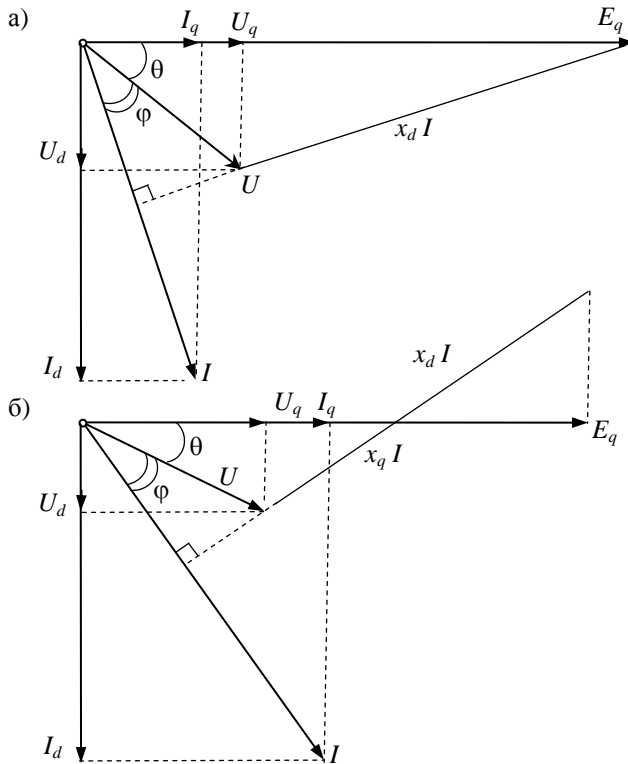


Рис. 13.5. Векторные диаграммы турбогенератора ТВВ-200-2 (а) и гидрогенератора СВ-1130/250-48 (б) мощностью 200 МВт каждый при напряжении 15,75 кВ и $\cos \varphi = 0,85$

Заметим, что при равенстве $x_d = x_q$ эта формула обращается в зависимость (13.22) – для турбогенератора.

По аналогии с выражением E_q (13.23) из векторной диаграммы рис. 13.6 можно получить

$$\begin{aligned}
 E' &= \sqrt{(1 + x'_d Q)^2 + (x'_d P)^2}; \\
 E'' &= \sqrt{(1 + x''_d Q)^2 + (x''_d P)^2}.
 \end{aligned}
 \tag{13.25}$$

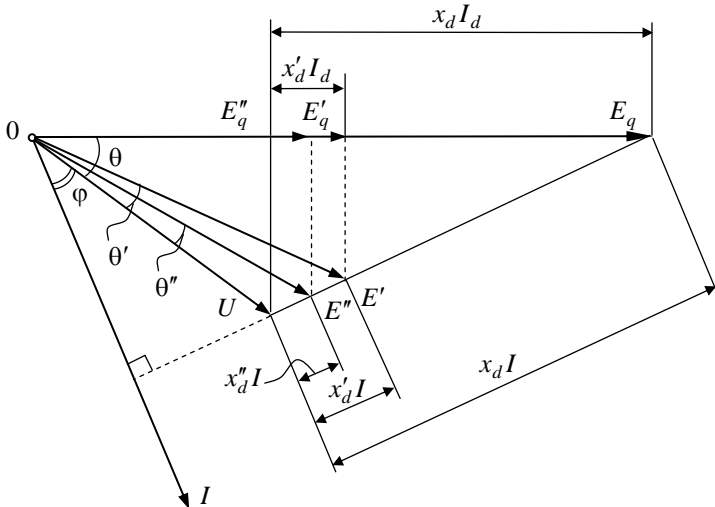


Рис. 13.6. Векторная диаграмма турбогенератора ТВФ-100-2 мощностью 100 МВт с построенными векторами ЭДС за переходным и сверхпереходным сопротивлением генератора

Значения ЭДС E' и E'' пропорциональны результирующим потокоцеплениям машины (а в относительных единицах равны им) соответственно без демпферных контуров и с таковыми. Эти ЭДС в момент нарушения установившегося режима сохраняют свои значения прежними и поэтому могут служить для расчета начальных значений переходного и сверхпереходного токов. На диаграмме (рис. 13.6) в именованных единицах: $U = 15,75 \text{ кВ} = 1 \text{ о.е.}$, $I = 8,62 \text{ кА} = 1 \text{ о.е.}$, $\varphi = 32^\circ$, $\theta = 37^\circ$, $\theta' = 13^\circ$, $\theta'' = 7^\circ$; в относительных единицах: $E_q = 2,07$, $E'_q = 1,06$, $E''_q = 0,925$, $E' = 1,15$, $E'' = 1,07$.

Выражения для переходной ЭДС E'_q и сверхпереходной ЭДС E''_q могут иметь форму, отличающуюся от ранее полученных выражений (13.10-13.11).

Из векторной диаграммы рис. 13.6 получаем

$$E'_q = \frac{(U^2 + x'_d Q)(U^2 + x_d Q) + x'_d x_d P^2}{U \sqrt{(U^2 + x_d Q)^2 + (x_d P)^2}}. \quad (13.26)$$

Для явнополюсной машины из векторной диаграммы получим

$$E'_q = \frac{(U^2 + x'_d Q)(U^2 + x_q Q) + x'_d x_q P^2}{U \sqrt{(U^2 + x_q Q)^2 + (x_q P)^2}}. \quad (13.27)$$

Заметим, что если заменить в этих формулах x'_d и x_q на x_d , то они обращаются в зависимость для синхронной ЭДС E_q (13.22).

Начальное значение переходного тока при коротком замыкании генератора может быть вычислено для $r = 0$ и $x \neq 0$

$$I'_d = \frac{E'_q}{x'_d + x_H}. \quad (13.28)$$

Начальное значение сверхпереходного тока при к.з. машины для $r = 0$ и $x \neq 0$

$$I''_d = \frac{E''_q}{x''_d + x_H}. \quad (13.29)$$

При коротком замыкании на зажимах генератора внешнее сопротивление x_H равно нулю и из формул следует

$$I'_d = \frac{E'_q}{x'_d}, \quad I''_d = \frac{E''_q}{x''_d}. \quad (13.30)$$

При исследовании колебаний роторов синхронных генераторов, включенных на параллельную работу, необходимо знать угловую характеристику каждой машины, причем эту характеристику необходимо знать для случая включения генератора на шины электростанции не только через индуктивное сопротивление, как обычно принимается при исследованиях статической и динамической устойчивости синхронной машины, но и для общего случая включения через активно-индуктивное сопротивление, характеризуемое составляющими r_p и x_p . Искомая характеристика синхронной машины может быть определена из векторной диаграммы.

Векторная диаграмма для явнополюсного генератора, в общем случае включенного на напряжение системы U_c через активно-индуктивное сопротивление, представлена на рис. 13.7. Для этой диаграммы справедливо равенство

$$E_q \sin \theta = (x_d + x_p)I \cos \varphi - (r_a + r_p)I \sin \varphi - AC \cos \theta. \quad (13.31)$$

Величина отрезка AC определяется из соотношения

$$AC = A_1 C_1 \frac{OC}{OC_1} = [U_c \sin \theta + (r_a + r_p) I \sin(\theta + \varphi)] \frac{x_d - x_q}{x_d + x_p},$$

и тогда равенство (13.31) после преобразований примет вид

$$P = U_c I \cos \varphi = \frac{2x_{qp} U_c E_q \sin \theta + (x_d - x_q) U_c^2 \sin 2\theta + 2r_{ap} [x_{dp} - (x_d - x_q) \sin^2 \theta] Q}{2x_{dp} x_{qp} - r_{ap} (x_d - x_q) \sin 2\theta}, \quad (13.32)$$

где $x_{dp} = x_d + x_p$, $x_{qp} = x_q + x_p$, $r_{ap} = r_a + r_p$.

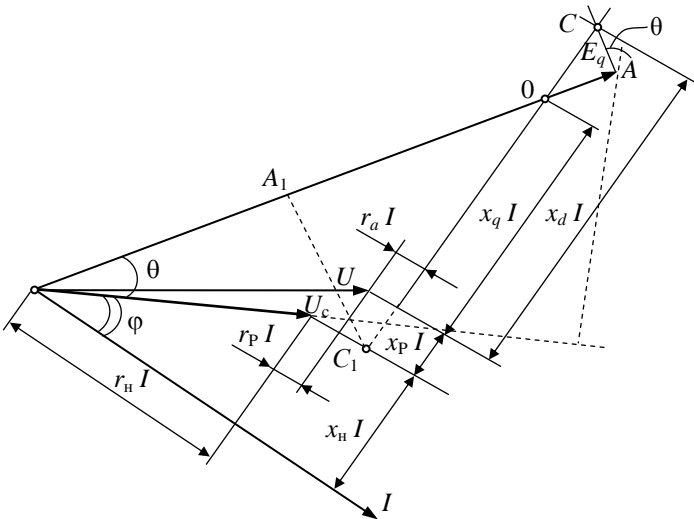


Рис. 13.7. Векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора, включенного в сеть через активно-индуктивное сопротивление

Последний член в числителе (13.32) характеризует часть активной мощности, затрачиваемую на потери в активном сопротивлении при нагрузке генератора реактивной мощностью величиной Q . Если последняя равна нулю, то величина активной мощности машины, которую она при данных параметрах отдает в сеть, определяется формулой

$$P = \frac{2U_c E_q x_{qp} \sin \theta + U_c^2 (x_d - x_q) \sin 2\theta}{2x_{dp} x_{qp} - r_{ap} (x_d - x_q) \sin 2\theta}. \quad (13.32, a)$$

В случае пренебрежения активными сопротивлениями в последних формулах они превращаются в известную формулу угловой характеристики синхронной машины

$$P = \frac{U_c E_q \sin \theta}{x_{dP}} + \frac{U_c^2 (x_d - x_q) \sin 2\theta}{2x_{dP} x_{qP}}. \quad (13.32, б)$$

Для расчета угловой характеристики машины, включенной на сеть через активно-индуктивное или только активное сопротивление, формула (13.32) не может быть использована. Однако расчет по этой формуле величины мощности генератора, включенного непосредственно на шины электростанции, без учета активного сопротивления обмотки статора дает практически точный результат. Например, для генератора МСС 375-500 мощностью 300 кВт значение активной мощности по точной формуле (13.32) равно 0,8 о. е., а по формуле (13.32, б) 0,788 о. е., т. е. ошибка составляет 1,5 %.

Зависимость величины реактивной мощности машины для указанных условий режима может быть найдена непосредственно из формулы (13.32), однако с целью получения для активной и реактивной мощностей сравнимых выражений с одинаковым знаменателем следует вновь обратиться к векторной диаграмме синхронной машины.

Из рис. 13.7 имеем

$$E_q \cos \theta = U_c + r_{aP} I \cos \varphi + x_{dP} I \sin \varphi + AC \sin \theta,$$

и после преобразований, аналогичных преобразованиям при выводе формулы (13.32), получим

$$P = \frac{2U_c E_q x_{qP} \cos \theta - [2x_{dP} x_{qP} + r_{aP} (x_d - x_q) \sin 2\theta] Q}{2r_{aP} [x_{qP} + (x_d - x_q) \sin^2 \theta]} - \frac{U_c^2}{r_{aP}}.$$

Отсюда при равной нулю активной мощности реактивная мощность машины определяется формулой

$$Q = \frac{2x_{qP} U_c E_q \cos \theta - 2U_c^2 [x_{qP} + (x_d - x_q) \sin^2 \theta]}{2x_{dP} x_{qP} + r_{aP} (x_d - x_q) \sin 2\theta}. \quad (13.33)$$

В случае пренебрежения активными сопротивлениями величина реактивной мощности равна

$$Q = \frac{U_c E_q \cos \theta}{x_{dP}} - \frac{U_c^2 [x_{qP} + (x_d - x_q) \sin^2 \theta]}{x_{dP} x_{qP}}. \quad (13.33, а)$$

Для неявнополюсных синхронных генераторов формулы мощности вытекают из полученных зависимостей, если в них положить $x_q = x_d$. Активная мощность по формуле (13.32) равна

$$P = \frac{U_c E_q \sin \theta + r_{aP} Q}{x_{dP}}, \quad (13.34)$$

и, пренебрегая активными сопротивлениями, получаем известную формулу угловой характеристики неявнополусной машины

$$P = \frac{U_c E_q \sin \theta}{x_{dP}}. \quad (13.34, a)$$

Реактивная мощность неявнополусного генератора определяется для $x_d = x_q$ из формулы (13.33). Находим

$$Q = \frac{U_c E_q \cos \theta - U_c^2}{x_{dP}}. \quad (13.35)$$

Располагая формулами, в которых отражается зависимость между параметрами генератора, с одной стороны, и параметрами нагрузки - с другой, можно исследовать практически любой режим генератора при статическом изменении нагрузки. Исследовать можно режимы, как одиночного генератора, так и нескольких генераторов включенных параллельно на общую сеть. Наибольшие трудности возникают при исследовании режимов параллельной работы, причем если вопросы, касающиеся регулирования и распределения реактивной мощности между генераторами, могут быть решены с помощью полученных здесь формул, то вопросы регулирования и распределения активной мощности требуют отдельного анализа, так как распределение мощности полностью определяется параметрами и свойствами энергетических двигателей генераторов.

На рис. 13.8 построены векторные диаграммы, иллюстрирующие режимы синхронной машины в качестве генератора (а), синхронного компенсатора (б) и синхронного двигателя (в) с выдачей в сеть реактивного (емкостного) тока.

В генераторном режиме, как видно из векторной диаграммы, машина выдает, кроме реактивного тока, активную составляющую тока, вектор которой совпадает с вектором напряжения и угол вылета ротора θ имеет положительное значение; в режиме компенсатора активная составляющая тока отсутствует и угол $\theta = 0$; в режиме синхронного двигателя вектор активной составляющей тока находится в противофазе с вектором напряжения и угол θ имеет отрицательное значение, так как ротор машины отстает от вращающегося в положительном направлении электромагнитного поля статора.

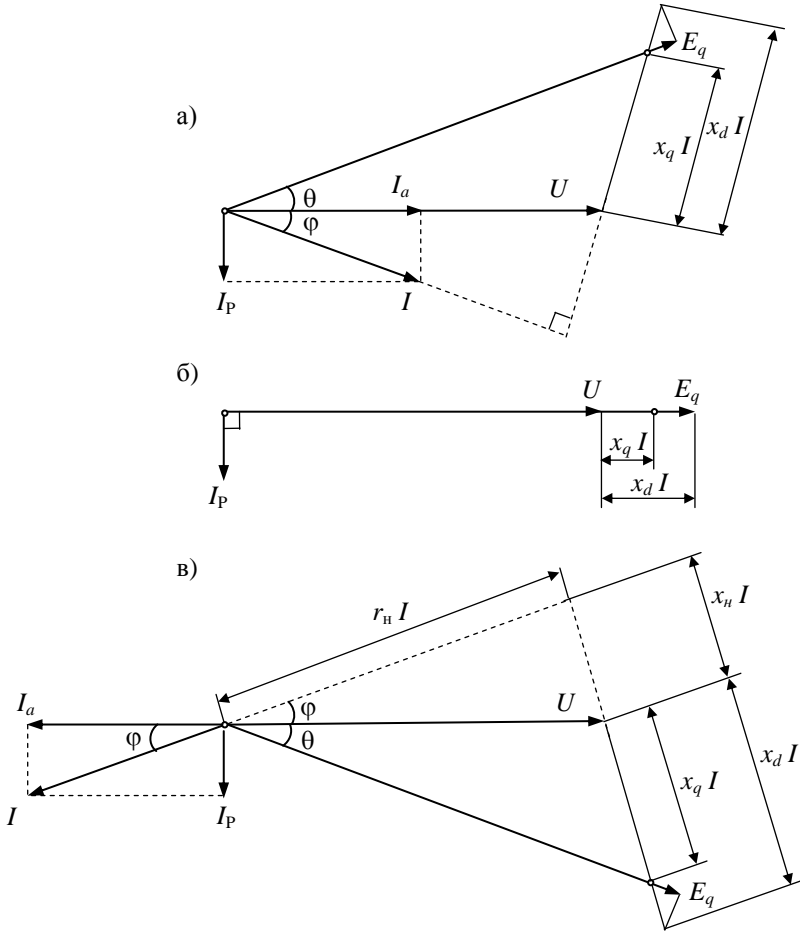


Рис. 13.8. Векторные диаграммы синхронной явнополюсной машины:
 а - синхронного генератора, б - синхронного компенсатора,
 в - синхронного электродвигателя

Из векторной диаграммы синхронной явнополюстной машины в режиме двигателя (рис. 13.8, в) могут быть получены зависимости, имеющие самостоятельное практическое значение с точки зрения реализации задачи выдачи реактивной, емкостной мощности в сеть и оптимального распределения последней между мощными синхронными двигателями.

Из векторной диаграммы двигателя можно получить зависимость подобную (13.7), а именно

$$U = \frac{z_{\text{H}} \sqrt{x_{q\Sigma}^2 + r_{\text{H}}^2}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + r_{\text{H}}^2} E_q,$$

где $z_{\text{H}} = \sqrt{x_{\text{H}}^2 + r_{\text{H}}^2}$ - параметры, отражающие потребляемую мощность двигателем в рабочем режиме (активное сопротивление обмотки статора $r_a \approx 0$); $x_{d\Sigma}, x_{q\Sigma}$ - суммы индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям двигателя, соответственно.

Если двигатель подключен к сети с напряжением U_c через реактор и трансформатор, то

$$\begin{aligned} x_{d\Sigma} &= x_d + x_{\text{H}} + x_{\text{T}} + x_{\text{P}}; \\ x_{q\Sigma} &= x_q + x_{\text{H}} + x_{\text{T}} + x_{\text{P}}. \end{aligned}$$

ЭДС двигателя пропорциональна току возбуждения последнего, а в относительных единицах эти величины равны и поэтому

$$I_{\text{B}} = \frac{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + r_{\text{H}}^2}{z_{\text{H}} \sqrt{x_{q\Sigma}^2 + r_{\text{H}}^2}} U_c.$$

Так как параметры $z_{\text{H}}, x_{\text{H}}, r_{\text{H}}$ определяются зависимостями

$$z_{\text{H}} = \frac{U_c^2}{S}, \quad x_{\text{H}} = \left(\frac{U_c}{S} \right)^2 Q, \quad r_{\text{H}} = \left(\frac{U_c}{S} \right)^2 P,$$

то после их подстановки в последнюю формулу имеем

$$I_{\text{B}} = \frac{a_1 Q^2 + b_1 Q + c_1}{\sqrt{a_2 Q^2 + b_2 Q + c_2}}, \quad (13.36)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \kappa x_{d\Sigma}^2; & b_1 &= (1 + \kappa) x_{d\Sigma} U_c^2; \\ c_1 &= \kappa (x_{d\Sigma} P)^2 + U_c^4; & a_2 &= (\kappa x_{d\Sigma} U_c)^2; \\ b_2 &= 2\kappa x_{d\Sigma} U_c^4; & c_2 &= [(x_{d\Sigma} \kappa) P^2 + U_c^4] U_c^2; \\ \kappa &= \frac{x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma}}. \end{aligned} \right\} \quad (13.37)$$

Эта формула является математической моделью синхронного явнополюсного двигателя для реализации задачи регулирования выдаваемой реактивной мощности Q в сеть путем изменения тока

возбуждения I_B при известном напряжении U_c на шинах подстанции и известной активной мощности двигателя P . Правильность этой зависимости подтверждена проверкой последней для синхронных двигателей, параметры которых приведены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Параметры синхронных двигателей

Наименование параметра	Тип двигателя			
	СТД-800-2	СДН-14-59-6	СДС-19-56-40	СДМ 32-24-59-80 УХЛ 4
Мощность:				
активная на валу, кВт	800	1250	2500	4000
активная потребляемая, кВт	833	1305	2634	4210
реактивная, квар	403	632	1275	2039
полная, кВ·А	926	1450	2926	4678
Частота вращения, об/мин	3000	1000	150	75
КПД, %	96	95,8	94,9	95
Ток возбуждения, А:				
номинальный	282	255	278	260
на холостом ходу	128	116	174	173
Синхронное индуктивное сопротивление:				
в продольной оси x_d о. е.,	1,6	1,6	0,74	0,8
в поперечной оси $x_q = 0,7 x_d$ о.е.	1,12	1,12	0,52	0,56
Составляющие потерь активной мощности [8]:				
А, кВт	2,59	3,7	12,3	17,7
В, кВт	2,81	3,2	19	24,3

Однако эта зависимость достаточно сложна для практических расчетов, и поэтому целесообразно оценить возможность ее упрощения, принимая отношение сопротивлений двигателя $k = 1$, т. е. рассматривать явнополюсную машину как неявнополюсную, у которой $x_d = x_q$.

При этом условии искомая зависимость имеет вид

$$I_B = \frac{1}{U_c} \sqrt{aQ^2 + \epsilon Q + c}, \quad (13.38)$$

где

$$a = x_{d\Sigma}^2; \quad \epsilon = 2x_{d\Sigma}U_c^2; \quad c = (x_{d\Sigma}P)^2 + U_c^4.$$

По этой формуле для номинального режима, например, двигателя СДМ-32-24-59 мощностью 4000 кВт при 75 об/мин величина тока возбуждения равна 3,72 о. е. против действительного значения 3,66 о. е., т. е. погрешность составляет +1,6 %.

Анализ показывает, что погрешность в расчете тока возбуждения по приближенной формуле будет не хуже 4-5 % при условии соотношения параметров двигателя $0,33x_d < x_q < x_d$.

Предложенная упрощенная математическая модель синхронного двигателя была использована для разработки алгоритма и компьютерной программы расчета оптимального распределения реактивной мощности по синхронным двигателям [27].

Алгоритм расчета разработан на основе методики неопределенных множителей Лагранжа, предложенной И.А. Сыромятниковым [8].

Для оценки величины реактивной мощности, которую может выдать двигатель в сеть при известном напряжении сети и потребляемой активной мощности, последняя зависимость может быть преобразована к такому виду

$$Q_* = \sqrt{\left(\frac{U_{c_*}}{x_{d\Sigma_*}} I_{B_*}\right)^2 - P_*^2} - \frac{U_{c_*}^2}{x_{d\Sigma_*}}, \quad (13.39)$$

где все величины приведены к номинальным параметрам двигателя,

$$\left. \begin{aligned} Q_* &= \frac{Q}{S_{\text{НОМ}}} \left[\frac{\text{квар}}{\text{кВ} \cdot \text{А}} \right]; & U_{c_*} &= \frac{U_c}{k_T U_{\text{НОМ}}} \left[\frac{\text{кВ}}{\text{кВ}} \right]; \\ P_* &= \frac{P}{S_{\text{НОМ}}} \left[\frac{\text{кВт}}{\text{кВ} \cdot \text{А}} \right]; & x_{d\Sigma_*} &= x_{d\Sigma} [\text{Ом}] \frac{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \left[\frac{\text{кА}}{\text{кВ}} \right]; \\ I_{B_*} &= \frac{I_B}{I_{\text{В.Х.Х}}} \left[\frac{\text{А}}{\text{А}} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (13.40)$$

Следует отметить, что индуктивные сопротивления трансформатора подстанции (x_T) и реактора (x_p) весьма малы по сравнению с индуктивным сопротивлением двигателя (x_d) и поэтому напряжение сети (U_c) в формуле можно считать напряжением на выводах двигателя (U_d). Эта зависимость легла в основу разработки и создания аппаратуры

управления выдачей реактивной мощности в сеть синхронным двигателем [27].

В заключение в табл. 13.3 помещаются обозначения основных параметров обмоток синхронной машины, приводимых в каталогах и паспортных данных.

Таблица 13.3

Основные параметры обмоток синхронной машины

Наименование	Обозначение
Индуктивные сопротивления:	
обмотки статора	
в продольной оси	
синхронное	x_d
переходное	x'_d
сверхпереходное	x''_d
в поперечной оси	
синхронное	x_q
переходное	$x'_q = x_q$
сверхпереходное	x''_q
обратной и нулевой последовательности	x_2, x_0
демпферной обмотки в продольной и поперечной осях	x_{rd}, x_{rq}
Активные сопротивления обмотки	
статора	r_a
ротора	$r_B (r_r)$
демпферной	r_{rd}, r_{rq}
Постоянные времени (с)	
обмотки статора	$T_a, (T_s)$
ротора при разомкнутой обмотке статора	T_{d0}
ротора при короткозамкнутой обмотке статора	T'_d
Сверхпереходные постоянные времени, с	T''_d, T''_q

Глава 14

Уравнения Парка-Горева, описывающие электромагнитный переходный процесс синхронной машины*

Динамическое равновесие напряжений при протекании тока в замкнутом контуре, каковыми является любая фазная обмотка статора синхронной машины, определяется уравнением $u = e - ri$.

Например, для фазы A

$$u_A = -\frac{d\psi_A}{dt} - r_A i_A, \quad (14.1)$$

где u_A , i_A - напряжение, приложенное к фазе обмотки, и ток в ней; e , ψ_A - ЭДС и потокосцепление фазы обмотки; r_A - активное сопротивление фазы обмотки.

Изменение потокосцеплений в машине происходит при изменении величины магнитных потоков, неподвижных относительно витков обмоток (благодаря трансформаторной связи между ними), и вследствие перемещения магнитных потоков относительно витков обмоток из-за вращения поля трехфазного статора и потока ротора. При вращении явнополюсного ротора индуктивность обмотки статора, как указывалось в предыдущей главе, будет изменяться в пределах $L_d \dots L_q$.

По этой причине в дифференциальных уравнениях, которыми будет описываться переходный процесс, появятся члены с переменными коэффициентами. Решение таких уравнений связано с большими трудностями. Чтобы их избежать, целесообразно рассматривать переходный процесс в машине по двум ее осям d и q , так же, как рассматривались ее статические режимы на основе разложения векторов векторных диаграмм по осям d и q .

Для представления процессов в осях d , q следует найти изменение в этих осях величин i_A , u_A , ψ_A , взаимосвязь между которыми отражается уравнением (14.1).

*Park R.H. Two-reaction theory of Synchronous Machines. T.A.I.E.E. 48, № 2, 1929.

Горев А.А. Основные уравнения неустановившегося режима синхронной машины. Труды ЛПИ, №5, 1936.

Очевидно, что для представления процессов в машине по двум осям d и q необходимо считать, что намагничивающая сила, создаваемая токами симметричной системы трех фазных обмоток, в соответствии с рис. 14.1 должна быть по своему действию адекватна намагничивающим силам в продольной и поперечной осях машины

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left[i_A \cos \gamma + i_B \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_C \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right]; \\ i_q &= \frac{2}{3} \left[i_A \sin \gamma + i_B \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_C \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (14.2)$$

где $\gamma = \gamma_0 + \omega t$ - угол между осью d и осью фазы обмотки статора (рис. 14.1), увеличивающийся со скоростью ω .

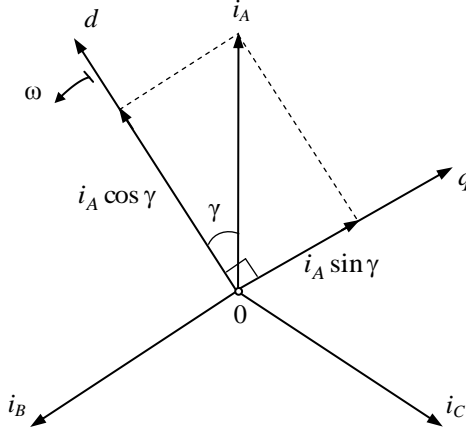


Рис. 14.1. Разложение векторов симметричной системы A, B, C по осям d - q

Теперь из этих равенств следует установить взаимосвязь между током в фазе статора i_A , с одной стороны, и адекватными токами продольного и поперечного контуров статора i_d, i_q , с другой. Если умножить первое равенство системы (14.2) на $\cos \gamma$, а второе – на $\sin \gamma$, то после отдельного сложения левых и правых частей получим

$$i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma = \frac{2}{3} \left[i_A - \frac{1}{2} (i_B + i_C) \right].$$

Поскольку в симметричной системе справедливо равенство $i_A = -(i_B + i_C)$, то ток в фазной обмотке статора A для любого момента

времени определяется через токи в продольной и в поперечной осях по формуле

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma, \quad \text{или} \quad i_A = i_d \cos \omega t + i_q \sin \omega t. \quad (14.3)$$

Величина напряжения в фазной обмотке статора для любого момента времени выражается через напряжения в продольной и поперечной осях подобной зависимостью

$$u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma, \quad \text{или} \quad u_A = u_d \cos \omega t + u_q \sin \omega t. \quad (14.4)$$

Такой же зависимостью выражаются и потокосцепления фазы

$$\psi_A = \psi_d \cos \gamma + \psi_q \sin \gamma. \quad (14.5)$$

Очевидно, выражения для токов, а также для напряжений и потокосцеплений в двух других фазах B и C будут подобны полученным, но с изменением угла γ соответственно на $\pm \frac{2\pi}{3}$.

Теперь, если подставить в уравнение (14.1) найденные зависимости i_A , u_A , ψ_A , выраженные через соответствующие величины в осях d , q , можно получить уравнение переходного процесса не в фазе обмотки статора, а в продольном и поперечном контурах последнего. Прежде чем делать указанную подстановку, следует учесть, что в выражении для потокосцепления ψ_A функциями времени является не только угол γ , но и значения потокосцеплений ψ_d , ψ_q . Тогда

$$\frac{d\psi_A}{dt} = -\psi_d \sin \gamma \frac{d\gamma}{dt} + \cos \gamma \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \cos \gamma \frac{d\gamma}{dt} + \sin \gamma \frac{d\psi_q}{dt}. \quad (14.6)$$

Подставляя выражения (14.3), (14.4), (14.6) в уравнение (14.1), получаем

$$\left(u_d + r_A i_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\gamma}{dt} \right) \cos \gamma + \left(u_q + r_A i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\gamma}{dt} \right) \sin \gamma = 0.$$

Это равенство справедливо для любого момента времени при любом значении γ , а следовательно, чтобы оно удовлетворялось, коэффициенты при $\cos \gamma$ и $\sin \gamma$, заключенные в круглые скобки, могут быть равны только нулю. Тогда получаются следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\gamma}{dt} + r_A i_d &= -u_d; \\ \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\gamma}{dt} + r_A i_q &= -u_q. \end{aligned} \right\} \quad (14.7)$$

Таким образом, напряжения статорной обмотки по продольной и поперечной осям уравниваются трансформаторными ЭДС

$\left(\frac{d\psi}{dt}\right)$, ЭДС вращения $\left(\psi \frac{d\gamma}{dt}\right)$ и падением напряжения на активном сопротивлении (ri).

Уравнение переходного режима для обмотки возбуждения соответствует уравнению индуктивной катушки для случая включения ее на напряжение постоянного тока

$$\frac{d\psi_B}{dt} + r_B i_B = u_B. \quad (14.8)$$

Подобные уравнения записываются для демпферной обмотки в продольной и поперечной осях машины

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{rd}}{dt} + r_{rd} i_{rd} &= 0; \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} + r_{rq} i_{rq} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14.9)$$

В правой части последних равенств стоят нули, так как демпферная обмотка не имеет внешнего источника напряжения.

В конечном итоге переходные процессы в любом контуре синхронной машины описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\gamma}{dt} + r_a i_d &= -u_d; \\ \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\gamma}{dt} + r_a i_q &= -u_q; \\ \frac{d\psi_B}{dt} + r_B i_B &= u_B; \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} + r_{rd} i_{rd} &= 0; \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} + r_{rq} i_{rq} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14.10)$$

Эта система уравнений носит название «уравнения Парка-Горева» для синхронной машины. Здесь r_a - сопротивление фазы обмотки статора генератора, указываемое в каталоге на машину.

Полученная система уравнений, описывающих электромагнитные переходные процессы в контурах машин, дополняется уравнением динамического равновесия ее ротора в соответствии с уравнением второго закона Ньютона для вращающегося тела

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_B - M_C,$$

где M_B, M_C - вращающий момент и момент сопротивления на валу ротора, соответственно.

Это уравнение учитывается при анализе переходных процессов синхронной машины, связанных с изменением движения ротора под влиянием вращающих моментов. Здесь же рассматриваются электромагнитные процессы при постоянной или заданной частоте вращения ротора и поэтому надобность в этом уравнении отпадает.

Выражения для потокосцеплений, величины которых входят в уравнения Парка-Горева (14.10), могут быть получены при помощи конструктивной модели синхронной машины в осях d, q , показанной на рис. 14.2. В соответствии с указанными направлениями векторов токов так же, как на векторной диаграмме рис. 13.3, потокосцепления для обмоток в осях d, q могут быть определены приведенными ниже равенствами: в продольной оси обмотки статора, обмотки возбуждения и демпферной обмотки, соответственно,

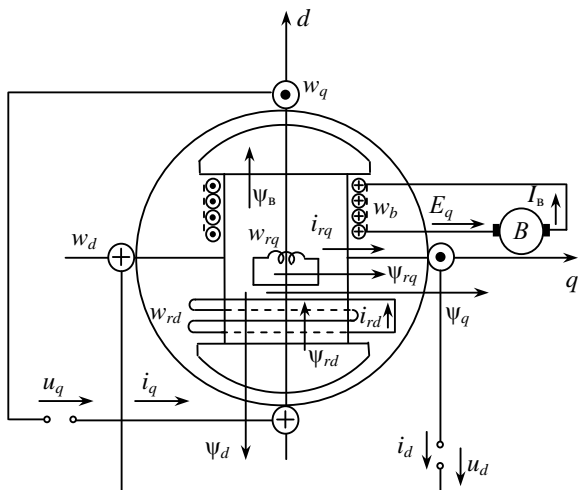


Рис. 14.2 Конструктивная модель синхронной машины в осях $d - q$ для определения потокосцеплений

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= -L_d i_d + M_{dr} i_{rd} + M_{db} i_b; \\ \Psi_B &= -M_{Bd} i_d + M_{Br} i_{rd} + L_B i_B; \\ \Psi_{rd} &= -M_{rd} i_d + L_{rd} i_{rd} + M_{rb} i_b, \end{aligned} \right\} \quad (14.11)$$

в поперечной оси для фазной обмотки статора и для демпферной обмотки

$$\left. \begin{aligned} \Psi_q &= L_q i_q + M_{qr} i_{rq}; \\ \Psi_{rq} &= M_{rq} i_q + L_{rq} i_{rq}. \end{aligned} \right\} \quad (14.12)$$

Системы уравнений (14.10), (14.11), (14.12) для приближенного анализа и расчета переходных процессов могут быть упрощены с учетом степени влияния отдельных членов уравнений на процесс, а именно:

величина активного сопротивления обмотки статора значительно меньше индуктивных сопротивлений и поэтому принимается $r_a = 0$;

процессы рассматриваются без учета влияния демпферных обмоток, т. е. принимается $\Psi_{rd} = 0$ и $\Psi_{rq} = 0$, соответственно $i_{rd} = 0$, $i_{rq} = 0$;

частота вращения ротора постоянна и равна синхронной частоте вращения ω_c , т. е. $\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \omega_c t = \omega_c = \text{const}$.

При этих условиях указанные системы уравнений в именованных единицах могут быть представлены одной системой, а именно:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \omega_c &= -u_d; \\ \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \omega_c &= -u_q; \\ \frac{d\Psi_B}{dt} + r_B i_B &= u_B; \\ \Psi_d &= -L_d i_d + M_{db} i_b; \\ \Psi_B &= -M_{Bd} i_d + L_B i_B; \\ \Psi_q &= L_q i_q. \end{aligned} \right\} \text{и.е.} \quad (14.13)$$

Уравнения Парка-Горева обычно представляются в относительных единицах, но прежде следует установить значения коэффициентов само- и взаимной индукции в этих уравнениях.

При отсутствии тока в обмотке статора $i_A = 0$ следует $i_d = 0$, $i_q = 0$ (см. формулы (14.3)), т. е. потокосцепления в продольной оси статора ψ_d равны потокосцеплениям обмотки ротора ψ_B и, следовательно, коэффициент взаимоиנדукции между обмотками M_{dB} (см. формулы (14.13)) будет равен коэффициенту самоиндукции L_B , т. е. $M_{dB} = L_B$.

С другой стороны, из пятого уравнения системы (14.13) следует, что при разомкнутой обмотке возбуждения ее потокосцепления равны $\psi_B = -M_{Bd}i_d$. Но потокосцепления разомкнутой обмотки возбуждения при наличии тока в обмотке статора, как видно из рис. 14.3, равны потокосцеплениям последней $L_d i_d$ за вычетом потокосцеплений рассеяния $\sigma L_d i_d$, т. е. $\psi_B = -(L_d - \sigma L_d) i_d$.

С учетом этих соображений система уравнений (14.13) запишется так [27]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d \omega_c &= -u_d; \\ \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_q \omega_c &= -u_q; \\ \frac{d\psi_B}{dt} + r_B i_B &= u_B; \\ \psi_d &= -L_d i_d + L_B i_B; \\ \psi_B &= -(L_d - \sigma L_d) i_d + L_B i_B; \\ \psi_q &= L_q i_q. \end{aligned} \right\} \text{ и.е.} \quad (14.14)$$

Перевод уравнений Парка-Горева в относительные единицы осуществляется так же, как перевод уравнений синхронной машины в статическом режиме (см. § 13.2), делением параметров статорных цепей на базисные значения

$$\psi_{\phi, \text{ном}} = L_a I_{\phi, \text{ном}} = \frac{x_\phi I_{\phi, \text{ном}}}{\omega_c} = \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{\omega_c},$$

а параметры роторной цепи на базисные значения

$$U_{B, X, X} = r_B i_{B, X, X} = \frac{r_B}{L_B} \psi_{B, X, X},$$

причем $U_{B, X, X} = U_{\phi, \text{ном}} = 1$ о.е.

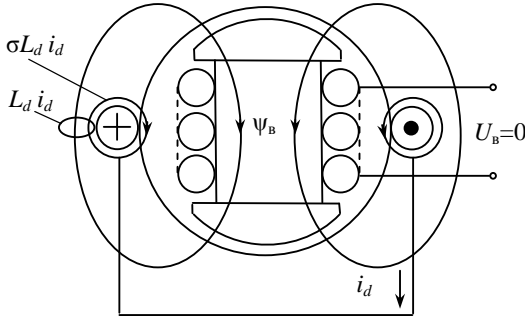


Рис. 14.3. Принципиальная картина распределения потокоцеплений продольного контура синхронного генератора

В итоге преобразований система уравнений (14.14) окончательно запишется в системе относительных единиц в таком виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q &= -u_d; \\ \frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d &= -u_q; \\ T_{d0} \frac{d\psi_B}{dt} + i_B &= u_B; \\ \psi_d &= -x_d i_d + i_B; \\ \psi_B &= -(x_d - x'_d) i_d + i_B; \\ \psi_q &= x_q i_q. \end{aligned} \right\} \text{о. е.} \quad (14.15)$$

Параметры обмоток в этом уравнении приведены в табл. 13.3.

Из этой системы уравнений можно выделить третье уравнение и преобразовать его для непосредственного анализа изменения напряжения генератора при изменении нагрузки последнего.

Это важно для рассмотрения режимов автономного генератора, не включенного на шины с постоянным напряжением.

Пятое, алгебраическое уравнение, как видно из векторной диаграммы на рис. 13.6, представляет собой равенство

$$\psi_B = E_q - (x_d - x'_d) I_d = E'_q,$$

в котором величина i_B заменена равной ей, в относительных единицах, величиной E_q .

Подставляя это равенство в третье дифференциальное уравнение (14.15) имеем

$$T_{d0} \frac{dE'_q}{dt} + E_q = u_B.$$

и после подстановки значений E_q (13.7) и E'_q (13.10) получим [27]

$$\frac{du}{dt} + k_2 u = k_1 u_B, \quad (14.16)$$

где коэффициенты для явнополюсного генератора

$$k_1 = \frac{\xi'}{T_{d0}}, \quad k_2 = \frac{\xi'}{\xi T_{d0}},$$

$$\xi = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2}, \quad \xi' = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2};$$

для неявнополюсного генератора

$$k_1 = \frac{\zeta'}{T_{d0}}, \quad k_2 = \frac{\zeta'}{\xi T_{d0}},$$

$$\zeta = \frac{z_H}{\sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}, \quad \zeta' = \frac{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2},$$

где $x_{dH} = x_d + x_H$, $x'_{dH} = x'_d + x_H$, $x_{qH} = x_q + x_H$, $r_{aH} = r_a + x_H$;

x_d, x'_d, x_q, r_a - параметры генератора; z_H, x_H, z_H - параметры нагрузки.

Глава 15

Переходные процессы в синхронном генераторе до его включения на параллельную работу с сетью

§ 15.1. Переходные процессы в цепи ротора и статора генератора при включении постоянного возбуждения

В этом параграфе рассматриваются переходные процессы в цепи ротора и статора генератора, когда ротор последнего вращается с синхронной скоростью на холостом ходу и его обмотка ротора включается на постоянное напряжение (рис.15.1).

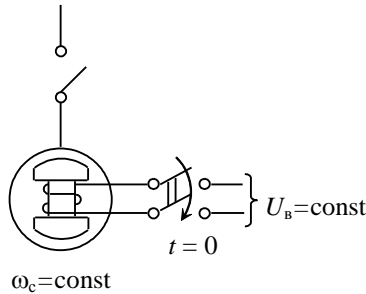


Рис.15.1. Принципиальная схема включения
на генератор постоянного возбуждения

Представляет интерес характер изменения тока в обмотке ротора и напряжения на зажимах обмотки статора.

Для этого используем уравнения Парка-Горева (14.15), которые должны быть записаны с учетом условий рассматриваемого переходного процесса.

Начальные условия формулируются таким образом: включаемое напряжение на обмотку ротора постоянно $U_{в.х.х} = \text{const}$; частота вращения ротора постоянна и равна синхронной частоте вращения $\omega = \omega_c = \text{const}$; статорная обмотка на холостом ходу генератора разомкнута и поэтому тока в ней нет, т. е. $i_A = 0$ и, следовательно, $i_d = 0$, $i_q = 0$ (см.14.3), а также $\psi_q = x_q \cdot i_q = 0$.

При этих условиях уравнения (14.15) запишутся так

$$\left. \begin{aligned} -\frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} &= u_d; \\ \psi_d &= u_q; \\ T_{d0} \frac{d\psi_B}{dt} + i_B &= U_{\text{в.х.х}}; \\ \psi_d &= \psi_B = i_B. \end{aligned} \right\} \quad (15.1)$$

Первая часть поставленной задачи – определение характера изменения тока возбуждения – решается при помощи третьего дифференциального уравнения с подстановкой в него значения $\psi_B = i_B$, т. е.

$$T_{d0} \frac{di_B}{dt} + i_B = U_{\text{в.х.х}}. \quad (15.2)$$

После деления на T_{d0} и при $\frac{1}{T_{d0}} = \alpha$ имеем

$$\frac{di_B}{dt} + \alpha i_B = \alpha U_{\text{в.х.х}}. \quad (15.3)$$

Прямое преобразование Лапласа этого уравнения дает выражение

$$sI_B(s) - i_B(0) + \alpha I_B(s) = \frac{\alpha U_{\text{в.х.х}}}{s}.$$

Здесь $i_B(0)$, начальное значение тока возбуждения равно нулю, так как в момент включения обмотки ротора на постоянное напряжение тока в ней не было. Тогда изображение тока i_B находится по формуле

$$I_B(s) = U_{\text{в.х.х}} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)}. \quad (15.4)$$

Обратное преобразование Лапласа этого выражения при помощи таблицы (см. табл. 1.1) дает

$$i_B(t) = U_{\text{в.х.х}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{d0}}}\right). \quad (15.5)$$

График изменения тока $i_B(t)$ построен в соответствии с зависимостью (15.5) на рис. 15.2.

Вторая часть задачи – определение характера изменения напряжения на обмотке статора генератора при включении возбуждения – решается последовательными этапами. Сначала целесообразно определить изменения составляющей u_q , поскольку из системы (15.1) непосредственно следует

$$u_q = \psi_d = i_B.$$

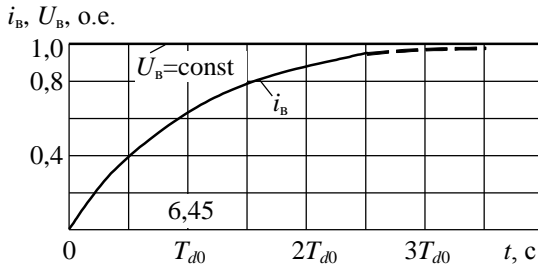


Рис.15.2. График изменения тока в обмотке турбогенератора ТВФ-100-2 мощностью 100 МВт при включении постоянного возбуждения

Отсюда вытекает выражение

$$u_q(t) = U_{\text{в.х.х}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{d0}}} \right), \quad (15.6)$$

показывающее изменение одной составляющей - ЭДС вращения.

На основе первой и второй зависимостей (15.1) определяется

$$u_d(t) = -\frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} = -\frac{1}{\omega_c} \frac{du_q}{dt} = \frac{-U_{\text{в.х.х}}}{\omega_c T_{d0}} e^{-\frac{t}{T_{d0}}}. \quad (15.7)$$

Это равенство показывает изменение другой составляющей - трансформаторной ЭДС.

Располагая составляющими u_q и u_d , можно найти по формуле (14.4) напряжения в фазе обмотки статора

$$u_A(t) = \left[\frac{-U_{\text{в.х.х}}}{\omega_c T_{d0}} e^{-\frac{t}{T_{d0}}} \cos \omega_c t + U_{\text{в.х.х}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{d0}}} \right) \sin \omega_c t \right]. \quad (15.8)$$

Отсюда следует, что изменение напряжения на зажимах генератора определяется двумя составляющими, одна из которых пропорциональна наводимой трансформаторной ЭДС, а другая - ЭДС вращения (рис.15.3).

Амплитудное значение первой составляющей $\frac{U_{\text{в.х.х}}}{\omega_c T_{d0}}$ в сотни, тысячи раз меньше второй $U_{\text{в.х.х}}$, так как величина $\omega_c T_{d0}$ равна для генераторов мощностью 100 МВт 2000–2500 ($\omega_c = 314 \text{ с}^{-1}$, $T_{d0} = 6,5\text{--}8 \text{ с}$) и поэтому ею пренебрегаем, а изменение статорного напряжения генератора при включении возбуждения принимается в соответствии с графиком огибающей поперечной составляющей напряжения (см. рис.15.2)

$$u_A(t) = U_{\text{в.х.х}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{d0}}} \right) \sin \omega_c t. \quad (15.9)$$

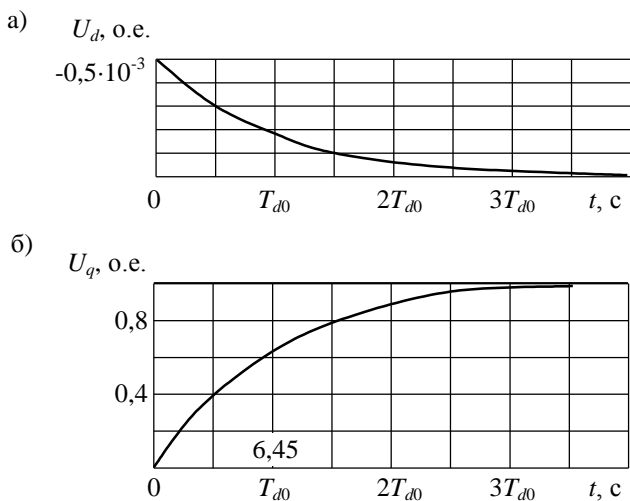


Рис. 15.3. Графики изменения составляющих напряжения на зажимах статора турбогенератора ТВФ-100-2 мощностью 100 МВт при включении постоянного возбуждения:

а – составляющая в продольной оси (масштаб по оси ординат увеличен в 1000 раз); б – составляющая в поперечной оси.

График изменения напряжения на фазе статора генератора построен по формуле (15.9) на рис.15.4.

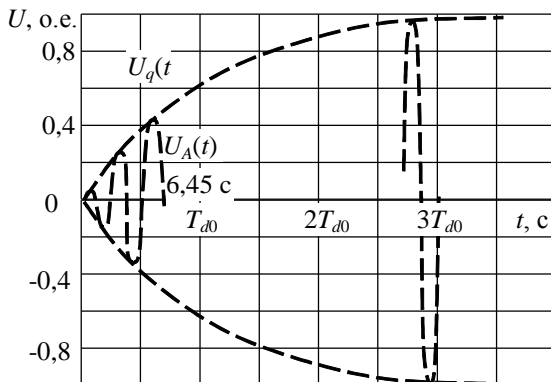


Рис. 15.4. График изменения напряжения на выводах статора турбогенератора типа ТВФ-100-2 при включении постоянного напряжения возбуждения

Расчет изменения тока возбуждения и напряжения на зажимах статора генератора при включении постоянного возбуждения проводится по формулам (15.5) и (15.8) для параметров турбогенератора типа ТВФ-100-2 мощностью 100 МВт (см. табл. 13.1).

Расчет по формуле (15.5) проводится в относительных единицах для генератора, имеющего постоянную частоту вращения $\omega_c = 314 \text{ с}^{-1}$ и постоянную времени обмотки ротора $T_{d0} = 6,45 \text{ с}$. Величина напряжения возбуждения $U_{\text{вх}}$ соответствует напряжению возбуждения генератора на холостом ходу. Последняя может быть найдена по каталожным данным, приведенным в табл. 13.1,

$$U_{\text{в.х.х}} = U_{\text{в.ном}} \cdot \frac{I_{\text{в.х.х}}}{I_{\text{в.ном}}} = 270 \frac{640}{1605} \text{ В};$$

$$U_{\text{в.х.х}} = 108 \text{ В}, U_{\text{в.х.х}} = 1 \text{ о.е.}$$

После подстановки численных значений расчетная формула (15.5) принимает вид

$$i_{\text{в}}(t) = 1 \left(1 - e^{-\frac{t}{6,45}} \right);$$

график построен на рис. 15.2.

Напряжение статора при возбуждении машины определяется формулой (15.8), однако амплитуда первого члена формулы в данном случае равна

$$\frac{U_{в.х.х}}{\omega_c T_{d0}} = \frac{1}{314 \cdot 6,45} = 5 \cdot 10^{-4},$$

поэтому полученной величиной, по сравнению с амплитудой второго члена $U_{в.х.х} = 1$, можно пренебречь. Тогда по расчетной формуле

$$u_A(t) = 1 \left(1 - e^{-\frac{t}{6,45}} \right) \sin 314t$$

строится график огибающих (см. рис. 15.4), на котором $U_A = 1$ о.е., т. е. $U = 10,5$ кВ*.

§ 15.2. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при трехфазном коротком замыкании

При изучении этих переходных процессов принимается, что трехфазное короткое замыкание происходит на зажимах статорной обмотки на холостом ходу машины, имеющей постоянное возбуждение и постоянную синхронную частоту вращения (рис. 15.5).

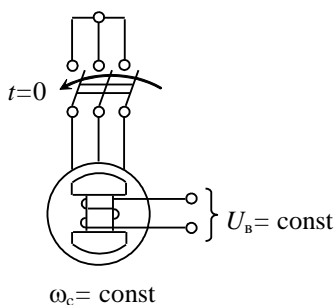


Рис. 15.5. Принципиальная схема возникновения трехфазного короткого замыкания в цепи статора генератора

*На этом рисунке и на последующих графиках изменение синусоидальных функций показано штриховой линией условно.

Так как короткое замыкание происходит на зажимах статорной обмотки, то ее напряжение равно нулю, т. е. $u_A = 0$ и в соответствии с формулой (14.4) $u_d = 0$ и $u_q = 0$.

В синхронной машине активное сопротивление обмотки статора по сравнению с индуктивным сопротивлением весьма мало и поэтому можно считать $r_a = 0$.

В этом случае ток, протекающий по цепи статорной обмотки генератора, представляет собой реактивный, индуктивный ток, вектор которого будет отставать от вектора ЭДС на 90 эл. град., и, следовательно, будет ориентирован по продольной оси генератора.

Таким образом, весь ток в статоре при коротком замыкании будет являться продольным током i_d ; другая составляющая i_q будет равна нулю, $i_q = 0$, следовательно, и $\psi_q = 0$.

С учетом вышеизложенного уравнения (14.15) будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} &= 0; \\ \psi_d &= 0; \\ T_{d0} \frac{d\psi_B}{dt} + i_B &= U_B; \\ \psi_d &= -x_d i_d + i_B; \\ \psi_B &= -(x_d - x'_d) i_d + i_B. \end{aligned} \right\} \quad (15.10)$$

Характер изменения тока в цепи статора генератора при коротком замыкании можно определить, решая третье уравнение из системы (15.10) с подстановкой значений потокоцеплений ψ_B и тока возбуждения i_B

$$\psi_d = -x_d i_d + i_B = 0,$$

т. е.

$$i_B = x_d i_d. \quad (15.11)$$

Подставляя это значение в последнее уравнение (15.10), получим

$$\psi_B = x'_d i_d. \quad (15.12)$$

Тогда искомое уравнение запишется в виде

$$T_{d0} x'_d \frac{di_d}{dt} + x_d i_d = U_B \quad (15.13)$$

или

$$\frac{di_d}{dt} + \alpha i_d = \frac{\alpha U_B}{x_d}, \quad (15.14)$$

где

$$\alpha = \frac{x_d}{x'_d T_{d0}} = \frac{1}{T'_d}, \quad (15.15)$$

$T'_d = \frac{x'_d}{x_d} T_{d0}$ - постоянная обмотки ротора при короткозамкнутой об-

мотке статора генератора (дается в каталоге).

Решая полученное уравнение (15.14) методом преобразования Лапласа, имеем

$$sI_d(s) - i_d(0) + \alpha I_d(s) = \frac{\alpha U_B}{x_d} \frac{1}{s}. \quad (15.16)$$

Здесь $i_d(0)$ - начальное значение тока короткого замыкания, которое может быть найдено, исходя из следующих соображений. В начале задачи было принято, что активное сопротивление обмотки статора равно нулю. Тем самым было принято условие скачкообразного изменения тока в этой обмотке. Однако при скачкообразном изменении статорного тока результирующие потокоцепления в воздушном зазоре машины не должны изменяться так же скачкообразно, ибо в обмотках, согласно закону электромагнитной индукции, наводились бы бесконечно большие ЭДС.

В реальной машине такого явления не наблюдается и, следовательно, скачкообразному изменению тока в обмотке статора соответствует подобное изменение тока в обмотке ротора. Поэтому результирующие потокоцепления в воздушном зазоре в первый момент короткого замыкания остаются прежними, т. е. соблюдается условие $\psi_B(0) = \text{const}$, и тогда из системы уравнений (15.10) следует

$$\psi_B(0) = -(x_d - x'_d) i_d(0) + i_B(0) = \text{const},$$

но так как по формуле (15.11)

$$i_B(0) = x_d i_d(0),$$

то

$$\psi_B(0) = x'_d i_d(0).$$

Результирующие потокоцепления в воздушном зазоре машины без демпферных обмоток соответствуют ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением E'_q , а в относительных единицах эти величины равны

$$\psi_B(0) = E'_q = \text{const}. \quad (15.17)$$

Следовательно,

$$x'_d i_d(0) = E'_q,$$

а отсюда

$$i_d(0) = \frac{E'_q}{x'_d}. \quad (15.18)$$

Обозначая начальное значение тока короткого замыкания $i_d(0)$ через I'_d (начальный переходный ток к.з.), имеем расчетную формулу

$$I'_d = \frac{E'_q}{x'_d}. \quad (15.18, а)$$

Возвращаясь к уравнению (15.16) и решая его относительно $I_d(s)$, получим изображение тока короткого замыкания

$$I_d(s) = I'_d \frac{1}{s + \alpha} + \frac{U_B}{x_d} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)}.$$

Обратное преобразование Лапласа этого выражения с подстановкой значения α по формуле (15.15) дает искомым ответ

$$i_d(t) = I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{U_B}{x_d} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \right). \quad (15.19)$$

Видно, что после окончания переходного процесса (для $t = \infty$) значение установившегося тока короткого замыкания будет равно $I_{d\infty} = \frac{U_B}{x_d}$, но поскольку для установившегося режима в системе относительных единиц $U_B \equiv E_q$, то расчетная формула будет

$$I_{d\infty} = \frac{E_{q\infty}}{x_d}, \quad (15.20)$$

где $E_{q\infty}$ - стационарное установившееся значение ЭДС генератора.

Таким образом, формула изменения продольного тока генератора при трехфазном коротком замыкании (15.19) примет вид

$$i_d(t) = \left(I_{d\infty} + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} \right), \quad (15.21)$$

где $\Delta I'_d = I'_d - I_{d\infty}$ - приращение переходного тока.

Ток короткого замыкания в фазе статорной обмотки определяется по формуле (14.3)

$$i_A(t) = \left(I_{d\infty} + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} \right) \cos \omega_c t. \quad (15.22)$$

Графики изменения продольного тока короткого замыкания и тока в фазе генератора ТВФ-100-2 построены соответственно по формулам (15.21) и (15.22) на рис. 15.6. Из графика изменения тока в фазе, представляющего собой изменение периодической составляющей тока к.з., видно, что вследствие реакции статора ток в фазе не остается постоянным, как было при условии постоянства ЭДС (см. гл. 2), а затухает до установившегося значения тока к.з. $I_{d\infty}$.

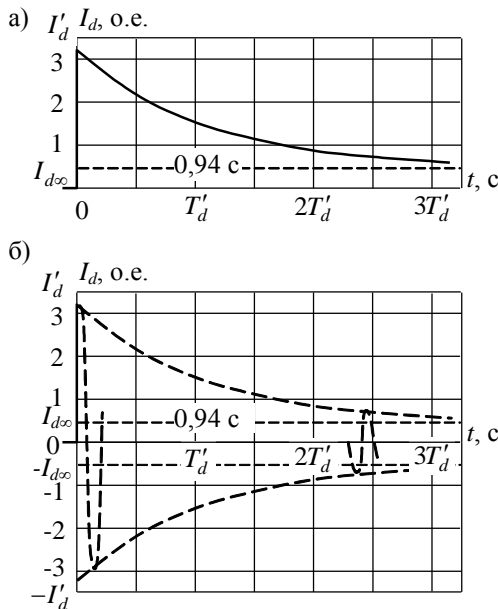


Рис.15.6. Графики изменения продольного тока (а) и тока в фазе (б) статора турбогенератора ТВФ-100-2 при трехфазном коротком замыкании

Теперь можно определить, как будет протекать переходный процесс в обмотке ротора генератора при коротком замыкании в статоре. С этой целью следует обратиться к уравнениям Парка-Горева (15.10) и решить их относительно тока возбуждения генератора. Из двух последних выражений (15.10) с учетом равенства $\psi_d = 0$ получаем

$$\Psi_B = -\frac{(x_d - x'_d)}{x_d} i_B + i_B = \frac{x'_d}{x_d} i_B.$$

Подставляя эту величину в третье уравнение (15.10), найдем, что

$$T_{d0} \frac{x'_d}{x_d} \frac{di_B}{dt} + i_B = U_B$$

или, учитывая формулу (15.15), имеем

$$\frac{di_B}{dt} + \alpha i_B = \alpha U_B.$$

Применяя к этому дифференциальному уравнению прямое \mathcal{L} -преобразование, получим

$$\begin{aligned} sI_B(s) - i_B(0) + \alpha I_B(s) &= \alpha U_B \frac{1}{s}; \\ (s + \alpha) I_B(s) - i_B(0) &= \alpha U_B \frac{1}{s}; \\ I_B(s) &= \frac{i_B(0)}{s + \alpha} + \frac{\alpha}{s(s + \alpha)} U_B. \end{aligned} \quad (15.23)$$

Начальное значение тока ротора $i_B(0)$ отыскивается здесь также на основе принципа постоянства результирующих потокоцеплений в воздушном зазоре машины как и начальное значение тока статора $i_d(0)$: для первого момента времени короткого замыкания при $t = 0$ находим

$$\Psi_B(0) = -(x_d - x'_d) i_d(0) + i_B(0) = \text{const},$$

а также

$$\Psi_d(0) = -x_d i_d(0) + i_B(0) = 0.$$

Тогда, решая оба эти равенства относительно тока i_B , определим

$$i_B(0) = \frac{x_d}{x'_d} \Psi_B(0).$$

Подставляя в это равенство значение $\Psi_B(0) \equiv E'_q$ (см. формулу (15.17)), получим расчетную формулу для тока возбуждения, который обозначим $i_{B0} \equiv i_{B0}$

$$i_{B0} = \frac{x_d}{x'_d} E'_q. \quad (15.24)$$

Возвращаясь к решению уравнения, найдем при помощи таблицы соответствий 1.1 оригинал искомой функции (15.23)

$$i_B(t) = i_{B0} e^{-\alpha t} + U_B (1 - e^{-\alpha t}).$$

Здесь значение напряжения возбуждения U_B в относительных единицах соответствует току возбуждения $i_{в.н}$ до короткого замыкания в цепи статора генератора, т. е. $U_{в.н} \equiv i_{в.н}$. Поэтому полученную формулу с учетом значения α по (15.15) можно переписать в следующем виде

$$i_B(t) = i_{в.н} + \Delta i_{в0} e^{-\frac{t}{T'_d}}, \quad (15.25)$$

где $\Delta i_{в0} = i_{в0} - i_{в.н}$ - приращение тока возбуждения генератора в начальный момент короткого замыкания в цепи статора.

График зависимости (15.25) применительно к параметрам генератора ТВФ-100-2 построен на рис.15.7.

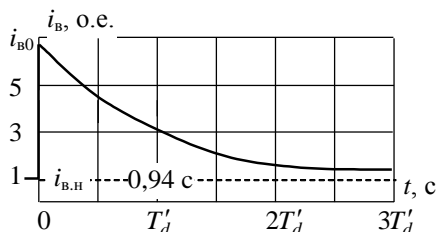


Рис.15.7. График изменения тока в обмотке ротора турбогенератора ТВФ-100-2 мощностью 100 МВт при трехфазном коротком замыкании обмотки статора

Расчет изменения токов при трехфазном коротком замыкании на холостом ходу генератора при постоянной частоте вращения ω_c и без учета демпферных обмоток проводится для параметров турбогенератора типа ТВФ-100-2 (см. табл. 13.1) по формуле (15.22). Расчет начинается с определения начального переходного тока по формуле (15.18, а)

$$I'_d = \frac{E'_q}{x'_d} = \frac{1}{0,314} = 3,18 \text{ о.е.},$$

т. е.

$$I'_d = 3,18 \cdot I_{ном} = 20,6 \text{ кА},$$

где ЭДС $E'_q = 1$ о.е. для ненагруженного генератора.

Установившийся ток короткого замыкания по формуле (15.20)

$$I_{d\infty} = \frac{E_{q\infty}}{x_d} = \frac{1}{2,155} = 0,464 \text{ о.е.},$$

т. е.

$$I_{d\infty} = 0,464 I_{\text{ном}} = 3 \text{ кА}.$$

Тогда

$$\Delta I'_d = I'_d - I_{d\infty} = 2,72 \text{ о.е.}$$

Постоянная времени T'_d по формуле (15.15)

$$T'_d = \frac{x'_d}{x_d} T_{d0} = \frac{0,314}{2,155} 6,45 = 0,94 \text{ с}.$$

После подстановки вычисленных значений расчетная формула (15.22) принимает вид

$$i_A(t) = \left(0,464 + 2,72 \cdot e^{-\frac{t}{0,94}} \right) \cos 314 \cdot t,$$

график построен на рис. 15.6, б.

Ток в обмотке возбуждения при коротком замыкании статорной обмотки изменяется в соответствии с формулой (15.25), в которой ток возбуждения на холостом ходу машины равен $i_{\text{в.х.х}} = 1 \text{ о.е.}$, т. е. $i_{\text{в.х.х}} = 640 \text{ А}$.

Бросок тока в обмотке ротора рассчитывается по формуле (15.24)

$$i_{\text{в0}} = \frac{x_d}{x'_d} E'_d = \frac{2,155}{0,314} 1 = 6,85,$$

тогда

$$\Delta i_{\text{в0}} = i_{\text{в0}} - i_{\text{в.х.х}} = 6,85 - 1 = 5,85 \text{ о.е.},$$

т. е. $\Delta i_{\text{в0}} = 3744 \text{ А}$ - бросок тока в обмотке возбуждения превосходит номинальный ток в 2,3 раза.

График изменения тока в цепи возбуждения по формуле (15.25)

$$i_{\text{в}}(t) = 1 + 5,85 \cdot e^{-\frac{t}{0,94}}$$

построен на рис. 15.7.

§ 15.3. Переходные процессы в цепях ротора и статора генератора при гашении магнитного поля ротора в случае трехфазного короткого замыкания

В случае к.з. в обмотке статора или в цепи до генераторного выключателя необходимо быстро рассеять запас электромагнитной энергии в обмотке ротора, т. е. развозбудить машину. Простой разрыв цепи этой обмотки опасен, так как вследствие громадной скорости исчезновения магнитного потока возникают значительные перенапряжения, определяемые законом электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\psi}{dt}.$$

Поэтому гашение поля осуществляется переключением обмотки возбуждения без разрыва цепи на разрядное сопротивление при машинном возбуждении или на встречно действующую ЭДС при ионном возбуждении (когда игнайтроны переводятся в инверторный режим), или при тиристорном возбуждении (рис. 15.8). Переключение обмотки возбуждения генератора в схеме с разрядным сопротивлением осуществляется очередностью срабатывания контактов автомата гашения поля (АГП): сначала замыкается контакт 1, а затем размыкается контакт 2.

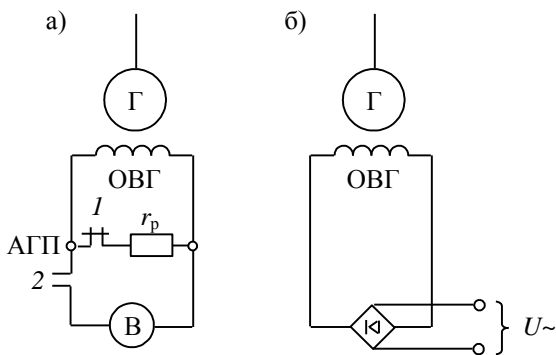


Рис. 15.8. Принципиальная схема гашения поля синхронной машины: а – при машинном возбуждении; б – при тиристорном возбуждении

Основные требования, предъявляемые к устройству гашения поля, формулируются так:

- 1) время гашения поля $t_{\text{гаш}}$ должно быть минимальным;

2) перенапряжение не должно превышать величины, допустимой для изоляции обмотки возбуждения; для запаса надежности принимают

$$U_{\text{доп}} < 0,7U_{\text{исп}},$$

где $U_{\text{исп}}$ - испытательное напряжение, которое зависит от класса изоляции ротора, равно $U_{\text{исп}} = 1500-5000$ В.

Необходимо определить характер переходного процесса при гашении поля, который бы удовлетворял указанным требованиям.

Обращаемся к уравнениям Парка-Горева (14.15) и считаем, что трехфазное короткое замыкание возникает на зажимах статорной обмотки ($u_d = 0$, $u_q = 0$) и пренебрегаем активным сопротивлением этой обмотки ($r_a = 0$).

Последнее условие означает, что при коротком замыкании в обмотке статора имеет место только продольная составляющая тока i_d , а поперечная составляющая отсутствует, т. е. $i_q = 0$, $\psi_q = 0$. Кроме того, следует учесть, что с момента включения АГП обмотка ротора генератора включается на сопротивление гашения поля r_p и отключается от возбудителя, т. е. с этого момента $U_b = 0$. Будем считать, что моменты возникновения к.з., включения обмотки ротора на сопротивление и отключения ее от возбудителя совпадают.

Дифференциальное уравнение для контура тока ротора из (14.15) записывается так

$$T_{d0} \frac{d\psi_b}{dt} + i_b + u_{\text{доп}} = 0, \quad (15.26)$$

где $u_{\text{доп}} = r_p i_b$ - падение напряжения на разрядном сопротивлении АГП.

При этом величина перенапряжения на обмотке возбуждения или, что равноценно, на сопротивлении r_p не должна превосходить выше указанного значения $U_{\text{доп}}$ в течение всего процесса гашения поля. С другой стороны, если обеспечить $U_{\text{доп}} = r_p i_b = \text{const}$, то будет выполняться и первое требование о минимальном времени гашения поля. На этом основании в уравнении (15.26) следует считать, что $r_p i_b = U_{\text{доп}} = \text{const}$.

Очевидно, что это уравнение будет справедливым до момента времени, когда ток i_b станет равным нулю, ибо величина $U_{\text{доп}}$ может существовать только при наличии тока в цепи.

С учетом вышеизложенного уравнения (14.15) запишутся так

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} &= 0; \\ \psi_d &= 0; \\ T_{d0} \frac{d\psi_B}{dt} + i_B + U_{\text{доп}} &= 0; \\ \psi_d &= -x_d i_d + i_B; \\ \psi_B &= -(x_d - x'_d) i_d + i_B. \end{aligned} \right\} \quad (15.27)$$

Решая совместно уравнения относительно тока возбуждения, определим, что

$$\psi_B = -(x_d - x'_d) \frac{i_B}{x_d} + i_B = \frac{x'_d}{x_d} i_B.$$

Следовательно,

$$T_{d0} \frac{x'_d}{x_d} \frac{di_B}{dt} + i_B + U_{\text{доп}} = 0.$$

Величина коэффициента при производной в этом уравнении равна постоянной времени обмотки ротора при короткозамкнутой обмотке статора T'_d (см. формулы (15.15)). Поэтому, представляя полученное уравнение в виде

$$\frac{di_B}{dt} + \alpha i_B = -\alpha U_{\text{доп}},$$

где $\alpha = \frac{1}{T'_d}$, и применяя прямое преобразование Лапласа, имеем

$$I_B(s) = i_B(0) \frac{1}{s + \alpha} - U_{\text{доп}} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)}.$$

Здесь начальное значение тока в обмотке ротора $i_B(0) \equiv i_{B0}$ при коротком замыкании в цепи статора рассчитывается по формуле (15.24).

Обратное \mathcal{L} -преобразование полученного выражения $I_B(s)$ по таблице соответствий 1.1 дает оригинал искомой функции

$$i_B(t) = i_{B0} e^{-\frac{t}{T'_d}} - U_{\text{доп}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \right). \quad (15.28)$$

Полученная формула определяет ту закономерность изменения тока в обмотке ротора, которая обеспечивает оптимальные условия гашения поля: быстроту и отсутствие опасных перенапряжений. График этой зависимости и ее составляющих построен на рис. 15.9. Видно,

что если при гашении поля обеспечить примерно постоянную скорость убывания тока в обмотке ротора, то будут соблюдаться требования к устройству гашения поля.

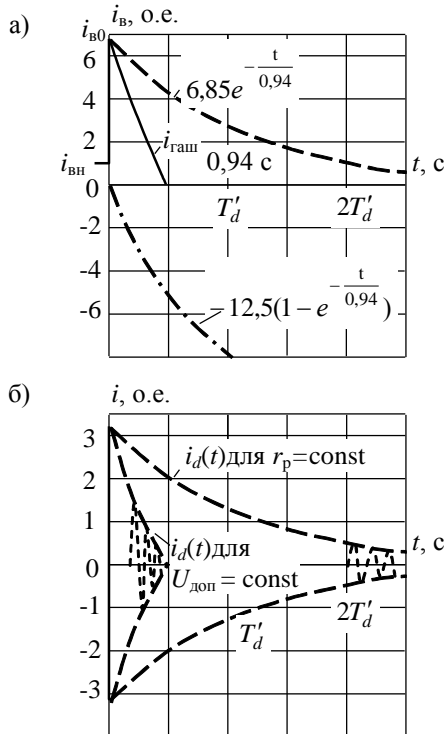


Рис.15.9. Графики изменения тока в обмотках ротора (а) и статора (б) турбогенератора ТВФ-100-2 при гашении поля ($U_{\text{доп}} = 5U_{\text{в.ном}}$)

Подобный график изменения тока в обмотке ротора обеспечивает АГП с дугогасящими пластинами, падение напряжения между которыми при горении дуги сохраняется практически постоянным при изменении тока в широких пределах. Этот способ предложил коллектив инженеров объединения «Электросила» под руководством д.т.н. О.Б. Брона. Принципиальная схема показана на рис. 15.10. В этой схеме при срабатывании АГП контакт размыкается и образуется цепь с горящими дугами между пластинами решетки. Так как падение напряжения на дуге

сохраняется постоянным при широком изменении тока, то требование $U_{\text{доп}} = \text{const}$, а следовательно, и $t_{\text{гаш}} = \text{min}$ удовлетворится.

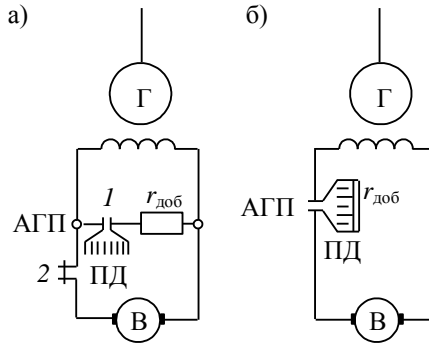


Рис. 15.10. Принципиальные схемы гашения поля синхронной машины при помощи АГП с деионными пластинами (ПД) при параллельном (а) и последовательном (б) включении

Изменение тока в обмотке ротора при гашении поля генератора по схеме рис. 15.8, а описывается выражением (15.28), если считать $U_{\text{доп}} = 0$. График изменения тока будет соответствовать затухающей экспоненте на рис. 15.9, а (верхняя пунктирная кривая).

Для того чтобы узнать, как будет изменяться ток в цепи статора генератора в случае гашения его поля при помощи деионных пластин, необходимо обратиться вновь к системе уравнений Парка-Горева (15.27) и решить их относительно тока статора i_d . Решая совместно эти уравнения, находим

$$i_d(t) = \left[I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{U_{\text{доп}}}{x_d} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \right) \right] \quad (15.29)$$

и ток в фазе статора

$$i_A(t) = \left[I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{U_{\text{доп}}}{x_d} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_d}} \right) \right] \cos \omega_c t. \quad (15.29, \text{а})$$

Сравнивая эту зависимость с (15.28), можно отметить, что ток ротора и ток статора при гашении поля в случае трехфазного короткого замыкания изменяются одинаково. На рис. 15.9, б построен график зависимости (15.29) применительно к параметрам генератора ТВФ-100-2. Пунктирной линией на этом рисунке показан график затухания тока статора в случае гашения поля генератора при помощи омического сопротивления по схеме рис.15.8, а. Видно, что длительность существования тока к.з. в обмотке статора увеличивается примерно в три раза.

Расчет изменения тока в цепи возбуждения генератора ТВФ-100-2 при гашении поля с помощью деионных решеток в случае короткого замыкания на выводах статорной обмотки производится по зависимости (15.28) до значения $i_b = 0$, причем принимается пятикратное допустимое перенапряжение на обмотке возбуждения

$$U_{\text{доп}} = 5U_{\text{в.ном}} = 5 \cdot 270 = 1350 \text{ В,}$$

т. е.

$$U_{\text{доп}} = 12,5 \text{ о.е.}$$

Подставляя полученные значения в расчетную формулу (15.28) имеем

$$i_b(t) = 6,85e^{-\frac{t}{0,94}} - 12,5 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,94}} \right).$$

График, построенный на рис. 15.9, а, показывает, что гашение поля происходит примерно за 0,45 с.

Изменение тока в короткозамкнутой обмотке статора при гашении поля ротора рассчитывается по формуле (15.29, а).

После подстановки численных значений имеем

$$i_A(t) = \left[3,18e^{-\frac{t}{0,94}} - 5,8 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,94}} \right) \right] \cos 314t.$$

Графики изменения огибающих тока в статоре построены на рис. 15.9, б для случая гашения поля при помощи обычного сопротивления и при помощи деионной решетки.

§ 15.4. Переходный процесс в цепи статора генератора при несимметричном коротком замыкании

В соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности (см. §10.1) любое несимметричное короткое замыкание может рассматриваться в качестве трехфазного короткого замыкания, точка которого удалена за дополнительное сопротивление z (или x при $r = 0$).

Величина этого сопротивления определяется видом несимметричного короткого замыкания.

На основании этого правила все расчетные формулы, используемые для расчета трехфазного короткого замыкания, могут быть применены для расчета несимметричных коротких замыканий.

Начальный ток прямой последовательности в индуктивной цепи генератора (сверхпереходная составляющая) рассчитывается по общей формуле (13.29) для генератора с демпферной обмоткой

$$I_{d1}''^{(n)} = \frac{E_q''}{x_d'' + \Delta x^{(n)}}; \quad (15.30)$$

для генератора без демпферной обмотки переходная составляющая

$$I_{d1}'^{(n)} = \frac{E_q'}{x_d' + \Delta x^{(n)}} \quad (15.31)$$

и установившийся ток короткого замыкания

$$I_{d\infty 1}^{(n)} = \frac{E_q}{x_d + \Delta x^{(n)}}. \quad (15.32)$$

В этих формулах:

n – вид короткого замыкания;

$\Delta x^{(1)}$ = $x_2 + x_0$ - для однофазного короткого замыкания;

$\Delta x^{(2)}$ = x_2 - для двухфазного короткого замыкания;

$\Delta x^{(1,1)}$ = $\frac{x_2 x_0}{x_2 + x_0}$ - для двухфазного короткого замыкания на землю.

Реальный ток в основной фазе при данном коротком замыкании определяется модулем $m^{(n)}$ (см. формулу (10.2))

$$I_d''^{(n)} = m^{(n)} I_{d1}''^{(n)}, \quad I_d'^{(n)} = m^{(n)} I_{d1}'^{(n)}, \quad I_{d\infty}^{(n)} = m^{(n)} I_{d\infty 1}^{(n)}. \quad (15.33)$$

При несимметричном коротком замыкании не на выводах генератора, а за дополнительным индуктивным сопротивлением (трансформатора, реактора и т. п.), в знаменателях формул (15.30-15.32) следует учесть, что в сумму сопротивлений прямой последовательности этих дополнительных элементов Σx_1 входит и сопротивление прямой последовательности генератора

$$x''_{d\Sigma 1} = x''_d + \Sigma x_1; \quad x'_{d\Sigma 1} = x'_d + \Sigma x_1; \quad x_{d\Sigma 1} = x_d + \Sigma x_1.$$

Соответственно значение дополнительного сопротивления $\Delta x^{(n)}$ для отдельных видов к.з. вычисляется

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{\Sigma}^{(1)} &= \Sigma x_2 + \Sigma x_0; \\ \Delta x_{\Sigma}^{(2)} &= \Sigma x_2; \\ \Delta x_{\Sigma}^{(1,1)} &= \frac{\Sigma x_2 \Sigma x_0}{\Sigma x_2 + \Sigma x_0}. \end{aligned} \right\} \quad (15.34)$$

Например, для случая двухфазного короткого замыкания за трансформатором блока на выводах высшего напряжения сверхпереходная составляющая прямой последовательности равна

$$I''_{d1}{}^{(2)} = \frac{E''_q}{(x''_d + x_T) + (x_2 + x_T)},$$

и реальный ток в фазе

$$I''_d{}^{(2)} = \sqrt{3} I''_{d1}{}^{(2)}.$$

Ток короткого замыкания в фазе статорной обмотки генератора, имеющего демпферную обмотку, рассчитывается по формуле, подобной (15.22)

$$i_A(t) = \left(I_{d\infty} + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} + \Delta I''_d e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) \cos \omega_c t, \quad (15.35)$$

где $\Delta I'_d = I'_d - I_{d\infty}$ - приращение переходного тока;

$\Delta I''_d = I''_d - I'_d$ - приращение сверхпереходного тока;

$T''_d = \frac{x''_d}{x'_d} T''_{d0}$ - сверхпереходная постоянная контуров по продольной

оси генератора при короткозамкнутой обмотке статора, с;

T''_{d0} - сверхпереходная постоянная времени контуров по продольной оси генератора без нагрузки, с.

Изменение составляющих тока несимметричного короткого замыкания во времени будет зависеть от электромагнитных постоянных

времени переходного процесса, в которых должны быть учтены сопротивления эквивалентных схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, а именно*

$$T_d^{n(n)} = \frac{x_{d\Sigma 1}'' + \Delta x_{\Sigma}^{(n)}}{x_{d\Sigma 1}' + \Delta x_{\Sigma}^{(n)}} T_{d0}'' \quad \text{и} \quad T_d^{(n)} = \frac{x_{d\Sigma 1}' + \Delta x_{\Sigma}^{(n)}}{x_{d\Sigma 1} + \Delta x_{\Sigma}^{(n)}} T_{d0}. \quad (15.36)$$

Изменение периодической составляющей тока короткого замыкания будет описываться зависимостью

$$i_A(t) = \left(I_{d\infty}^{(n)} + \Delta I_d^{(n)} e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} + \Delta I_d^{n(n)} e^{-\frac{t}{T_d^{n(n)}}} \right) \cos \omega_c t, \quad (15.37)$$

где $I_{d\infty}^{(n)}$ - установившийся ток короткого замыкания;

$\Delta I_d^{(n)} = I_d^{(n)} - I_{d\infty}^{(n)}$ - приращение переходной составляющей тока;

$\Delta I_d^{n(n)} = I_d^{n(n)} - I_d^{(n)}$ - приращение сверхпереходной составляющей тока короткого замыкания.

§ 15.5. Аперiodическая составляющая тока при трехфазном коротком замыкании в цепи статора генератора

Для проверки электрооборудования на стойкость к токам короткого замыкания необходимо знать не только изменение периодической составляющей, но и изменение аперiodической составляющей тока короткого замыкания.

Аперiodическая составляющая в общем виде представляется формулой (2.12), однако точное ее изменение определяется уравнениями Парка-Горева, учитывающими электрические параметры всех обмоток генератора.

*Вычисление постоянных времени синхронной машины дано в книгах:

1. Лютер Р.А. Теория переходных режимов синхронных машин с применением операторного анализа. – Л: ГЭИ, 1939.
2. Concordia Charles. «Synchronous machines. Theory an Performance». New York, 1951.
3. Kimbark E.W. Power system stability. V.I. Synchronous machines. New York – London, 1956.
4. Adkins Bernard. «The General Theory of Electrical Machines ». London, 1959.

Расчетная формула этой составляющей в [1] имеет громоздкое выражение, но может быть, как показано ниже, значительно упрощена.

Ток в фазе A при трехфазном коротком замыкании генератора с демпферной обмоткой характеризуется суммой токов [1]

$$i = i_1 + i_2 + i_3,$$

где i_1 - составляющая синхронной частоты (периодическая составляющая); i_2 - составляющая двойной частоты; i_3 - составляющая разностной частоты или составляющая постоянного направления (апериодическая составляющая - i_a).

Апериодическая составляющая описывается формулой, которая после подстановки в нее параметров генератора может быть представлена в таком виде

$$i_a(t) = E \left[\frac{1}{z_d} \sin(\gamma + \theta + \alpha\tau) - \frac{1}{z_q} \cos(\gamma + \theta + \alpha\tau) \right] e^{-\beta\tau},$$

где z_d, z_q, β - функции параметров генератора; E - ЭДС генератора, величина которой зависит от режима последнего; τ - синхронное время; $\alpha = r_B x_B^{-1}$.

Максимальное значение этой составляющей будет для случая совпадения в момент короткого замыкания магнитной оси фазы A статора с продольной осью ротора ($\gamma = 0$) и когда угол между вектором

ЭДС с продольной осью ротора θ равен $\frac{\pi}{2}$

$$i_a(t) = E \left[\frac{1}{z_d} \cos \alpha\tau + \frac{1}{z_q} \sin \alpha\tau \right] e^{-\beta\tau}.$$

В этом выражении величина для первых периодов частоты $\alpha\tau \approx 0$ и поэтому можно принять

$$i_a(t) = \frac{E}{z_d} e^{-\beta\tau}, \quad (15.38)$$

где

$$z_d = \frac{2}{X + X_d + X_q};$$

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x'_d + x'_q}{x'_d x'_q}; & X_d &= \frac{x'_d - x''_d}{x'_d x''_d} \left(\frac{x''_d}{z_{rd}} \right)^2; & X_q &= \frac{x'_q - x''_q}{x'_q x''_q} \left(\frac{x''_q}{z_{rq}} \right)^2; \\ z_{rd} &= \sqrt{r_{rd}^2 + x_{rd}''^2}; & z_{rq} &= \sqrt{r_{rq}^2 + x_{rq}''^2}; \\ \beta &= \frac{r_a}{2} \left(\frac{x''_d + x''_q}{x'_d x'_q} \right)^* \end{aligned} \right\} (15.39)$$

здесь x'_d, x''_d - переходное и сверхпереходное индуктивные сопротивления в продольном контуре статора; x'_q, x''_q - переходное и сверхпереходное индуктивные сопротивления в поперечном контуре статора (причем, $x'_q = x_q$); x_{rd}, x''_{rd} - индуктивные сопротивления продольного контура демпферной обмотки; x_{rq}, x''_{rq} - индуктивные сопротивления поперечного контура демпферной обмотки; r_a, r_{rd}, r_{rq} - активное сопротивление фазы обмотки статора, активные сопротивления продольного и поперечного контуров демпферной обмотки соответственно,

Если синхронное время τ заменить астрономическим $\tau = 314t$ и обозначить постоянную времени затухания аperiodической составляющей

$$T_a = \frac{1}{314\beta}, \quad (15.40)$$

то выражение (15.38) окончательно примет вид

$$i_a(t) = \frac{E}{z_d} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (15.41)$$

где для ненагруженного генератора ЭДС $E = E'_q = E''_q = 1$.

*Коэффициент β в [1] представляется величиной

$$\beta = \frac{r_a}{2} \left(\frac{x'_d + x_q}{x'_d x_q} \right),$$

численное значение которой оказывается меньше примерно в 1,5 раза по сравнению с расчетной (15.39).

По этой формуле рассчитан и построен на рис. 15.11 график изменения аperiodической составляющей для параметров генератора, указанных в [1].

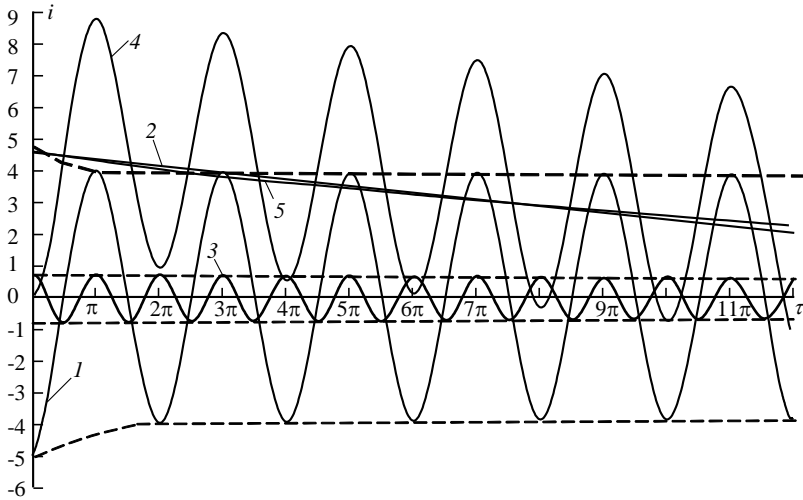


Рис. 15.11. Графики изменения составляющих тока короткого замыкания явнупольсупного ненагруженного генератора [1]:

- 1 - составляющая основной частоты (периодическая);
- 2 - составляющая разностной частоты (аperiodическая);
- 3 - составляющая суммарной (двойной) частоты;
- 4 - полный ток короткого замыкания;
- 5 - аperiodическая составляющая по формуле (15.41)

Следует отметить, что величина β представляет собой

$$\beta = \frac{r_a}{x_2},$$

где x_2 - сопротивление обратной последовательности для генератора с демпферной обмоткой равно

$$x_2 = \frac{2x_d''x_q''}{x_d'' + x_q''};$$

у генератора без демпферных обмоток [1]

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q}.$$

(Сопротивление обратной последовательности генератора в литературе представляется следующими зависимостями*:

$$x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q}, \quad x_2 = \sqrt{x''_d x''_q},$$

$$x_2 = \sqrt{\left(x''_d + \frac{x_0}{2}\right)\left(\frac{x''_q}{2} + \frac{x_0}{2}\right)} - \frac{x_0}{2}, \quad x_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2},$$

из которых на основе сравнительного анализа точности этих формул для конкретных параметров генератора, рекомендуется применять последнее выражение).

Для расчета аperiodической составляющей тока короткого замыкания генератора, который имел нагрузку, ЭДС рассчитывается по формулам (13.10, 13.11), при номинальном напряжении соответственно, для явнополюсного и неявнополюсного генераторов без демпферных обмоток

$$E'_q = \frac{x'_{dH} x_{qH} + r_{qH}^2}{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}; \quad E'_q = \frac{x'_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2}{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}, \quad (15.42)$$

для генераторов с демпферными обмотками, соответственно,

$$E''_q = \frac{x''_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2}{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}; \quad E''_q = \frac{x''_{dH} x_{dH} + r_{aH}^2}{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_{aH}^2}}. \quad (15.43)$$

В этих формулах z_H - величина нагрузки генератора

$$z_H = \sqrt{x_H^2 + r_H^2}$$

(в номинальном режиме $z_H = 1$ и при $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$: $r_H = 0,8$, $x_H = 0,6$)

$$\left. \begin{aligned} x_{dH} &= x_d + x_H; & x_{qH} &= x_q + x_H; & x'_{dH} &= x'_d + x_H; \\ x''_{dH} &= x''_d + x_H; & r_{aH} &= r_a + r_H, \end{aligned} \right\} \quad (15.44)$$

- параметры генератора с учетом сопротивлений нагрузки.

*Concordia Charles. Synchronous Machines. Theory and Performance. New York, 1951.

Ниже помещается расчет аperiodической составляющей тока при трехфазном коротком замыкании в цепи статора явнополюсного генератора с демпферной обмоткой, параметры которого приведены в [1].

Мощность генератора 40 МВ·А при напряжении $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ.

Параметры:

$$\begin{aligned}x_d &= 0,77; & x'_d &= 0,26; & x''_d &= 0,17; & x_q &= x'_q = 0,49; \\x''_q &= 0,26; & x_{rd} &= 0,13; & x''_{rd} &= 0,024; & x_{rq} &= 0,27; \\x''_{rq} &= 0,142; & r_a &= 0,0042; & r_b &= 0,0005; & r_{rd} &= 0,0165; \\& & r_{rq} &= 0,039.\end{aligned}$$

Расчет производится по формуле (15.41) для ненагруженного генератора при $E'' = 1$ и составляющие вычисляются по (15.39)

$$\begin{aligned}X &= 5,88, & X_d &= 1,39, & X_q &= 1,68, \\z_{rd} &= 0,029, & z_{rq} &= 0,147, & z_d &= 0,223, \\& & \beta &= 0,02, & T_a &= 0,159 \text{ с}.\end{aligned}$$

Расчетная формула $i_a(t) = 4,475 e^{-\frac{t}{0,159}}$.

График этой зависимости построен на рис. 15.11. Видно, что график практически совпадает с графиком, вычисленным по полной формуле для аperiodической составляющей тока в [1].

Для этого же генератора, который имел номинальную нагрузку, величина ЭДС E''_q вычисляется по формуле (15.43) и имеет значение $E''_q = 1,094$.

В этом случае расчетная формула имеет вид

$$i_a(t) = 4,9 e^{-\frac{t}{0,159}}.$$

Отсюда следует, что начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания увеличилось в соответствии с увеличением ЭДС на 10 %, но с прежним затуханием во времени

Глава 16

Переходные процессы в синхронном генераторе при его включении в сеть и при параллельной работе с сетью

§ 16.1. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при его включении в сеть методом самосинхронизации до включения возбуждения

Метод самосинхронизации, как известно, заключается в том, что генератор, имеющий над - или подсинхронную частоту вращения и обмотку ротора, замкнутую на разрядное сопротивление, включается в сеть с последующим переключением обмотки ротора на возбудитель. С возрастанием тока возбуждения генератора растет его синхронизирующий момент и, при определенном значении последнего, генератор втягивается в синхронизм.

Электромеханические процессы, связанные с движением ротора генератора под действием вращающих моментов, здесь не рассматриваются.

Электромагнитные переходные процессы при самосинхронизации генератора с сетью исследуются при помощи уравнений Парка-Горева. В данном случае считается, что генератор включается в сеть бесконечной мощности и поэтому напряжение остается неизменным $U = \text{const}$ (рис. 16.1).

При включении генератора в сеть методом самосинхронизации частота вращения ротора в общем случае не совпадает с частотой сети ω_c , однако здесь рассматривается включение генератора для случая совпадения частоты вращения ротора и частоты сети.

Активное сопротивление обмотки статора, как указывалось выше, значительно меньше индуктивного сопротивления и поэтому принимается $r_a = 0$. Иначе говоря, в цепи статора будет индуктивный ток, т. е. продольная составляющая i_d , а поперечная составляющая i_q будет равна нулю, следовательно, будут равны нулю и потокосцепления ψ_q в поперечной оси.

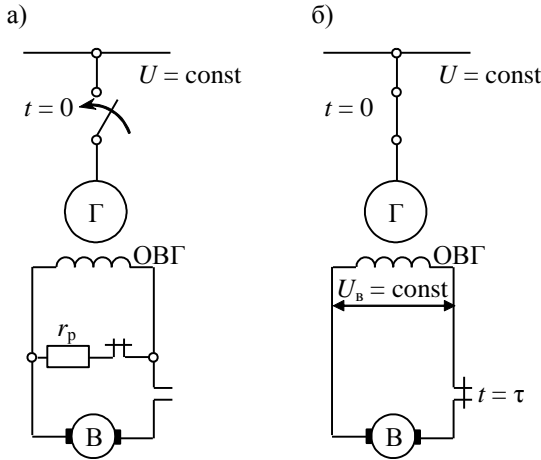


Рис. 16.1. Принципиальная схема включения генератора в сеть методом самосинхронизации а – до включения возбуждения; б – с момента включения возбуждения.

Обмотка возбуждения генератора при включении на параллельную работу методом самосинхронизации отключена от возбудителя ($U_B = 0$) и замкнута на разрядное сопротивление r_p , падение напряжения на котором при протекании тока равно $r_p i_B$, т. е.

$$\frac{d\Psi_B}{dt} + (r_B + r_p)i_B = 0. \quad (16.1)$$

Учитывая принятые условия, уравнения Парка-Горева (14.15) для рассматриваемого переходного процесса можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\Psi_d}{dt} &= -U_d; \\ \Psi_d &= U_q; \\ T_{dp} \frac{d\Psi_B}{dt} + i_B &= 0; \\ \Psi_d &= -x_d i_d + i_B; \\ \Psi_B &= -(x_d - x'_d) i_d + i_B, \end{aligned} \right\} \quad (16.2)$$

где $T_{дп}$ - постоянная величина обмотки ротора, включенной на разрядное сопротивление, с,

$$T_{дп} = \frac{r_{\text{в}}}{r_{\text{в}} + r_{\text{р}}} T_{д0}. \quad (16.3)$$

Решая совместно второе и четвертое уравнение системы (16.2), имеем

$$i_{\text{в}} = U_q + x_d i_d. \quad (16.4)$$

Подставляя это значение $i_{\text{в}}$ в пятое уравнение системы (16.2), определяем

$$\Psi_{\text{в}} = x_d' i_d + U_q. \quad (16.5)$$

Подстановка (16.4) и (16.5) в третье уравнение системы (16.2) дает

$$T_{дп}' \frac{di_d}{dt} + i_d = -\frac{U_q}{x_d},$$

где

$$T_{дп}' = \frac{x_d'}{x_d} T_{дп}, \quad (16.6)$$

- постоянная времени обмотки ротора, включенной на разрядное сопротивление при короткозамкнутой обмотке статора. Обозначая

$$\alpha = \frac{1}{T_{дп}'}, \quad (16.7)$$

окончательно получаем

$$\frac{di_d}{dt} + \alpha i_d = -\alpha \frac{U_q}{x_d}.$$

Решая это уравнение при помощи преобразования Лапласа, имеем

$$I_d(s) = \frac{i_d(0)}{s + \alpha} - \frac{U_q}{x_d} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)}. \quad (16.8)$$

Здесь $i_d(0)$ – начальное значение продольной составляющей тока статора, определяемое исходя из принципа постоянства результирующих потокоцеплений в воздушном зазоре генератора, которые в данном случае равны нулю, так как генератор включается в сеть невозбужденным.

Для момента включения из системы уравнений (16.2) имеем

$$\Psi_{\text{в}}(0) = -(x_d - x_d') i_d(0) + i_{\text{в}}(0) = 0,$$

но поскольку из (16.2) следует

$$i_B(0) - x_d i_d(0) = U_q,$$

то $-(x_d - x'_d)i_d(0) + x_d i_d(0) + U_q = 0$.

Обозначая начальное значение тока статора $i_d(0)$ через I'_d , окончательно получим

$$I'_d = \frac{-U_q}{x'_d}. \quad (16.9)$$

Теперь, применяя к формуле (16.8) обратное \mathcal{L} -преобразование, можно найти изменение тока статора при включении генератора в сеть методом самосинхронизации

$$i_d(t) = I'_d e^{-\alpha t} - \frac{U_q}{x_d} (1 - e^{-\alpha t}). \quad (16.10)$$

Видно, что после окончания переходного процесса, т. е. для $t = \infty$, в цепи статора установится продольный ток

$$I_{d\infty} = -\frac{U_q}{x_d}. \quad (16.11)$$

Следовательно, формулу (16.10) с учетом значения α (16.7) можно представить так

$$i_d(t) = I_{d\infty} + \Delta I_d e^{-\frac{t}{T'_{dp}}}, \quad (16.12)$$

где $\Delta I'_d = I'_d - I_{d\infty}$ - свободная составляющая продольного тока в обмотке статора.

Ток в фазе статора определяется на основе зависимости (14.3) с учетом того, что поперечная составляющая тока здесь отсутствует

$$i_A(t) = \left(I_{d\infty} + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_{dp}}} \right) \cos \omega_c t. \quad (16.13)$$

На рис. 16.2, а по формуле построен график изменения огибающей тока в фазе статора применительно к параметрам генератора ТВФ-100-2 при включении его в сеть методом самосинхронизации.

Изменения тока ротора при самосинхронизации определяются из системы уравнений (16.2).

Решая совместно второе и четвертое уравнения системы (16.2), находим i_d и, подставляя это значение в пятое уравнение (16.2), получаем

$$\psi_B = \frac{x'_d}{x_d} i_B + \frac{x_d - x'_d}{x_d} U_q. \quad (16.14)$$

а) i_d , о.е.

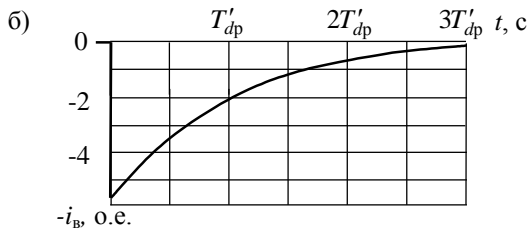
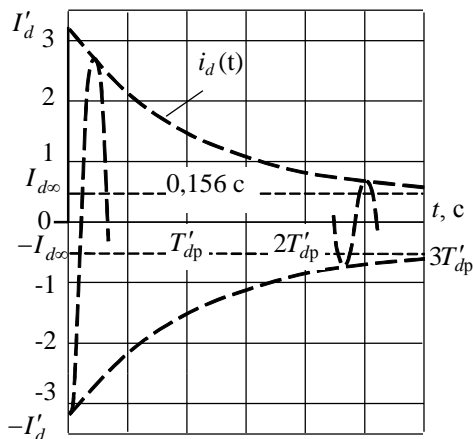


Рис. 16.2. Графики изменения токов в цепях статора (а) и ротора (б) турбогенератора ТВФ-100-2 при включении методом самосинхронизации для случая $\omega = \omega_c$ до включения возбуждения

Подстановка этого выражения в третье уравнение системы (16.2) дает

$$T_{dp} \frac{x'_d}{x_d} \frac{di_B}{dt} + i_B = 0.$$

Применяя к этому уравнению прямое преобразование Лапласа и вводя обозначения (16.6) и (16.7), имеем

$$I_B(s) = \frac{i_B(0)}{s + \alpha}. \quad (16.15)$$

Здесь $i_B(0)$ - начальное значение тока ротора, которое отыскивается, исходя из тех же соображений, что и начальное значение тока статора (16.9). Для момента включения генератора в сеть из формулы (16.14) следует

$$\psi_B(0) = \frac{x'_d}{x_d} i_B(0) + \frac{x_d - x'_d}{x_d} U_q = 0$$

и, отсюда,

$$i_B(0) = i_{B0} = -\frac{x_d - x'_d}{x'_d} U_q. \quad (16.16)$$

Решение уравнения (16.15) по таблице соответствий имеет вид

$$i_B(t) = i_{B0} e^{-\frac{t}{T'_{dp}}}. \quad (16.17)$$

На рис. 16.2, б по этой формуле построен график изменения тока в цепи ротора применительно к параметрам генератора типа ТВФ-100-2 при включении его в сеть методом самосинхронизации до включения возбуждения при условии равенства частоты вращения ротора с частотой сети.

Расчет изменения токов в статоре и роторе генератора при синхронизации его с сетью до включения возбуждения производится по формулам для постоянной частоты вращения ротора, постоянного значения напряжения сети в пренебрежении демпферными обмотками для параметров турбогенератора ТВФ-100-2 (см. табл. 13.1).

Расчет изменения тока статора генератора производится по формуле (16.13). Бросок тока в статоре в момент включения невозбужденного генератора по (16.9) равен

$$I'_d = -\frac{U_q}{x'_d} = -\frac{1}{0,314} = -3,18.$$

Здесь знак «-» означает направления тока в статорную обмотку генератора из сети.

Установившийся ток в цепи статора невозбужденного генератора, потребляемый из сети при синхронной частоте вращения, по формуле (16.11) будет

$$I_{d\infty} = -\frac{U_q}{x_d} = -\frac{1}{2,155} = -0,464,$$

и тогда

$$\Delta I'_d = (I'_d - I_{d\infty}) = -3,18 + 0,464 = -2,72.$$

Постоянная времени обмотки ротора, замкнутой на пятикратное разрядное сопротивление, по формуле (16.3) составляет

$$T_{dp} = \frac{r_B}{r_B + r_p} T_{d0} = \frac{1}{6} 6,45 = 1,07 \text{ с}.$$

Постоянная времени замкнутой на разрядное сопротивление обмотки ротора при включенной обмотке статора в сеть по формуле (16.6) равна

$$T'_{dp} = \frac{x'_d}{x_d} T_{dp} = \frac{0,314}{2,155} 1,07 = 0,156 \text{ с}.$$

Подставляя полученные значения в расчетную формулу, имеем

$$i(t) = - \left(0,464 + 2,72e^{-\frac{t}{0,156}} \right) \cos 314t.$$

График огибающих тока статора рассчитан по этой формуле и построен на рис. 16.2, а. Видно, что генератор, вращаясь с синхронной скоростью без возбуждения, будет потреблять из сети ток, равный 46 % номинального. При наличии скольжения у явнополюсного генератора будут иметь место колебания тока статорного типа биений с частотой скольжения ротора относительно поля статора за счет периодического изменения магнитного сопротивления машины.

Изменения тока в обмотке возбуждения рассчитываются по формуле (16.17), где бросок тока в роторе в момент включения генератора в сеть равен по (16.16)

$$i_{B0} = - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} U_q = - \frac{2,155 - 0,314}{0,314} = -5,85.$$

График изменения тока в роторе построен на рис. 16.2, б по выражению

$$i_B(t) = -5,85e^{-\frac{t}{0,156}}.$$

Видно, что после броска ток в обмотке возбуждения постепенно исчезает, так как ротор вращается «синхронно с сетью». При наличии скольжения в обмотке явнополюсного ротора появляется периодическая составляющая, частота которой равна частоте скольжения.

§ 16.2. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при его включении в сеть методом самосинхронизации с учетом подачи возбуждения

В предыдущем параграфе были рассмотрены переходные процессы в генераторе при включении его в сеть невозбужденным с обмоткой ротора, замкнутой на разрядное сопротивление. Теперь рассматриваются указанные переходные процессы с учетом подачи возбуждения (перевозбуждения) генератору через момент времени τ , с.

Математическая зависимость, описывающая переключение обмотки ротора с разрядного сопротивления на возбудитель, напряжение которого $U_{вм}$ принимается постоянным (см. рис. 16.1) представляется следующим образом:

$$u_B(t) = U_{вм} 1(t - \tau), \quad (16.18)$$

где $1(t - \tau)$ - единичная функция запаздывания

$$1(t - \tau) = \begin{cases} 0 & \text{для } t \leq \tau, \\ 1 & \text{для } t > \tau. \end{cases}$$

Тогда, выражая зависимость (16.18) в относительных единицах (путем деления на базисную величину $U_{вх}$) и подставляя ее в уравнения Парка-Горева (14.15), получим необходимую для анализа систему уравнений.

Однако можно воспользоваться системой уравнений Парка-Горева в предыдущем параграфе, подставляя в правую часть третьего уравнения зависимость (16.18), а именно

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} &= -U_d; \\ \psi_d &= U_q; \\ T_{дп} \frac{d\psi_B}{dt} + i_B &= U_{вм} 1(t - \tau); \\ \psi_d &= -x_d i_d + i_B; \\ \psi_B &= -(x_d - x'_d) i_d + i_B. \end{aligned} \right\} \quad (16.19)$$

Отметим, что принятые ранее условия и допущения остаются прежними: напряжение сети при включении генератора постоянно $U_d = \text{const}$, $U_q = \text{const}$; пренебрегаем активным сопротивлением

обмотки статора, $r_a = 0$; частота вращения ротора совпадает с постоянной частотой сети $\omega = \omega_c$.

Очевидно, постоянная времени T_{dp} до момента времени τ должна определяться по формуле (16.3), а с момента $t = \tau$ - по формуле $T_{d0} = L_b r_b^{-1}$.

Для определения характера изменения тока статора решаем совместно второе, четвертое и пятое равенства системы (16.19) и получаем $i_b = x_d i_d + U_q$, $\psi_b = x_d' i_d + U_q$. После подстановки этих зависимостей в третье уравнение системы (16.19) имеем

$$T_{dp} x_d' \frac{di_d}{dt} + x_d i_d + U_q = U_{bm} 1(t - \tau).$$

Учитывая обозначения (16.6) и (16.7), это уравнение можно преобразовать к такому виду

$$\frac{di_d}{dt} + \alpha i_d = -\alpha \frac{U_q}{x_d} + \alpha \frac{U_{bm}}{x_d} 1(t - \tau).$$

После решения этого уравнения при помощи преобразования Лапласа имеем

$$I_d(s) = \frac{i_d(0)}{s + \alpha} - \frac{U_q}{x_d} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)} + \frac{U_{bm}}{x_d} \frac{\alpha e^{-\tau s}}{s(s + \alpha)},$$

где $i_d(0)$ – начальное значение тока, определяемое по формуле (16.9).

Теперь, применяя обратное \mathcal{L} -преобразование, можно найти

$$i_d(t) = i_{d0} e^{-\alpha t} - \frac{U_q}{x_d} (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{U_{bm}}{x_d} [1 - e^{-\alpha(t-\tau)}] 1(t - \tau). \quad (16.20)$$

Здесь величина $\frac{U_q}{x_d}$ представляет собой ток, рассчитываемый по формуле (16.11).

Важно отметить, что до момента времени $t \leq \tau$, формула изменения тока совпадает с (16.10) и значение α соответствует (16.7); с момента времени $t > \tau$ коэффициент α в (16.20) должен вычисляться для постоянной времени $T_d' = T_{d0} \frac{x_d'}{x_d}$.

По истечении достаточно большого промежутка времени ($t = \infty$) из уравнения (16.20) следует

$$i_d(\infty) = -\frac{U_q}{x_d} + \frac{U_{вм}}{x_d}.$$

Видно, что если возбуждение, поданное генератору $U_{вм}$, выражено в относительных единицах и равно напряжению сети U_q , то ток в цепи статора после окончания переходного процесса отсутствует.

Это соответствует синхронной работе возбужденного генератора с сетью без нагрузки.

На рис. 16.3, а построены графики отдельных слагающих переходного продольного тока i_d , соответствующих членам уравнения (16.20), рассчитанных применительно к параметрам турбогенератора ТВФ-100-2 для случая его возбуждения до напряжения холостого хода.

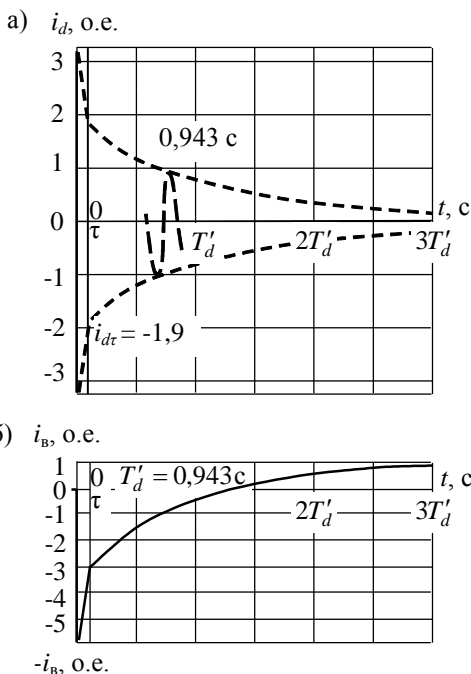


Рис. 16.3. Графики изменения продольного тока, тока в фазе (а) и тока ротора (б) генератора ТВФ-100-2 при включении его в сеть методом самосинхронизации с подачей возбуждения при постоянной синхронной скорости вращения

Переходный ток в фазе статора генератора определяется по формуле (14.3). График изменения амплитуд тока статора i_A соответствует графику тока i_d на рис. 16.3, а.

Изменение тока ротора находим, решая совместно второе, четвертое и пятое уравнение системы (16.19).

Находим выражение ψ_B

$$\psi_B = \frac{x'_d}{x_d} i_B + \frac{x_d - x'_d}{x_d} U_q,$$

после подстановки которого в третье уравнение (16.19), получаем

$$T_{d\phi} \frac{x'_d}{x_d} \frac{di_B}{dt} + i_B = U_{Bm} 1(t - \tau).$$

Учитывая обозначения (16.6) и (16.7), можно написать

$$\frac{di_B}{dt} + \alpha i_B = \alpha U_{Bm} 1(t - \tau).$$

Прямое преобразование Лапласа позволяет получить зависимость

$$I_B(s) = \frac{i_B(0)}{s + \alpha} + U_{Bm} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)} e^{-\tau s}. \quad (16.21)$$

Обратное преобразование Лапласа зависимости (16.21) дает искомую функцию

$$i_B(t) = i_{B0} e^{-\alpha t} + U_{Bm} [1 - e^{-\alpha(t-\tau)} 1(t-\tau)]. \quad (16.22)$$

В этом выражении до момента времени τ изменение тока в обмотке ротора будет соответствовать формуле (16.17) и величиина α вычисляется по (16.7) для постоянной времени (16.6); с момента времени $t > \tau$ величина α вычисляется, как и в (16.20), для постоянной времени T'_d .

Видно из (16.22), что после окончания переходного процесса (для $t = \infty$) величина возбуждения генератора будет соответствовать напряжению на его обмотке ротора

$$i_B(\infty) = U_{Bm}. \quad (16.23)$$

На рис. 16.3, б построен график изменения тока в обмотке ротора применительно к параметрам генератора ТВФ-100-2 при включении его в сеть методом самосинхронизации с подачей возбуждения.

Расчет изменения токов в статоре и роторе генератора при самосинхронизации его с сетью с учетом подачи возбуждения производится для тех же условий, для которых выполняется предыдущий расчет применительно к параметрам турбогенератора ТВФ-100-2. Расчет тока статора производится по формуле (16.20).

Здесь с момента включения генератора в сеть и до момента подачи возбуждения $\tau = 0,1$ с третий член равен нулю, а постоянная времени T равна значению времени обмотки возбуждения, замкнутой на разрядное сопротивление $T_{дп} = 1,07$ с (из предыдущего расчета), а также $\Delta I'_d = -2,72$, $I_{d\infty} = -0,464$. С момента подачи возбуждения, т. е. для $t > \tau$, постоянная времени $T = T'_d = 0,94$ с.

При самосинхронизации генератора с сетью с целью быстрого втягивания последнего в синхронизм ему подается перевозбуждение. В этом примере расчета для получения простого результата принимается, что величина подаваемого возбуждения соответствует возбуждению на холостом ходу машины, т. е. $U_{вм} = 1$ о.е. Тогда значение тока в статоре при этом возбуждении определяется

$$I_{dm} = \frac{U_{вм}}{x_d} = \frac{1}{2,155} = 0,464.$$

После подстановки численных значений расчетная формула принимает вид

$$i(t) = \left\{ -0,464 - 2,72e^{-\frac{t}{T}} + 0,464 \left[1 - e^{-\frac{(t-0,1)1(t-0,1)}{T}} \right] \right\} \cos 314t,$$

где для $t \leq 0,1$ с $1(t-0,1) = 0$, $T = 1,07$ с;
для $t > 0,1$ с $1(t-0,1) = 1$, $T = 0,94$ с.

График огибающих тока в обмотке статора генератора построен по этой зависимости на рис. 16.3, а.

Ток в обмотке возбуждения генератора для этого случая изменяется в соответствии с формулой (16.22), где бросок тока в момент включения в сеть равен $i_{в0} = -5,85$ (из предыдущего расчета), а величина тока $i_{вм}$ соответствует подаваемому напряжению возбуждения $U_{вм} = 1$ о.е., т. е. $U_{вм} = i_{вм} = 1$ о.е.

График изменения тока в роторе построен на рис. 16.3, б по выражению

$$i_B(t) = -5,85 e^{-\frac{t}{T}} + 1 \left[1 - e^{-\frac{(t-0,1) 1(t-0,1)}{T}} \right],$$

где для $t \leq 0,1$ с $1(t-0,1) = 0$, $T = 1,07$ с ;

для $t > 0,1$ с $1(t-0,1) = 1$, $T = 0,94$ с .

Видно, что после броска ток в обмотке возбуждения постепенно уменьшается до величины тока на холостом ходу машины. При самосинхронизации генератора имеют место колебания ротора под действием электромеханических сил, поэтому в цепях обмотки машины появляются дополнительные наведенные токи, однако здесь эти явления не рассматриваются.

§ 16.3. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при форсировке магнитного поля в случае удаленного трехфазного короткого замыкания

Переходные процессы в генераторе при форсировке поля здесь рассматриваются на основе уравнений Парка-Горева при ранее принятых условиях:

1) частота вращения ротора постоянная и равна синхронной частоте вращения $\omega = \omega_c = \text{const}$;

2) активное сопротивление в цепи статора пренебрежимо мало ($r_a = 0$), т. е. в цепи имеется только продольная составляющая тока i_d , а поперечная i_q и, соответственно, потокосцепления ψ_q равны нулю;

3) демпферные обмотки отсутствуют $\psi_{rd} = 0$, $\psi_{rq} = 0$.

Форсировка поля генератора в случае удаленного короткого замыкания (рис. 16.4) обеспечивает быстрое увеличение магнитного поля машины с целью четкого действия релейной защиты и поддержания напряжения на шинах. Устройства форсировки имеют различное исполнение и их применение зависит от вида системы возбуждения генератора.

Системы компаундирования на основе ионных или тиристорных схем, так же, как и форсировочное реле (закорачивающее дополнительное сопротивление в цепи возбуждения), обеспечивают скачкообразное изменение напряжения возбуждения генератора.

Математическая зависимость, описывающая в этом случае форсировку возбуждения генератора, может быть представлена при помощи единичной функции подобно (16.18)

$$u_B(t) = U_{B,H} + \Delta U_B 1(t - \tau), \quad (16.24)$$

где τ - время, учитывающее общее запаздывание в релейной форсировке; $U_{в.н}$ - начальное напряжение возбуждения генератора в момент короткого замыкания; $\Delta U_{в}$ - величина скачкообразного изменения напряжения возбуждения, определяемая по значению кратности форсировки (k), а именно:

$$\Delta U_{в} = U_{вм} - U_{в.н} = (k - 1)U_{в.н},$$

$U_{вм}$ - «потолочное» напряжение возбуждения генератора;

$$U_{вм} = kU_{в.н}.$$

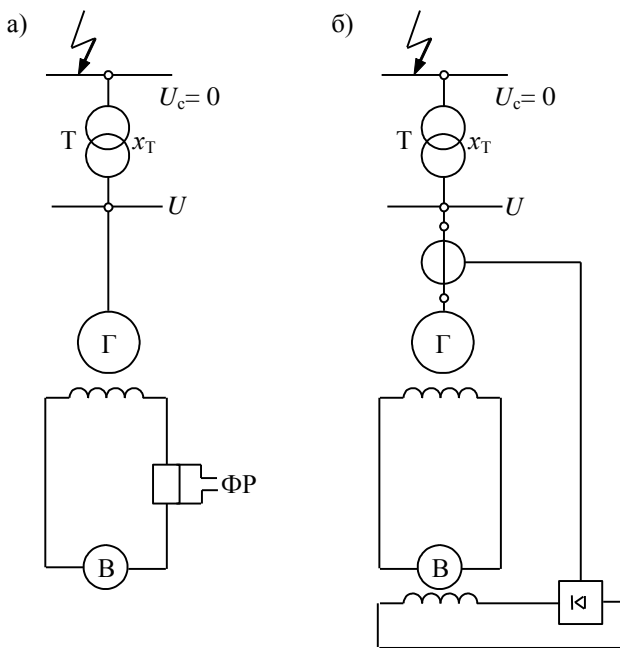


Рис. 16.4. Принципиальная схема электрических соединений для рассмотрения процессов при форсировке поля генератора в случае применения реле форсировки (а) или в случае схемы компаундирования (б)

На рис. 16.5, а показан график зависимости (16.24).

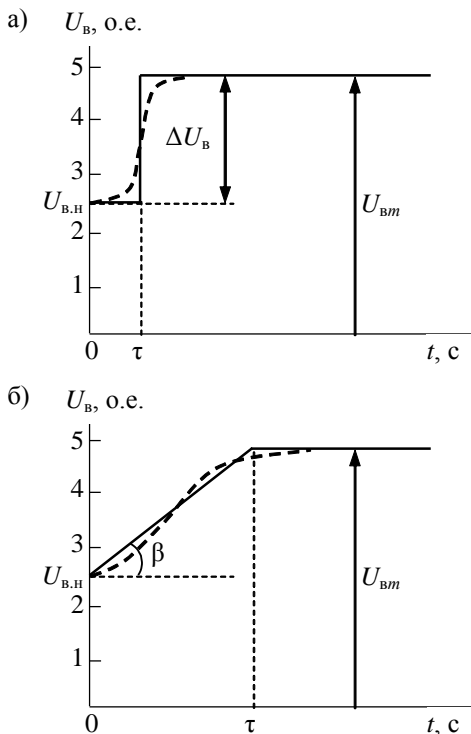


Рис. 16.5. График изменения напряжения возбуждения генератора при форсировке поля в режиме короткого замыкания для ионного (а) и машинного (б) возбуждения

Для машинной системы возбуждения с компаундированием форсировка напряжения возбуждения обычно представляется в виде экспоненциальной зависимости

$$u_B(t) = U_{B.H} + \Delta U_B \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right).$$

Однако более удобной и точной зависимостью может быть функция, показанная на рис. 16.5, б

$$u_B(t) = U_{B.H} + kt - k(t - \tau) 1(t - \tau), \quad (16.24, а)$$

где $k = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta U_B}{\tau}$ - угловой коэффициент; τ - время достижения

напряжением возбуждения максимального значения, с.

При удаленном трехфазном коротком замыкании напряжение в точке к.з. будет равно нулю, и поэтому на зажимах машины, в соответствии с рис. 16.4, имеем $U = x_T i$, где x_T - внешнее сопротивление (сопротивление трансформатора) в цепи короткого замыкания.

Для составляющих в осях d и q с учетом условия $i_q = 0$ получим (см. рис. 13.3)

$$\left. \begin{aligned} U_d = x_T i_q = 0; \\ U_q = x_T i_d. \end{aligned} \right\} \quad (16.25)$$

Выражения (16.24) и (16.25) в системе относительных единиц сохраняют свой вид и поэтому могут быть подставлены без изменения в уравнения Парка-Горева (14.15), отражающие переходный процесс генератора при коротком замыкании для случая «релейной» форсировки

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\Psi_d}{dt} &= 0; \\ \Psi_d &= x_T i_d = u_q; \\ T_{d0} \frac{d\Psi_B}{dt} + i_B &= U_{B.H} + \Delta U_B \cdot 1(t - \tau); \\ \Psi_d &= -x_d i_d + i_B; \\ \Psi_B &= -(x_d - x'_d) i_d + i_B. \end{aligned} \right\} \quad (16.26)$$

Изменения тока статора найдем, решая совместно второе, четвертое и пятое равенства системы (16.26). Получаем

$$i_B = (x_d + x_T) i_d = x_{d\Gamma} i_d, \quad \Psi_B = (x'_d + x_T) i_d = x'_{d\Gamma} i_d.$$

После подстановки этих выражений в третье уравнение (16.26) можно записать

$$T_{d0} x'_{d\Gamma} \frac{di_d}{dt} + x_{d\Gamma} i_d = U_{B.H} + \Delta U_B \cdot 1(t - \tau).$$

Это дифференциальное уравнение после деления всех членов на $T_{d0} x'_{d\Gamma}$ представится

$$\frac{di_d}{dt} + \alpha i_d = \alpha \frac{U_{B.H}}{x_{d\Gamma}} + \alpha \frac{\Delta U_B}{x_{d\Gamma}} \cdot 1(t - \tau), \quad (16.27)$$

где
$$\alpha = \frac{1}{T'_{d\Gamma}} \quad \text{и} \quad T'_{d\Gamma} = T_{d0} \frac{x'_{d\Gamma}}{x_{d\Gamma}}, \quad (16.28)$$

$T'_{dГ}$ - постоянная времени обмотки ротора при замкнутой обмотке статора через внешнее сопротивление накоротко.

Прямое преобразование Лапласа (16.27) дает равенство

$$I_d(s) = \frac{i_d(0)}{s + \alpha} + \frac{U_{в.н}}{x_{dГ}} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)} + \frac{\Delta U_{в}}{x_{dГ}} \frac{\alpha e^{-\tau s}}{s(s + \alpha)}. \quad (16.29)$$

Здесь $i_d(0)$ - начальное значение тока короткого замыкания в цепи статора генератора, рассчитываемое по формуле

$$i_d(0) \equiv I'_d = \frac{E'_q}{x'_{dГ}}. \quad (16.30)$$

После применения к формуле (16.29) обратного преобразования Лапласа по таблице соответствий 1.1 получаем

$$i_d(t) = I'_d e^{-\alpha t} + \frac{U_{в.н}}{x_{dГ}} (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{\Delta U_{в}}{x_{dГ}} [1 - e^{-\alpha(t-\tau)} 1(t-\tau)]. \quad (16.31)$$

По окончании переходного процесса, как следует из этого выражения для $t = \infty$, в цепи устанавливается ток $i_d(\infty)$, включающий в себя две составляющие

$$i_d(\infty) \equiv I_{d\infty} = \frac{U_{в.н}}{x_{dГ}} + \frac{\Delta U_{в}}{x_{dГ}}.$$

Первая из них соответствует току до нарушения режима

$$I_{dн} = \frac{U_{в.н}}{x_{dГ}}, \quad (16.32)$$

а вторая – приращению тока статора, обусловленного форсировкой поля

$$\Delta I_{d\phi} = \frac{\Delta U_{в}}{x_{dГ}}. \quad (16.33)$$

Таким образом, формула (16.31) может быть записана следующим образом:

$$i_d(t) = I_{dн} + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_{dГ}}} + \Delta I_{d\phi} \left[1 - e^{-\frac{1}{T'_{dГ}}(t-\tau)} 1(t-\tau) \right]. \quad (16.34)$$

Ток в фазе статора определяется по формуле (14.3).

Для случая машинного возбуждения с компаундированием система уравнений Парка-Горева будет подобна системе (16.26), но в третьем уравнении вместо правой части будет записано выражение (16.24, а).

В результате преобразований, аналогичных предыдущим, выражение тока будет иметь вид

$$i_d(t) = I_{dн} + \Delta I'_d e^{-\frac{t}{T'_{dГ}}} + \frac{k}{x_{dГ}} [t - (t - \tau) 1(t - \tau)] + \frac{k}{x_{dГ}} T'_{dГ} \left[e^{-\frac{t}{T'_{dГ}}} - e^{-\frac{t}{T'_{dГ}}(t - \tau) 1(t - \tau)} \right]. \quad (16.35)$$

Графики изменения продольного тока статора по формулам (16.34) и (16.35) применительно к параметрам турбогенератора ТВВ-200-2 построены на рис 16.6.

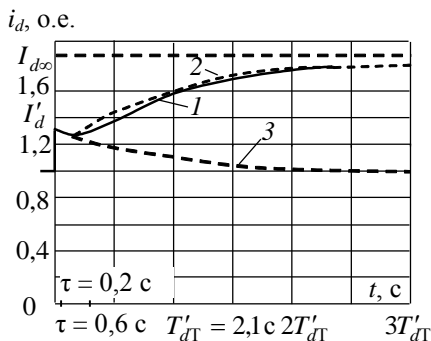


Рис. 16.6. Графики изменения продольного тока статора турбогенератора ТВВ-200-2 при удаленном коротком замыкании и форсировке поля - для машинного возбуждения (1); для ионного возбуждения (2) и без форсировки поля (3)

Изменение тока ротора определяется следующим образом.

Совместное решение второго, четвертого и пятого равенств (16.26) дает зависимость

$$\Psi_B = \frac{x'_{dГ}}{x_{dГ}} i_B,$$

подстановка которой в третье уравнение (16.26) позволяет получить следующее дифференциальное уравнение:

$$T_{d0} \frac{x'_{d\Gamma}}{x_{d\Gamma}} \frac{di_B}{dt} + i_B = U_{B.H} + \Delta U_B 1(t - \tau). \quad (16.36)$$

После алгебраических преобразований с учетом условных обозначений (16.28) можно записать

$$\frac{di_B}{dt} + \alpha i_B = \alpha U_{B.H} + \alpha \Delta U_B 1(t - \tau).$$

Прямое преобразование Лапласа позволяет получить

$$I_B(s) = \frac{i_B(0)}{s + \alpha} + U_{B.H} \frac{\alpha}{s(s + \alpha)} + \Delta U_B \frac{\alpha}{s(s + \alpha)} e^{-\tau s}. \quad (16.37)$$

Здесь $i_B(0) \equiv i_{B0}$ - начальное значение тока возбуждения в момент короткого замыкания, определяемое из уравнений (16.26) подобно формуле (15.24) для режима к.з. без форсировки

$$i_{B0} = \frac{x_{d\Gamma}}{x'_{d\Gamma}} E'_q. \quad (16.38)$$

Значение напряжения возбуждения $U_{B.H}$ в относительных единицах соответствует току возбуждения $i_{B.H}$ до короткого замыкания (т. е. $U_{B.H} \equiv i_{B.H}$), а величина напряжения ΔU_B определяет собой приращение тока $\Delta i_{B,\Phi}$ в обмотке ротора за счет форсировки поля, т. е. $\Delta U_B \equiv \Delta i_{B,\Phi}$.

Обратное \mathcal{L} -преобразование (16.37) дает зависимость $i_B(t)$, которая с подстановкой значения α из формулы (16.28) запишется так

$$i_B(t) = i_{B.H} + \Delta i_B e^{-\frac{t}{T'_{d\Gamma}}} + \Delta i_{B,\Phi} \left[1 - e^{-\frac{1}{T'_{d\Gamma}}(t-\tau)} 1(t-\tau) \right], \quad (16.39)$$

где $\Delta i_B = i_{B0} - i_{B.H}$ - приращение тока возбуждения генератора в начальный момент короткого замыкания.

График изменения тока ротора по формуле (16.39) применительно к параметрам генератора ТВВ-200-2 построен на рис. 16.7.

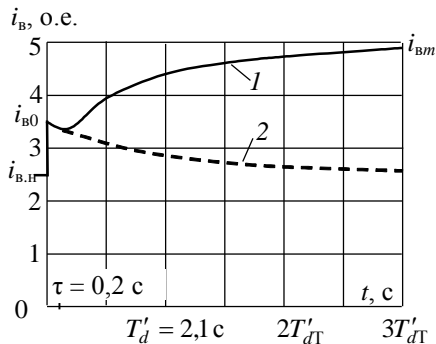


Рис. 16.7. График изменения тока ротора турбогенератора ТВВ-200-2 при удаленном коротком замыкании и форсировке поля для ионного возбуждения (1) и без форсировки поля (2)

Расчет изменения токов в статоре и роторе при форсировке поля в случае удаленного трехфазного короткого замыкания производится для принятых ранее допущений применительно к параметрам турбогенератора ТВВ-200-2 мощностью 200 МВт (см. табл. 13.1).

Расчет изменения тока статора генератора производится по формуле (16.34). Принимается, что короткое замыкание происходит за трансформатором на стороне высшего напряжения. Сопротивление обмоток трансформатора, приведенных к параметрами генератора, равно $x_T = 0,5$ о.е. Принимается, что короткое замыкание происходит при номинальной нагрузке генератора, поэтому величина ЭДС определяется по формуле (13.11).

$$E'_{qH} = \frac{x'_{dH} x_{dH} + r_H^2}{z_H \sqrt{x_{dH}^2 + r_H^2}} = \frac{0,8 \cdot 2,63 + 0,85^2}{1 \sqrt{2,63^2 + 0,85^2}} = 1,02.$$

Здесь параметры принимаются и рассчитываются по табл. 13.1

$$x'_{dH} = x'_d + x_H = 0,27 + 0,53 = 0,8;$$

$$x_{dH} = x_d + x_H = 2,1 + 0,53 = 2,63;$$

$$r_H = 0,85 \text{ (так как } \cos \varphi_H = 0,85);$$

$$x_H = 0,53 \text{ (так как } \sin \varphi_H = 0,53).$$

Начальный переходный ток по формуле (16.30)

$$I'_d = \frac{E'_{qH}}{x'_{dT}} = \frac{1,02}{0,77} = 1,32 \text{ о.е. ,}$$

т. е.

$$I'_d = 1,32I_{\text{ном}} = 11,4 \text{ кА},$$

где

$$x'_{d\Gamma} = x'_d + x_{\Gamma} = 0,27 + 0,5 = 0,77.$$

Ток в обмотке статора при к.з. за обмоткой трансформатора при номинальном возбуждении $U_{\text{в.н}} = 2,5$ о.е. по формуле (16.32) будет

$$I_{d\infty} = \frac{U_{\text{в.н}}}{x_d + x_{\Gamma}} = \frac{2,5}{2,6} = 0,96.$$

Тогда

$$\Delta I'_d = I'_d - I_{d\infty} = 1,32 - 0,96 = 0,36.$$

Принимается, что имеет место скачкообразная форсировка возбуждения по формуле (16.24) с запаздыванием $\tau = 0,2$ с.

Форсировочная способность возбудителя $U_{\text{вм}} = 1,83 \cdot 2,5 = 4,6$. Следовательно, приращение напряжения относительно номинальной величины при форсировке поля

$$\Delta U_{\text{в.ф}} = U_{\text{вм}} - U_{\text{в.н}} = 4,6 - 2,5 = 2,1.$$

При такой величине форсировки составляющая тока в обмотке статора по формуле (16.33) составит

$$\Delta I_{d\phi} = \frac{\Delta U_{\text{в.ф}}}{x_{d\Gamma}} = \frac{2,1}{2,6} = 0,81.$$

Постоянная времени обмотки ротора при замкнутой через сопротивление трансформатора обмотке статора по формуле (16.28) будет

$$T'_{d\Gamma} = \frac{x'_{d\Gamma}}{x_{d\Gamma}} T_{d0} = \frac{0,77}{2,6} 7 = 2,1 \text{ с}.$$

После подстановки численных значений величин расчетная формула принимает вид

$$i_d(t) = \left\{ 0,96 + 0,36 e^{-\frac{t}{2,1}} + 0,81 \left[1 - e^{-\frac{(t-0,2) 1(t-0,2)}{2,1}} \right] \right\} \cos 314t,$$

где для $t \leq 0,2$ с $1(t-0,2) = 0$,

для $t > 0,2$ с $1(t-0,2) = 1$.

График огибающих тока статора рассчитан по этой формуле и построен на рис. 16.6.

Видно, что сначала ток короткого замыкания генератора вследствие реакции статора уменьшается, а затем под действием форсировки магнитного поля ротора возрастает. Это явление характерно для

удаленного короткого замыкания генератора, снабженного устройством форсировки возбуждения. Изменения тока в обмотке возбуждения рассчитываются по формуле (16.39). Бросок тока в обмотке возбуждения в момент к.з. генератора по формуле (16.38)

$$i_{в0} = \frac{x_{dГ}}{x'_{dГ}} E'_q = \frac{2,6}{0,772} 1,02 = 3,4,$$

и тогда

$$\Delta i_{в} = i_{в0} - i_{в.н} = 3,4 - 2,5 = 0,9.$$

Составляющая тока возбуждения при форсировке поля соответствует величине

$$\Delta U_{в.ф} = 2,1, \text{ т.е. } \Delta i_{в.ф} = 2,1.$$

После подстановки численных значений расчетная формула запишется так

$$i_{в}(t) = 2,5 + 0,9e^{-\frac{t}{2,1}} + 2,1 \left[1 - e^{-\frac{(t-0,2)}{2,1}} \right].$$

График этой зависимости, построенный на рис. 16.7, иллюстрирует характер изменения тока в обмотке ротора: после броска ток начинает затухать, но затем, поддержанный форсировкой, возрастает до максимального значения. Изменение напряжения на выводах генератора рассчитывается по формуле (16.25)

$$U_A(t) = x_T i_A(t).$$

§ 16.4. Переходные процессы в цепях ротора и статора генератора при внезапном отключении от сети (при сбросе нагрузки)

В случае внезапного отключения генератора от сети или при внезапном сбросе нагрузки нарушается равновесие электромагнитных сил и электромагнитных моментов в машине.

Вследствие этого на зажимах статора возникает «заброс» напряжения, а ротор начинает ускоряться. В этом параграфе будет рассмотрен электромагнитный переходный процесс гидрогенератора, ротор которого имеет большой момент инерции и поэтому частота вращения его сохраняется достаточно длительное время на прежнем уровне. В этом случае электромагнитный переходный процесс можно рассматривать при постоянной частоте вращения ротора генератора.

Будем считать, как и прежде, что демпферные обмотки отсутствуют, а напряжение возбуждения сохраняется постоянным. Эти принимаемые допущения в обозначениях уравнений Парка-Горева запишутся так

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} = \omega_c = \text{const}, \quad \psi_{rd} = 0, \quad \psi_{rq} = 0, \\ i_{rd} = 0, \quad i_{rq} = 0, \quad U_B = \text{const}. \end{aligned} \quad (16.40)$$

С момента отключения генератора от сети в обмотке статора ток равен нулю, т. е. $i_d = 0$, $i_q = 0$, $\psi_q = 0$.

Уравнения Парка-Горева (14.15) с учетом вышеуказанных условий можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} &= -u_d; \\ \psi_d &= u_q; \\ T_{d0} \frac{d\psi_B}{dt} + i_B &= U_B; \\ \psi_d &= \psi_B = i_B. \end{aligned} \right\} \quad (16.41)$$

Изменение тока ротора находим на основании третьего уравнения системы (16.41) с учетом равенства $\psi_B = i_B$

$$T_{d0} \frac{di_B}{dt} + i_B = U_B.$$

Разделив это уравнение на T_{d0} и обозначив $\frac{1}{T_{d0}} = \alpha$, можно после преобразования по Лапласу получить

$$I_B(s) = \frac{i_B(0)}{s + \alpha} + \frac{\alpha U_B}{s(s + \alpha)}. \quad (16.42)$$

Здесь $i_B(0)$ - начальное значение тока в роторе, которое может быть определено, как и прежде, на основе принципа постоянства результирующих потокоцеплений машины в момент нарушения режима. До отключения статора от сети потокоцепления обмоток статора и ротора с учетом нагрузки определяются равенствами из системы (14.15)

$$\left. \begin{aligned} \psi_{dH} &= -x_d i_{dH} + i_{B,H}; \\ \psi_{B,H} &= -(x_d - x'_d) i_{dH} + i_{B,H}. \end{aligned} \right\} \quad (16.43)$$

При этом напряжение U_{qH} в установившемся режиме, как видно из формул (16.41), соответствует потокоцеплениям ψ_{dH} .

Тогда на основании равенств (16.43) можно записать

$$\psi_{B,H} = \frac{x'_d i_{B,H} + (x_d - x'_d) U_{qH}}{x_d}. \quad (16.44)$$

В момент отключения обмотки статора эти результирующие потокоцепления машины остаются постоянными $\psi_B(0) = \psi_{B.H} = \text{const}$ и так как из системы (16.41) следует, что $\psi_B(0) = i_B(0)$, то $i_B(0) = \psi_{B.H} = i_{B0}$.

Применяя обратное \mathcal{L} -преобразование к формуле (16.42) и учитывая $i_B(0) \equiv i_{B0}$, получаем

$$i_B(t) = i_{B0} e^{-\frac{t}{T_{d0}}} + U_B \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{d0}}} \right). \quad (16.45)$$

Здесь для $t=0$ $i_B(0) = i_{B0}$, а для $t=\infty$ $i_B(\infty) = U_B$, т. е. установившийся ток ротора соответствует напряжению возбуждения. Если обозначить $i_B(\infty) = i_{B.y}$, то

$$i_B(t) = i_{B.y} + \Delta i_B e^{-\frac{t}{T_{d0}}}, \quad (16.46)$$

где $\Delta i_B = i_{B0} - i_{B.y}$ - приращение тока ротора в момент нарушения режима.

Изменение напряжения статора находим из системы уравнений (16.41). Следует, что $U_q = i_B$, и поэтому, учитывая формулу (16.46), получаем

$$U_q(t) = U_y + \Delta U e^{-\frac{t}{T_{d0}}}. \quad (16.47)$$

Из двух первых уравнений системы (16.41) вытекает, что

$$U_d = -\frac{1}{\omega_{\text{НОМ}}} \frac{dU_q}{dt},$$

и поэтому

$$U_d(t) = \frac{1}{\omega_{\text{НОМ}}} \frac{\Delta i_B}{T_{d0}} e^{-\frac{t}{T_{d0}}}. \quad (16.48)$$

Сопоставляя коэффициенты формул (16.47) и (16.48), видим, что в последнем равенстве значение коэффициента в 1500-2500 раз меньше, чем в первом выражении (так как $\omega_{\text{НОМ}} = 314 \text{ c}^{-1}$, $T_{d0} = 5..8 \text{ c}$). Следовательно, можно принять $U_d = 0$ и считать, что напряжение статора генератора соответствует напряжению $U_q(t)$, т. е.

$$U(t) = \left(i_{B,y} + \Delta i_B e^{-\frac{t}{T_{d0}}} \right) \sin \omega t. \quad (16.49)$$

Графики изменения тока ротора и напряжения на зажимах статора применительно к параметрам гидрогенератора СВ-1500/200-88 мощностью 115 МВт при отключении от сети, «сбросе» номинальной нагрузки построены на рис. 16.8.

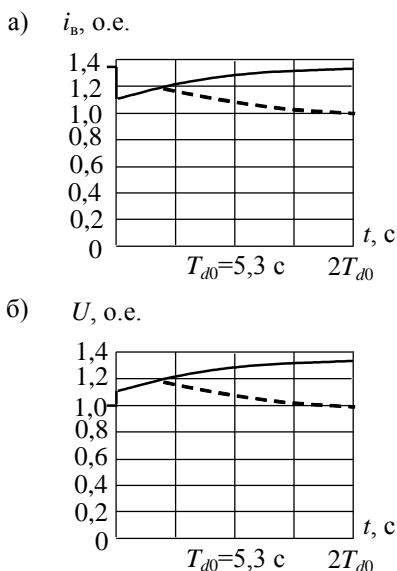


Рис. 16.8. Графики изменения тока ротора (а) и огибающих амплитуд напряжения на зажимах статора (б) гидрогенератора СВ-1500/200-88 при отключении от сети, «сбросе» номинальной нагрузки (пунктирные графики – действие АРВ)

Расчет изменения тока ротора и напряжения статора генератора при внезапном отключении от сети (при «сбросе» нагрузки) производится для постоянной величины возбуждения, в пренебрежении влиянием демпферных обмоток. Расчет проводится применительно к параметрам гидрогенератора СВ-1500/200-88 мощностью 115 МВт (см. табл. 13.1).

Расчет изменения тока в обмотке ротора производится по формуле (16.46). Принимается, что отключение статора генератора от сети происходит при номинальной нагрузке, поэтому величина ЭДС или в относительных единицах равная ей величина тока возбуждения, сохраняющаяся постоянной (по условию задачи), рассчитывается по формуле (13.7)

$$i_{в.н} = i_{в.у} = E_{qн} = \frac{x_{dн}x_{qн} + r_{н}^2}{z_{н}\sqrt{x_{qн}^2 + r_{н}^2}} U = \frac{1,05 \cdot 0,86 + 0,85^2}{1\sqrt{0,86^2 + 0,85^2}} = 1,35.$$

Здесь параметры принимаются по табл.13.1

$$x_{dн} = x_d + x_{н} = 0,52 + 0,53 = 1,05;$$

$$x_{qн} = x_q + x_{н} = 0,332 + 0,53 = 0,86;$$

$$r_{н} = 0,85 \quad (\text{так как } \cos \varphi = 0,85);$$

$$x_{н} = 0,53 \quad (\text{так как } \sin \varphi = 0,53).$$

В момент отключения статора от сети ток в обмотке ротора по формуле (16.44) равен

$$i_{в0} = \frac{x'_d i_{в.н} + (x_d - x'_d) U_{qн}}{x_d} = \frac{0,2 \cdot 1,35 + 0,32 \cdot 0,94}{0,52} = 1,13,$$

(здесь $U_{qн}$ из рис. 13.5, б) и тогда

$$\Delta i_{в} = i_{в0} - i_{в.у} = 1,13 - 1,35 = -0,22.$$

После подстановки численных значений расчетная формула (16.46) принимает вид

$$i_{в}(t) = 1,35 - 0,22e^{-\frac{t}{5,3}}.$$

График этой зависимости построен на рис. 16.8, а.

Изменение напряжения статора рассчитывается по формуле (16.47), где численные значения соответствуют следующим величинам:

$$U_y = i_{в.у} = 1,35, \quad U_0 = i_{в0} = 1,13;$$

$$\Delta U = U_0 - U_y = 1,13 - 1,35 = -0,22.$$

Величина $U_0 = 1,13$ - «заброс» напряжения на выводах статора в первый момент после отключения нагрузки; $U_y = 1,35$ тоже после окончания переходного процесса.

График огибающих амплитуд напряжения, рассчитанный по зависимости

$$U(t) = \left(1,35 - 0,22e^{-\frac{t}{5,3}} \right) \sin 314t ,$$

построен на рис. 16.8, б. Видно, что в первый момент сброса нагрузки напряжение скачком возрастает, а ток в роторе «проваливается» на 13 %. В дальнейшем изменение напряжения статора и тока ротора у генератора будет действием АРВ ограничиваться и приводиться к значениям, соответствующим режиму холостого хода генератора.

Скачкообразное изменение напряжения статора обусловлено внезапным «освобождением» электромагнитной энергии вследствие внезапного исчезновения тока статора (исчезновения размагничивающей реакции статора), «провал» же тока в цепи ротора обусловлен внезапным появлением свободной составляющей тока, встречнонаправленного току возбуждения. Для точной оценки «скачка» напряжения при «сбросе» нагрузки следует учесть насыщение стали машины (см. рис. 13.4).

§ 16.5. Переходный процесс при включении генератора на параллельную работу с генератором соизмеримой мощности

Операция включения синхронных генераторов на параллельную работу весьма сложна и ответственна. Последствием неправильного включения генератора в сеть в лучшем случае может быть обесточивание шин электростанции, а при известных условиях - повреждение коммутационной аппаратуры и генератора.

Поэтому синхронизации генераторов уделяется большое внимание как при проектировании, так и при эксплуатации автономных электростанций переменного тока.

Применяются три способа синхронизации при включении генераторов на параллельную работу:

1) точная синхронизация, при которой до включения генератора на шины электростанции его напряжение и частота устанавливаются равными напряжению и частоте сети; в момент совпадения фаз напряжений сети и генератора последний включается в сеть;

2) самосинхронизация, при которой до включения генератора на шины электростанции его обмотка возбуждения замкнута на разрядное сопротивление; частота вращения генератора устанавливается

приблизительно равной частоте сети и, без соблюдения условия совпадения фаз, генератор включается в сеть с последующим возбуждением;

3) синхронизация через индуктивное сопротивление, при которой генератор с напряжением и частотой, близкими к напряжению и частоте сети, включается в сеть без соблюдения условия совпадения фаз.

Эти методы имеют свои достоинства и недостатки, и потому применение того или другого из них зависит от назначения электростанции, мощности генераторов, требований к стабильности напряжения и частоты сети и т. д.

Способ точной синхронизации при включении генератора на параллельную работу требует нескольких минут на производство операций при соответствующем навыке обслуживающего персонала. Сложность операций при этом методе усугубляется тем, что синхронизация выполняется оператором при колебаниях напряжения и частоты сети, обусловленных включением и отключением электроприводов, которые производятся без ведома оператора, синхронизирующего генераторы. Неточное включение генераторов может привести к аварийным последствиям. Автоматический синхронизатор целесообразно применять при чрезвычайно сложной схеме, однако при колебаниях нагрузки и частоты сети автоматический синхронизатор заставляет первичный двигатель подключаемого генератора следовать за колебаниями частоты сети, и требуется достаточно длительное время, чтобы по мере затухания этих колебаний произошла синхронизация. Другой причиной, затрудняющей применение автоматической синхронизации, может быть склонность регуляторов скорости вращения первичного двигателя на его холостом ходу к незатухающим колебаниям.

Метод самосинхронизации генераторов электростанций позволяет резко сократить продолжительность операции включения генераторов на параллельную работу, причем условия включения настолько упрощаются, что эта операция не требует персонала высокой квалификации. Способ самосинхронизации требует только одного условия: разница в скорости вращения генераторов не должна превышать 2-3 Гц. Утомительные и продолжительные операции по точной подгонке напряжений, частот и фаз напряжений генератора и сети отпадают.

Недостатком метода самосинхронизации генераторов является то, что включение генератора сопровождается снижением напряжения на шинах электростанции и броском тока в цепи генератора. При генераторах равной мощности снижение напряжения может достигать 35-40 %, а величина пика тока - 1,5-4-кратной величины номинальных значений.

Метод синхронизации генератора с шинами электростанции через индуктивное сопротивление (метод так называемой грубой синхронизации) сразу привлек внимание специалистов своими достоинствами: простотой операций, надежностью безаварийного включения. Операции включения генераторов на параллельную работу в этом случае производят в такой последовательности: генератор приводится во вращение и возбуждается, затем по достижении его частотой и напряжением околосинхронных значений, приблизительно равных частоте и напряжению шин, генератор подключается через реактор на шины. Как и при методе самосинхронизации, окончательная синхронизация генератора с сетью происходит сама по себе благодаря создаваемой через сопротивление электрической связи генератора с сетью.

Этот способ при правильно выбранном сопротивлении обеспечивает надежную синхронизацию генераторов, предотвращая случайное неточное включение генератора в сеть. Генератор может подключаться к шинам через реактор в любой момент времени, включая момент «противофазы» напряжений генератора и сети. Оператор освобождается от чрезвычайно ответственной операции - синхронизации машин, так как в этом случае происходит их самосинхронизация через демпферный элемент - активно-индуктивное сопротивление. Самосинхронизация происходит в течение 2-5 с, после чего синхронно работающий генератор может быть включен непосредственно на шины электростанции путем шунтирования реактора.

Применение способа синхронизации генераторов через реактор облегчает автоматизацию ввода любого генератора электростанции в работу, ибо конструкция автоматических устройств и их схемы оказываются простыми, надежными и недорогими.

Переходные процессы, возникающие при включении генераторов на параллельную работу методом точной синхронизации, настолько слабо выражены и кратковременны, за исключением случаев неправильных включений, что они никогда не рассматриваются. Наоборот, процессы, связанные с включением генераторов методами самосинхронизации и синхронизации через сопротивление, явно выражены и оказывают существенное влияние на сеть.

При включении генераторов на параллельную работу методом самосинхронизации стремятся выполнять включение так, чтобы изменение напряжения и тока в цепях генератора и время входа последнего в синхронизм были минимальными. Установлено, что для сокращения переходного процесса при самосинхронизации необходимо немедленно

давать перевозбуждение подключаемому генератору. Величина перевозбуждения должна быть равна потолочному возбуждению генератора, поэтому система автоматического регулирования напряжения подключаемого генератора должна быть заранее включена. Кроме того, требуется, чтобы разность скоростей вращения агрегатов не превышала 3-5 % синхронной скорости и включение происходило при ускорении не более 1 Гц/с, причем желательно, чтобы включение производилось тогда, когда разность скоростей вращения подключаемого и работающего генераторов уменьшается, а не увеличивается. При этом считается безразличным выше или ниже частота подключаемого генератора частоты шин.

Как показывают экспериментальные исследования, переходный процесс при самосинхронизации генераторов саморегулированием имеет закономерность, которая заключается в следующем: длительность сверхпереходного процесса ничтожна; скорость вращения генераторов при общей величине скольжения до 5 % практически остается неизменной; снижение напряжения на шинах электростанции вплоть до момента его восстановления происходит без явно выраженных колебаний независимо от значения начального скольжения, находящегося в пределах от 0 до 5 %. Если включение генераторов происходит при совмещенных роторах (угол между роторами $\Delta\theta_{12} \approx 0$ или 180 эл. град), то независимо от указанных значений скольжения первоначальный провал напряжения представляет собой максимальный провал и это имеет место при любом значении угла $\Delta\theta_{12}$ [27].

Указанные особенности протекания переходного процесса самосинхронизации генераторов позволяют пренебречь при составлении уравнений влиянием сверхпереходных процессов, изменением скорости вращения и скольжения и считать, что включение синхронизируемого генератора происходит в момент ориентации его ротора в направлении вектора магнитного поля обмотки статора, т. е. в момент, когда угол между роторами равен нулю или 180 эл. град. Поэтому необходимо рассматривать переходный процесс по продольным осям работающего и подключаемого генераторов, т. е. в самом тяжелом случае самосинхронизации, который тем не менее может иметь место в нормальных условиях эксплуатации. При таких допущениях аналитическое выражение переходного процесса в схеме замещения (рис. 16.9) без учета активных сопротивлений цепи может быть найдено при помощи третьего уравнения Парка-Горева (14.15) и соотношений,

получаемых из векторной диаграммы по продольной оси синхронной машины (см. рис. 13.6).

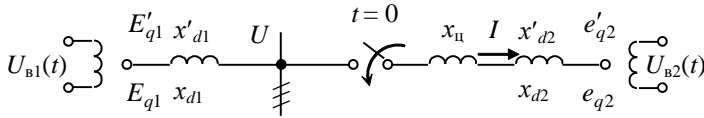


Рис. 16.9. Схема замещения цепи при самосинхронизации генераторов

Имеем для работающего генератора

$$\left. \begin{aligned} T_{d1} \frac{dE'_{q1}}{dt} + E_{q1} &= U_{B1}(t); \\ E_{q1} - x_{d1}I &= U; \\ E'_{q1} - x'_{d1}I &= U, \end{aligned} \right\} \quad (16.50)$$

для подключаемого генератора

$$\left. \begin{aligned} T_{d2} \frac{de'_{q2}}{dt} + e_{q2} &= U_{B2}(t); \\ e_{q2} + x_{dц}I &= U; \\ e'_{q2} + x'_{dц}I &= U, \end{aligned} \right\} \quad (16.51)$$

где e_{q2}, e'_{q2} - ЭДС остаточного намагничивания соответственно за синхронным и переходным индуктивным сопротивлениями подключаемого генератора; $x_{dц} = x_{d2} + x_{ц}$; $x'_{dц} = x'_{d2} + x_{ц}$ - суммарные значения индуктивных сопротивлений в цепи подключаемого генератора; $x_{ц}$ - индуктивное сопротивление цепи; T_{d1}, T_{d2} - постоянные времени обмоток возбуждения генераторов при разомкнутых обмотках статоров; $U_{B1}(t), U_{B2}(t)$ - вольт-секундные характеристики цепей возбуждения генераторов.

После преобразований две системы уравнений представляется двумя уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} T_{d1}\dot{U} + T_{d1}x'_{d1}\dot{I} + U + x_{d1}I &= U_{в1}(t); \\ T_{d2}\dot{U} - T_{d2}x'_{d2}\dot{I} + U - x_{dц}I &= U_{в2}(t). \end{aligned} \right\} \quad (16.52)$$

Начальные условия для этих уравнений, т. е. величины напряжения и тока U_0 и I_0 в момент включения выключателя синхронизируемого генератора, могут быть определены из уравнения для схемы замещения

$$E'_{q1} - x'_{d1}I_0 - (x'_{d2} + x_{ц})I_0 - e'_{q2} = 0.$$

Отсюда

$$I_0 = \frac{E'_{q1} - e'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{дц}}, \quad (16.53)$$

и подстановка в соотношение

$$U_0 = E'_{q1} - x'_{d1}I_0$$

дает

$$U_0 = \frac{E'_{q1}x'_{дц} + e'_{q2}x'_{d1}}{x'_{d1} + x'_{дц}}. \quad (16.54)$$

Минимальные значения броска тока и провала напряжения (имеющие место, когда включение генератора происходит при угле θ равном 90 или 270 эл. град, что обуславливает переходный процесс по поперечной оси генераторов) можно получить из этих же зависимостей (16.53) и (16.54), принимая в них $x'_{дц} = x_{ц}$ и $e'_{q2} = 0$

$$I_0 = \frac{E'_{q1}}{x'_{d1} + x_{ц}}, \quad U_0 = \frac{E'_{q1}x_{ц}}{x'_{d1} + x_{ц}}. \quad (16.55)$$

При точной синхронизации генераторов, когда подключаемый генератор возбужден и, следовательно, $e'_{q2} = E'_{q2}$, $E'_{q2} \approx E'_{q1}$, из формул (16.54) и (16.53) следует, что напряжение в этом случае сохраняется номинальным ($U_0 = 1$) и бросок тока не возникает ($I_0 = 0$).

Для генератора с саморегулированием вольт-секундная характеристика работающей машины определяется выражением

$$U_{в}(t) = U_{в0} 1(t) + U_{вi} 1(t) = U_{вм} 1(t),$$

где

$U_{в0}1(t)$ - составляющая напряжения возбуждения при ненагруженном генераторе; $U_{вi}1(t)$ - составляющая напряжения возбуждения, зависящая от нагрузки генератора.

Величину максимального возбуждения $U_{вн}$ можно найти из упрощенной векторной диаграммы системы саморегулирования по величине тока в цепи статора синхронизируемых генераторов и по величине напряжения в сети в момент подключения одного из них (рис. 16.10).

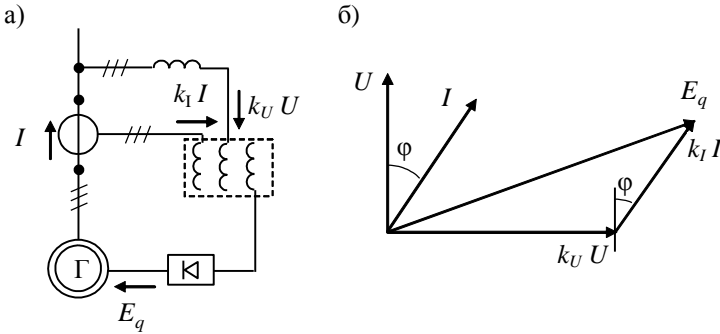


Рис. 16.10. Принципиальная схема системы саморегулирования (а) и ее векторная диаграмма (б)

Из векторной диаграммы для номинального режима генератора следует

$$E_{q\text{ном}}^2 = (k_U U_{\text{ном}} + k_I I_{\text{ном}} \sin \varphi_{\text{ном}})^2 + (k_I I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}})^2.$$

После преобразований, учитывая, что $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ и в относительных единицах $E_{q\text{ном}} = U_{\text{в.ном}}$, $k_U U_{\text{ном}} = U_{\text{в.х.х}} = 1$, $I_{\text{ном}} = 1$, можно получить следующую формулу для коэффициента токового компаундирования:

$$k_I = \sqrt{U_{\text{в.ном}}^2 - 0,64} - 0,6, \quad (16.56)$$

где напряжение возбуждения генератора в номинальном режиме вычисляется по формулам (13.14). Располагая значением коэффициента k_I , величиной броска тока I_0 и значением напряжения на шинах U_0 , можно определить расчетную величину возбуждения работающего генератора при самосинхронизации по формуле

$$U_{\text{в1}}(t) = U_{\text{вн1}} 1(t) = U_0 + k_{I1} I_0, \quad (16.57)$$

(при расчете этой величины необходимо учитывать возможное ограничение возбуждения генератора вследствие насыщения трансформаторов системы саморегулирования).

Подключаемый генератор, благодаря действию токового контура системы саморегулирования, с момента включения выключателя медленно получает возбуждение, величина которого почти равна величине реакции статора генератора по продольной оси. Поэтому можно принять, что с момента включения выключателя до момента достижения напряжением на шинах значения, близкого к номинальному, подключаемый генератор получает возбуждение, пропорциональное броску тока в цепи: $U_{\text{вм}2} = k_{I2} I_0$. Вольт-секундная характеристика будет подобна характеристике работающего генератора

$$U_{\text{в}2}(t) = U_{\text{вм}2} 1(t). \quad (16.57, \text{ а})$$

Уравнения (16.52), (16.57), (16.57, а) решаются при помощи преобразования Лапласа, и характер изменения напряжения на шинах при самосинхронизации генераторов определяется такой формулой [27]

$$U(t) = A - Ce^{-\nu t} + De^{-\mu t}, \quad (16.58)$$

где A, C, D , - коэффициенты, определяемые параметрами цепей генераторов; ν, μ - декременты затухания (величины, обратные постоянным времени обмоткам возбуждения с учетом взаимовключенных обмоток статоров генераторов).

Коэффициенты в уравнении (16.58) определяются равенствами

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{x_{d1\text{ц}} U_{\text{вм}1} + x_{d1} U_{\text{вм}2}}{x_{d1} + x_{d1\text{ц}}}; \\ C &= U_0 \frac{\nu^2 - a\nu + b}{2\nu\gamma}; \quad D = U_0 \frac{\mu^2 - a\mu + b}{2\mu\gamma}, \end{aligned} \right\} \quad (16.59)$$

где

$$\begin{aligned} a &= \frac{x_{d1\text{ц}} T_{d1} U_0 - x'_{d1} U_{\text{вм}2} + x'_{d1} T_{d2} U_0 + x'_{d1\text{ц}} U_{\text{вм}1}}{(x'_{d1} + x'_{d1\text{ц}}) T_{d1} T_{d2} U_0}; \\ b &= \frac{x_{d1\text{ц}} U_{\text{вм}1} + x_{d1} U_{\text{вм}2}}{(x'_{d1} + x'_{d1\text{ц}}) T_{d1} T_{d2} U_0}. \end{aligned}$$

Декременты затухания ν и μ , входящие в указанные коэффициенты, могут быть представлены в виде

$$\nu = x - y; \quad \mu = x + y, \quad (16.60)$$

где

$$x = \frac{\beta_x}{2\alpha_x}, \quad y = \frac{\sqrt{\beta_x^2 - 4\alpha_x(x_{d1} + x_{d1\text{ц}})}}{2\alpha_x};$$

$$\alpha_x = (x'_{d1} + x'_{d\Omega})T_{d1}T_{d2}, \quad \beta_x = (x'_{d1} + x_{d\Omega})T_{d1} + (x'_{d\Omega} + x_{d1})T_{d2}.$$

Для оценки погрешности предлагаемого метода расчета изменения напряжения при самосинхронизации генераторов на рис. 16.11 построены экспериментальные и расчетные графики изменения напряжения на шинах.

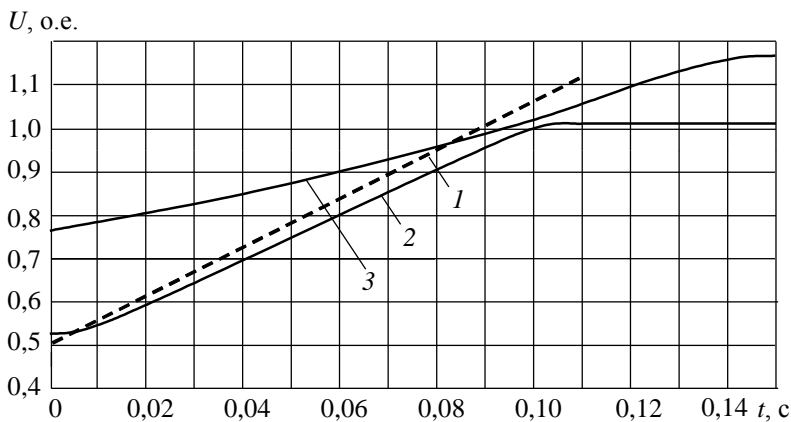


Рис. 16.11. Экспериментальные и расчетные кривые изменения напряжения при самосинхронизации дизель - генераторов 2Ч МСА 72/4 мощностью 12 кВт 1500 об/мин с саморегулированием;
1 - расчетная кривая для угла $\Delta\theta_0 = 0$, $s = 0$; 2, 3 - экспериментальные кривые соответственно для угла $\Delta\theta_0 \approx 0$ и 90 эл. град.

Экспериментальные кривые отражают случай включения генераторов при совмещенных роторах и при их расхождении на 90 эл. град. В первом случае контур самовозбуждения системы саморегулирования подключаемого генератора был включен примерно через 0,1 с после включения выключателя, а во втором – примерно через 0,15 с. Расчетная кривая получена для наиболее тяжелого случая самосинхронизации генераторов, когда их роторы совмещены. Как видно из сравнения кривых, результаты расчета близки к экспериментальным данным; расчетная величина первоначального уменьшения напряжения практически совпадает с экспериментальным значением.

Расчет дает небольшую погрешность в величине длительности изменения напряжения по сравнению с действительной. Причина этого заключается в том, что практически с момента включения генератора скольжение не остается постоянным, а изменяется в большей или меньшей степени до тех пор, пока нарастающая синхронизирующая

сила не введет генераторы в синхронизм. Вследствие изменения скольжения меняется и величина индуктивного сопротивления подключаемого генератора (относительно работающего) в соответствии с выражениями [27]

$$\left. \begin{aligned} x_H &= \frac{x_{d2}x_{q2}}{\sqrt{x_{q2}^2 + (x_{d2}^2 - x_{q2}^2)\sin^2 \theta}}; \\ x'_H &= \frac{x'_{d2}x_{q2}}{\sqrt{x_{q2}^2 + ((x'_{d2})^2 - x_{q2}^2)\sin^2 \theta}}, \end{aligned} \right\} \quad (16.61)$$

где $\theta = \omega_s t$, $\omega_s = 2\pi f_s = \frac{2\pi p_2(n_2 - n_1)}{60}$ - угловая частота скольжения.

Как видно из этих выражений, индуктивное сопротивление подключаемого генератора при наличии скольжения может изменяться в значительных пределах: $x_H = x_{d2} \div x_{q2}$ и $x'_H = x'_{d2} \div x_{q2}$. Это подтверждается характером изменения экспериментальных кривых напряжения для случая включения генератора при различных углах расхождения роторов. Если включение произошло в момент, когда $\Delta\theta = 0$, то вследствие скольжения индуктивное сопротивление подключаемого генератора увеличивается от значения x'_d до большого значения x_q . Напряжение на шинах начинает быстро восстанавливаться, но ротор продолжает движение, и сопротивление снова уменьшается – восстановление напряжения замедляется. Если включение произошло в момент, когда $\Delta\theta = 90$ эл. град, т. е. когда индуктивное сопротивление подключаемого генератора равно x_q , то по мере поворота ротора сопротивление уменьшается до x'_d и вслед за ним уменьшается напряжение сети.

Указанное обстоятельство и обуславливает некоторое расхождение расчетной и экспериментальных кривых изменения напряжения. Расчетная величина первоначального провала напряжения, вычисленная по формуле (16.54), близка к экспериментальной, если при включении генератора угол между роторами близок к нулю. Расчетная величина броска тока $I_0 = 3,23$, вычисленная по формуле (16.53), достаточно точно совпадает с экспериментальной, равной $I_0 = 3,32$ (для случая $\Delta\theta = 7$ эл. град).

Расчет изменения напряжения и величины броска тока при самосинхронизации генераторов с саморегулированием

Исходные данные. Генератор работающий: $S = 15 \text{кВ} \cdot \text{А}$; $U = 230 \text{В}$; $I = 37,6 \text{А}$; $\cos \varphi = 0,8$; $x_d = 1,47$; $x'_d = 0,1$; $x_q = 0,73$; $T_d = 0,765 \text{с}$; реактивность системы саморегулирования $x_{c1} = 0,05$; генератор работает без нагрузки.

Генератор подключаемый: $S_2 = 15 \text{кВ} \cdot \text{А}$; $e'_{q2} = 0,03$; $x_{d2} = 1,47$; $x'_{d2} = 0,1$; $x_{q2} = 0,73$; $T_{d02} = 0,765 \text{сек}$; $x_{c2} = 0,05$; сопротивление цепи между генераторами $x_{\text{ц}} = 0$.

Расчет

1. Полные сопротивления работающего и синхронизируемого генератора, соответственно

$$\begin{aligned}x_{d1} &= x_d + x_c = 1,52, & x'_{d1} &= x'_d + x_c = 0,15, \\x_{q1} &= x_q + x_c = 0,78, & x_{d\text{ц}} &= x_{d2} + x_{c2} + x_{\text{ц}} = 1,52, \\& & x'_{d\text{ц}} &= 0,15; & x_{q\text{ц}} &= 0,78.\end{aligned}$$

2. ЭДС за переходной реактивностью работающего генератора при холостом ходе

$$E'_{q1} = 1.$$

3. Напряжение на шинах работающего генератора в момент подключения синхронизируемого генератора по формуле (16.54)

$$U_0 = 0,515.$$

4. Бросок тока в цепи в момент подключения генератора по (16.53)

$$I_0 = 3,23.$$

5. Напряжение возбуждения работающего и синхронизируемого генераторов в номинальном режиме по формулам (13.14), соответственно (для $\cos \varphi = 0,8$)

$$U_{\text{в1ном}} = \frac{x_{d1}x_{q1} + 0,6(x_{d1} + x_{q1}) + 1}{\sqrt{x_{q1}^2 + 1,2x_{q1} + 1}} = 2,24; \quad U_{\text{в2ном}} = 2,24.$$

6. Коэффициент компаундирования системы саморегулирования работающего и синхронизируемого генераторов соответственно по формуле (16.56)

$$k_{I1} = 1,49; \quad k_{I2} = 1,49.$$

7. Напряжение возбуждения работающего генератора после подключения синхронизируемого по формуле (16.57)

$$U_{вм1} = U_0 + k_{I1}I_0 = 5,32.$$

8. Напряжение возбуждения синхронизируемого генератора после подключения к работающему по выражению (16.57, а)

$$U_{вм2} = k_{I2}I_0 = 4,8.$$

9. Декременты затухания переходного процесса ν, μ по формулам (16.60)

$$\nu = x - y = 1,3; \quad \mu = x + y = 13,3$$

(для расчетных значений $\alpha_x = 0,175, \beta_x = 2,55, x = 7,3, y = 6$).

10. Вспомогательные величины для вычисления коэффициентов расчетного уравнения (16.59)

$$a = 26; \quad b = 170.$$

11. Коэффициенты расчетного уравнения по выражениям (16.59)

$$A = 5,06; \quad C = 4,55; \quad D = 0,0032.$$

12. Расчетная зависимость по формуле (16.58)

$$U(t) = 5,06 - 4,55e^{-1,3t} + 0,0032e^{-13,3t}.$$

При правильно вычисленных коэффициентах уравнения для момента времени $t = 0$ должно быть $U(0) = U_0$; здесь $U(0) = 0,513$, а величина $U_0 = 0,515$.

По зависимости $U(t)$ рассчитан и построен график изменения напряжения, приведенный на рис. 16.11.

§ 16.6. Синхронизация генераторов соизмеримой мощности через индуктивное сопротивление - реактор («грубая» синхронизация)

Из выражения для напряжения (16.54) в момент включения генераторов следует, что если бы индуктивное сопротивление цепи между генераторами было исчезающее мало, то величина провала напряжения достигла бы 50 %. При увеличении этого сопротивления провал напряжения можно уменьшить до желаемой величины. На этом принципе основан способ синхронизации генераторов через реактор. При таком способе нет необходимости включать генератор невозбужденным. Можно выбрать сопротивление реактора таким, что при сохранении достаточной синхронизирующей силы генераторов провал напряжения будет находиться в заданных пределах [27].

Величина напряжения может быть определена по формуле (16.54), если учесть, что в этом случае для возбужденного генератора $E'_{q2} \neq 0$, и принять во внимание, что наиболее тяжелый случай включения будет тогда, когда роторы генераторов находятся в противофазе ($\Delta\theta = 180$ эл.град). Расчетная формула примет вид

$$U_0 = \frac{(x_{d2} + x_p)E'_q - x'_{d1}E'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_p}, \quad (16.62)$$

и так как $E'_{q1} \approx E'_{q2} \approx 1$, то

$$\Delta U_0 = \frac{2x'_{d1}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_p}, \quad (16.63)$$

где x_p - приведенное к базисной мощности индуктивное сопротивление реактора.

Бросок тока может быть рассчитан по формуле (16.53) при тех же условиях

$$I_0 = \frac{E'_{q1} + E'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_p}. \quad (16.64)$$

Расчет переходного процесса – изменения напряжения – при синхронизации генераторов указанным способом можно произвести с помощью полученных в § 16.5 формул, если учесть в них отмеченную особенность: возбужденный генератор включается в противофазе. Для генераторов с саморегулированием в коэффициентах уравнения (16.58) следует принять $U_{\text{вм}2}$ с отрицательным знаком и вычислить эту величину по формуле, подобной (16.57)

$$U_{\text{вм}2} = U_0 + (k_{I2} - x_p)I_0.$$

В случае подключения через реактор к генератору большой мощности генератора малой мощности может оказаться, что бросок тока превысит величину уставки максимальной защиты последнего. Если допустимую кратность тока для этого генератора обозначить k_{j2} , то необходимую величину сопротивления реактора для ограничения тока можно определить по формуле

$$x_p = \frac{2}{k_{j2}k_0} - (x'_{d1} + x'_{d2}), \quad (16.65)$$

где $k_0 = \frac{S_2}{S_1}$ - коэффициент соизмеримости генераторов по мощности.

Величина сопротивления реактора по условию допустимого снижения напряжения на шинах электростанции может быть установлена из выражения (16.63)

$$x_p = \frac{2x'_{d1}}{\Delta U_0} - (x'_{d1} + x'_{d2}), \quad (16.66)$$

где ΔU_0 - допустимое снижение напряжения.

Сопротивление реактора должно быть выбрано таким, чтобы уравниваемый ток и соответственно снижение напряжения при включении генераторов не превосходили допустимых величин, а синхронизирующие силы были достаточны для надежной синхронизации генераторов.

Разные величины относительного значения сопротивления реакторов обуславливают и разный характер протекания процесса синхронизации: при большем сопротивлении уменьшается величина провала, но увеличивается время синхронизации. Кроме того, неправильный расчет сопротивления реактора может привести к отказам в синхронизации машин.

Влияние сопротивления реактора на синхронную связь между работающим и подключаемым генератором можно иллюстрировать при помощи выражения для синхронной жесткости, написанного для случая включения генератора в сеть через индуктивное сопротивление для явнополюсной машины [27]

$$C = \frac{U_c E_{q0}}{x_{dP}} \cos \theta_0 + \frac{U_c^2 (x_d - x_q)}{x_{dP} x_{qP}} \cos 2\theta_0, \quad (16.67)$$

где $x_{dP} = x_d + x_p$, $x_{qP} = x_q + x_p$.

Из этого выражения видно, что величина синхронной связи, удерживающей генераторы в параллельной работе, зависит от сопротивления реактора и будет тем меньше, чем больше это сопротивление. При значительном сопротивлении реактора синхронная машина не может быть синхронизирована с другой.

Таким образом, при выборе величины индуктивного сопротивления реактора следует учитывать два противоречивых требования: с одной стороны, необходимо увеличивать сопротивление реактора для обеспечения минимального «провала» напряжения при включении генератора, а с другой, – уменьшать это сопротивление для обеспечения достаточной синхронной связи между генератором и сетью. Очевидно, сопротивление реактора должно быть выбрано таким, чтобы прежде всего обеспечить необходимую синхронную связь.

При известной величине синхронной жесткости включаемого генератора сопротивление реактора находится из формулы (16.67).

В соответствии с определением потенциальной энергии синхронной машины при включении генератора через реактор на параллельную работу с несколькими генераторами его синхронная жесткость должна быть вычислена по значениям общей синхронной жесткости с каждым генератором. При этом получается несколько значений, из которых берется наименьшее и по нему определяется сопротивление реактора [27].

Основная расчетная зависимость (16.67) не содержит параметров, характеризующих тип первичного двигателя генератора. Параметры же регулятора двигателя – степень неравномерности и степень нечувствительности, влияющие на величину отклонения нагрузки, являются общими для любого типа двигателя (дизеля, паровой и газовой турбины), поэтому зависимости для расчета сопротивления реактора могут быть распространены на все генераторные агрегаты.

Глава 17

Переходные процессы при включении мощных электродвигателей в сеть

§ 17.1. Характеристика переходных процессов при включении мощных электродвигателей в сеть

Включение мощных электродвигателей в сеть (пуск электродвигателей) прямым включением, а также их самозапуск вызывают на шинах снижение напряжения, что отрицательно влияет на остальные потребители электроэнергии, а при значительном снижении напряжения пуск, самозапуск электродвигателя и его разгон могут быть затруднены или невозможны.

Снижение напряжения в сети при пуске мощного электродвигателя вызывается пусковым током, величина которого в 5,5-7,5 раз больше, чем ток номинального режима. Большая величина тока при пуске электродвигателей может привести к ложному срабатыванию релейной защиты. Поэтому при проектировании электроустановок с мощными электродвигателями необходимо знать величины снижения напряжения и значения пускового тока.

При снижении напряжения до $0,85 \cdot U_{\text{ном}}$ и менее наступает нарушение устойчивости коммутационной аппаратуры в сетях до 1кВ: якоря контактов магнитных пускателей отпадают, что приводит к самопроизвольному отключению электрооборудования от сети.

Переходные процессы при пусках мощных асинхронных или синхронных электродвигателей прямым включением в сеть по характеру изменения напряжения в сети подобны, поскольку до возбуждения синхронного электродвигателя его разгон, так же, как и асинхронного электродвигателя, происходит в основном за счет короткозамкнутой, демпферной обмотки ротора.

Характер изменения напряжения зависит от типа электроустановки, в которой производится пуск электродвигателя.

При пуске электродвигателя от шин, получающих питание от трансформатора, подключенного к системе неограниченной мощности (рис. 17.1, а), снижение напряжения на шинах будет зависеть от величины падения напряжения на сопротивлениях системы, трансформатора и кабеля.

При пуске электродвигателя от синхронного генератора соизмеримой мощности (рис. 17.1, б) снижение напряжения на шинах будет зависеть от параметров генератора, его первичного двигателя и от характеристик автоматических регуляторов напряжения и частоты.

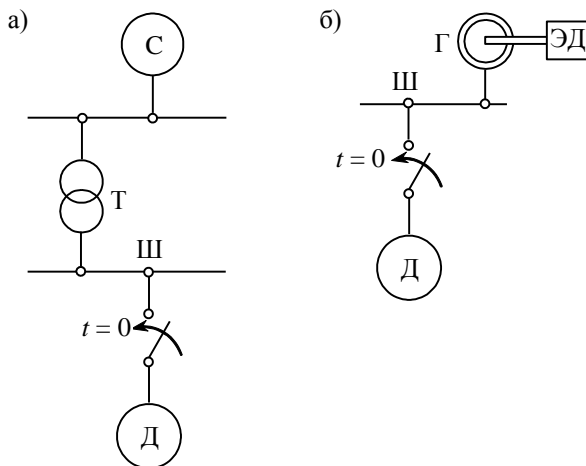


Рис. 17.1. Принципиальные схемы электроустановок, в которых производится пуск мощного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя:
 а – пуск от системы неограниченной мощности через трансформатор; б – пуск от синхронного генератора соизмеримой мощности; С – система; Т – трансформатор; Ш – шины; Г – генератор; ЭД – энергетический двигатель; Д – пускаемый электродвигатель

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя (и синхронного электродвигателя в асинхронном режиме) определяется формулой Клосса*

$$m_{\text{э}} = \frac{2m_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}} \left(\frac{U}{f} \right)^2,$$

где $m_{\text{макс}}$ – максимальный, «опрокидывающий» момент; $s_{\text{к}}$ – критическое скольжение, при котором имеет место максимальный момент; s – текущее значение скольжения; U – напряжение на зажимах статорной обмотки двигателя; f – частота питающей сети.

*Kloss M. Drehmoment und Schlüpfung des Drehstrommotors. Archiv für Elektrotechnik Bd V, 1916.

Если скольжение представить зависимостью

$$s = 1 - n,$$

то механическая характеристика может быть построена в координатах (m, n) , как на рис. 17.2.

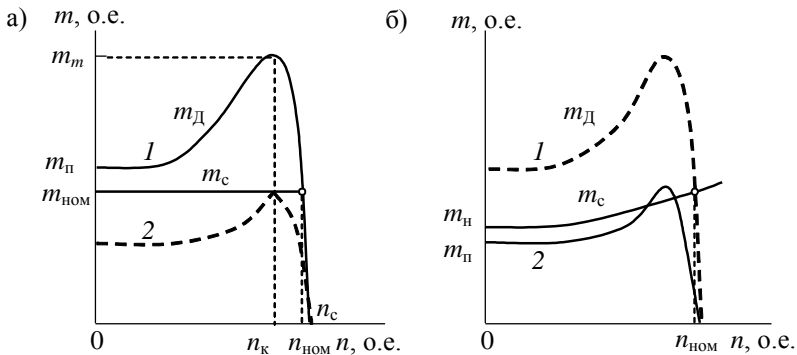


Рис. 17.2. Механические характеристики работающего (а) и пускаемого (б) асинхронных электродвигателей при номинальном напряжении (график 1) и при значительном снижении напряжения (график 2)

Резкое и значительное снижение напряжения на шинах электроустановки влияет на нормальную и устойчивую работу асинхронных электродвигателей: при снижении напряжения уменьшается вращающий момент, а при глубоком «провале» напряжения максимальный вращающий момент электродвигателя может оказаться меньше момента сопротивления рабочего механизма (рис. 17.2, а), и электродвигатель остановится. На рис. 17.2 приняты следующие обозначения: m_n - момент начальный и m_c - момент сопротивления на валу механизма; $m_{п}$ - момент пусковой, $n_{ном}$, n_c , n_k - частота вращения номинальная, синхронная и критическая соответственно.

Вращающий момент m_D асинхронного электродвигателя в относительных единицах (о.е.), а также опрокидывающий m_m , и пусковой $m_{п}$, как следует из формулы Клосса, зависят от величины квадрата напряжения: $m_D \equiv U^2$.

Поэтому снижение напряжения влияет и на пуск электродвигателя, а именно: при значительном снижении пусковой момент электродвигателя может оказаться меньше момента трогания рабочего механизма, как показано на рис. 17.2, б, и электродвигатель не запустится.

§ 17.2. Снижение, «провал» напряжения на шинах трансформаторной подстанции и изменение тока при пуске и самозапуске мощных электродвигателей

Определение величин напряжения и тока производится для случая пуска электродвигателя от электроустановки, схема и параметры которой показаны на рис. 17.3.

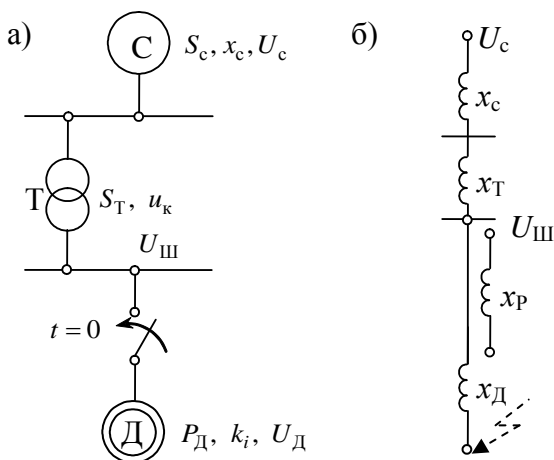


Рис. 17.3. Принципиальная схема электроустановки(а), от шин которой пускается электродвигатель, и ее схема замещения (б)

Важно отметить одну особенность электродвигателя при пуске, заключающуюся в том, что от момента трогания до момента достижения им критической частоты вращения n_k (критического скольжения) значение сопротивления z остается практически постоянным и индуктивным, как видно из рис. 17.4.

Электромеханический переходный процесс при пуске электродвигателя – процесс длительный по сравнению с длительностью электромагнитных процессов в обмотках трансформатора. Поэтому этими процессами в трансформаторе можно пренебречь и считать, что пуск или самозапуск электродвигателя представляет собой включение на шины трансформаторной подстанции постоянного сопротивления, причем это сопротивление является практически индуктивным

сопротивлением, поскольку $\cos \varphi$ электродвигателя в указанных пределах частоты вращения имеет величину 0,4-0,5. Активным сопротивлением трансформатора можно пренебречь вследствие его малости.

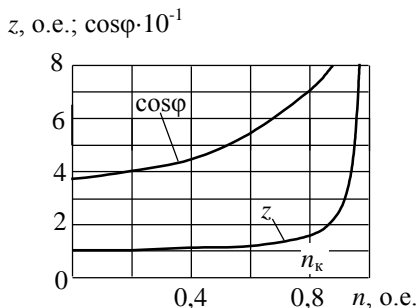


Рис. 17.4. Графики изменения эквивалентного сопротивления z и $\cos \varphi$ асинхронного короткозамкнутого электродвигателя АМ-32-2 мощностью 150 кВт в зависимости от частоты вращения

Расчет тока и напряжения при пуске электродвигателя для принятых условий и допущений может производиться по схеме замещения рис. 17.3, б, как для к.з. за сопротивлениям x_D .

Индуктивные сопротивления элементов электроустановки в относительных единицах (приведенные к базисным значениям) определяются по следующим формулам.

Сопротивление системы

$$x_c = \frac{S_b}{S_c}, \quad (17.1)$$

где S_b - базисная мощность, кратная 10 МВ·А; S_c - мощность системы (районной подстанции), МВ·А.

Сопротивление трансформатора

$$x_T = \frac{u_k}{100} \frac{S_b}{S_T}, \quad (17.2)$$

где S_T - номинальная мощность трансформатора, МВ·А; u_k - напряжение к.з. трансформатора, %.

Сопротивление электродвигателя

$$x_D = \frac{1}{k_i} \frac{S_b}{S_D} \left(\frac{U_D}{U_{III}} \right)^2, \quad (17.3)$$

где $S_{\text{Д}}, U_{\text{Д}}$ - номинальные мощность и напряжение электродвигателя, МВ·А, кВ; $U_{\text{Ш}}$ - номинальное напряжение на шинах трансформатора, кВ; $k_i = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$ - кратность пускового тока.

Суммарное сопротивление схемы замещения равно

$$x_{\Sigma} = x_{\text{с}} + x_{\text{T}} + x_{\text{Д}}.$$

Величина тока при пуске электродвигателя (в относительных единицах)

$$I = \frac{U_{\text{с}}}{x_{\Sigma}} = \frac{1,05}{x_{\Sigma}}. \quad (17.4)$$

Здесь $U_{\text{с}}$ - напряжение за сопротивлением системы, которое принимается на 5 % выше номинального значения.

Напряжение на шинах трансформатора или на зажимах электродвигателя, пускаемого прямым включением, равно

$$U_{\text{Ш}} = x_{\text{Д}} I = \frac{x_{\text{Д}}}{x_{\Sigma}} U_{\text{с}} = 1,05 \frac{x_{\text{Д}}}{x_{\Sigma}}. \quad (17.5)$$

В случае низкого значения $U_{\text{Ш}}$ (по условию устойчивой работы потребителей) его можно увеличить, как следует из последней формулы, двумя путями:

1) повысить мощность трансформатора, что обусловит по формуле (17.2) уменьшение x_{T} и, следовательно, уменьшение x_{Σ} ;

2) включить между шинами и электродвигателем на период его пуска реактор – пусковой реактор.

Во втором случае ток при пуске электродвигателя рассчитывается по формуле

$$I = \frac{U_{\text{с}}}{x_{\Sigma\text{P}}} = \frac{1,05}{x_{\text{с}} + x_{\text{T}} + x_{\text{P}} + x_{\text{Д}}}, \quad (17.6)$$

а остаточное напряжение на шинах подстанции равно

$$U_{\text{ШП}} = 1,05 \frac{x_{\text{Д}} + x_{\text{P}}}{x_{\Sigma\text{P}}}. \quad (17.7)$$

При установке реактора необходимо проверить уровень напряжения на зажимах пускаемого электродвигателя по условию его трогания и разгона.

Величина напряжения на зажимах электродвигателя при пуске через реактор определяется так

$$U_{\text{ДР}} = 1,05 \frac{x_{\text{Д}}}{x_{\Sigma\text{P}}}. \quad (17.8)$$

Расчет снижения напряжения на шинах трансформаторной подстанции при пуске и самозапуске мощных электродвигателей

Принципиальная схема трансформаторной подстанции с электродвигателями показана на рис. 17.5. Секционный выключатель в нормальном режиме отключен и включается от устройства АВР при исчезновении напряжения на одной из двух секций шин. Мощность энергосистемы $S_c = 450 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

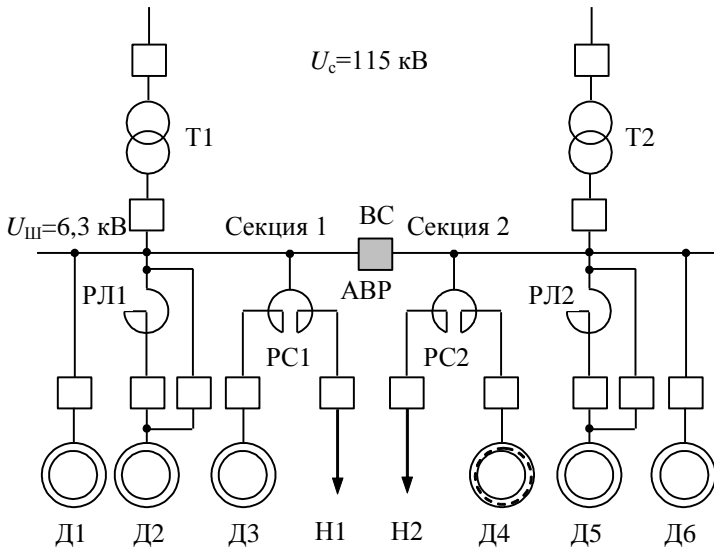


Рис. 17.5. Схема трансформаторной подстанции с электродвигателями

Мощность трансформаторов равна $S_T = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ каждый; напряжение к.з. $u_k = 10,5\%$.

Мощность асинхронных электродвигателей Д1, Д6 равна $P_{Д1} = P_{Д6} = 2 \text{ МВт}$; маховый момент $GD_{Д1}^2 = GD_{Д6}^2 = 0,3 \text{ т} \cdot \text{м}^2$.

Мощность асинхронных электродвигателей Д2, Д3, Д5 равна $P_{Д2} = P_{Д3} = P_{Д5} = 5 \text{ МВт}$; маховый момент $GD_{Д2}^2 = GD_{Д3}^2 = GD_{Д5}^2 = 0,74 \text{ т} \cdot \text{м}^2$.

Мощность синхронного электродвигателя Д4 равна $P_{Д4} = 4 \text{ МВт}$.

Нагрузка ветвей сдвоенных реакторов РС1 и РС2 равна 4 МВт.

Характеристики асинхронных электродвигателей потребляемого тока I , вращающего момента $m_{\text{д}}$ и момента сопротивления (насоса) $m_{\text{н}}$ приведены на рис. 17.6.

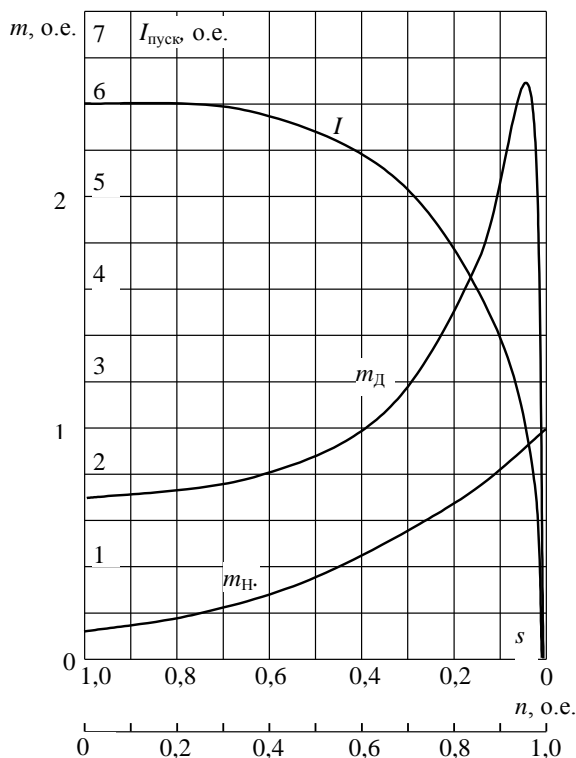


Рис. 17.6

Требуется:

1. Проверить пуск асинхронного электродвигателя Д1 по условию: остаточное напряжение на шинах секции должно быть не менее 85 % номинального значения и пусковой момент двигателя должен быть больше момента сопротивления на 10 %.

2. Определить необходимость в установке реактора Р1 и его сопротивление для пуска электродвигателя Д2 по следующим условиям:

- остаточное напряжение на шинах должно быть не менее 85 % номинального значения;

- остаточное напряжение на зажимах двигателя должно быть достаточным для обеспечения пуска.

3. Проверить правильность выбора сдвоенного реактора РС1 по пуску асинхронного электродвигателя ДЗ.

При расчетах считать, что остальные электродвигатели и нагрузка включены и работают в нормальном режиме.

4. Определить возможность группового самозапуска всех электродвигателей секции 1 при отключении ее от трансформатора Т1 и включении секционного выключателя ВС через $t_{\text{АВР}} = 1,5$ с. При этом следует считать:

- синхронный электродвигатель является источником ЭДС с параметрами $E'_q = 1,05 = \text{const}$, $x'_d = 15\%$;

- нагрузка второй ветви реактора РС1 при самозапуске электродвигателя автоматически отключается.

При расчетах принимать во внимание:

- номинальное напряжение на вторичной стороне трансформаторов 6,3 кВ;

- номинальное напряжение всех электродвигателей, нагрузки, сдвоенных реакторов и реакторов – 6 кВ;

- номинальные значения коэффициента мощности и КПД для асинхронных электродвигателей равны $\cos \varphi_{\text{Да}} = 0,9$; $\eta_{\text{Да}} = 0,96$; для синхронного электродвигателя равны $\cos \varphi_{\text{Дс}} = 0,90$, $\eta_{\text{Дс}} = 0,97$;

- сдвоенные реакторы РС1, РС2 рассчитаны на длительный ток в ветвях 2·0,6 кА при реактивности $x_{0,5} = 4\%$ и коэффициенте связи $k_c = 0,5$;

- для нагрузки второй ветви реакторов РС1 и РС2 $\cos \varphi_n = 0,8$;

- номинальная частота синхронного вращения электродвигателей равна $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин;

- маховый момент приводного механизма $GD_{\text{мех}}^2$ составляет 80 % от махового момента $GD_{\text{д}}^2$ электродвигателя;

- коэффициент загрузки в номинальном режиме асинхронных электродвигателей равен $k_3 = 1$ (см. рис. 17.6).

Для проведения расчетов составляется схема замещения (рис. 17.7) с учетом того, что в схемах с напряжением выше 1 кВ активными сопротивлениями пренебрегают.

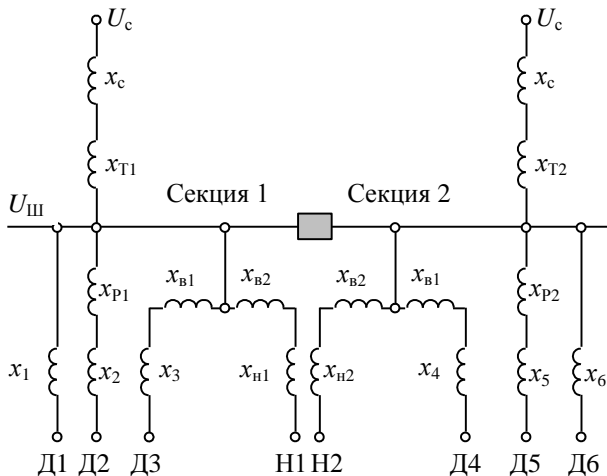


Рис. 17.7. Схема замещения

Расчеты производятся в относительных единицах по формулам 17.1-17.8.

За базисные значения принимаются $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_6 = 6 \text{ кВ}$.

Сопrotивления схемы замещения в относительных базисных единицах определяются:

для системы

$$x_c = \frac{S_6}{S_c} = \left(\frac{\text{МВ} \cdot \text{А}}{\text{МВ} \cdot \text{А}} \right) = \frac{100}{450} = 0,22;$$

для трансформаторов

$$x_{T1} = x_{T2} = \frac{u_k(\%) S_6}{100 S_T} \left(\frac{U_T}{U_6} \right)^2 = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 25} \left(\frac{6,3}{6} \right)^2 = 0,46;$$

для каждой ветви двoенных реакторов

$$x_{0,5} = \frac{x_{0,5}(\%) I_6 U_P}{100 I_P U_6} = \frac{4 \cdot 9,6 \cdot 6}{100 \cdot 0,6 \cdot 6} = 0,64,$$

где

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6} = 9,6 \text{ кА};$$

для электродвигателей при пуске

$$x_1 = \frac{1}{I_{s=1}} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{Д1}} \left(\frac{U_{Д}}{U_{\bar{6}}} \right)^2 = \frac{1}{6} \frac{100}{2,3} \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 7,2; \quad x_2 = x_3 = 2,9,$$

где $I_{s=1} = 6$ кратность пускового тока при $s = 1$ (из графиков рис. 17.6),

$$S_{Д1} = \frac{P_{Д1}}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{2}{0,9 \cdot 0,96} = 2,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}, \quad S_{Д2} = S_{Д3} = 5,3 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

для электродвигателей в номинальном режиме

$$x_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\bar{6}}}{P_{Д1}} \frac{\eta}{\text{tg} \varphi} \left(\frac{U_{Д}}{U_{\bar{6}}} \right)^2 = \frac{100}{2} \frac{0,96}{0,49} \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 98, \quad x_{1\text{НОМ}} = x_{6\text{НОМ}},$$

$$x_{2\text{НОМ}} = x_{3\text{НОМ}} = x_{5\text{НОМ}} = 39;$$

для нагрузки вторых ветвей реакторов

$$x_{Н1} = x_{Н2} = \frac{S_{\bar{6}}}{P_{Н} \text{tg} \varphi_{Н}} \left(\frac{U_{Н}}{U_{\bar{6}}} \right)^2 = \frac{100}{4 \cdot 0,75} \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 33.$$

Расчет остаточного напряжения на шинах при пуске асинхронного электродвигателя Д1

Для расчета этой величины следует обратиться к схеме замещения, изображенной на рис. 17.8, составленной для нормального режима остальной нагрузки. Сопротивления ветвей двоярного реактора в нормальном режиме

$$x_{В1} = x_{В2} = (1 - k_c) x_{0,5} = (1 - 0,5) 0,64 = 0,32.$$

Тогда общее сопротивление двоярного реактора

$$x_{Рс} = \frac{(x_{В1} + x_{3\text{НОМ}})(x_{В2} + x_{Н1})}{x_{В1} + x_{3\text{НОМ}} + x_{В2} + x_{Н1}} = \frac{39,32 \cdot 33,32}{72,64} = 18.$$

Эквивалентное реактивное сопротивление нагрузки, подключенной к трансформатору,

$$x_{\text{э.Н}} = \frac{x_{2\text{НОМ}} x_{Рс}}{x_{2\text{НОМ}} + x_{Рс}} = \frac{39 \cdot 18}{57} = 12,3.$$

При пуске электродвигателя общее сопротивление, включенное на трансформатор, равно

$$x_{1\Sigma} = \frac{x_1 \cdot x_{\text{э.Н}}}{x_1 + x_{\text{э.Н}}} = \frac{7,2 \cdot 12,3}{19,5} = 4,5.$$

Остаточное напряжение на шинах при пуске электродвигателя

$$U_{Ш0} = \frac{x_{1\Sigma}}{x_c + x_{T1} + x_{1\Sigma}} \quad U_c = \frac{4,5 \cdot 1,05}{0,22 + 0,46 + 4,5} = 0,91,$$

где $U_c = k_T \frac{U_c(\text{кВ})}{U_6(\text{кВ})} = \frac{6,3}{115} \cdot \frac{115}{6} = 1,05 \text{ о.е.}$,

k_T - коэффициент трансформации трансформатора.

Остаточное напряжение на шинах $U_{Ш0} = 0,91$ больше лимитируемой величины $0,85 U_{Шном}$, что удовлетворяет условию задачи.

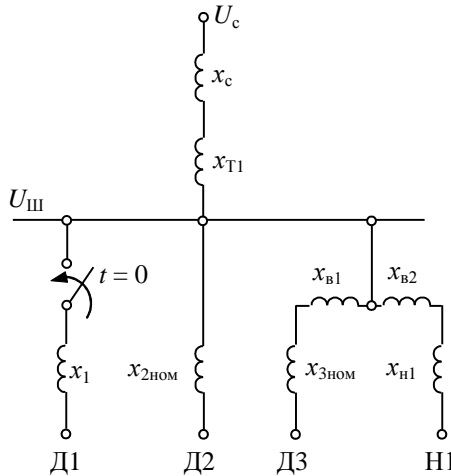


Рис. 17.8. Схема замещения при пуске электродвигателя Д1

Определение необходимости применения реактора для пуска электродвигателя Д2

Для этого расчета схема замещения с реактором имеет вид, изображенный на рис. 17.9. Реактивное сопротивление электродвигателя Д1 в нормальном режиме совместно с общим сопротивлением сдвоенного реактора, т. е. эквивалентное сопротивление нагрузки, подключенной к трансформатору, равно

$$x_{э,н} = \frac{x_{1ном} x_{Pc}}{x_{1ном} + x_{Pc}} = \frac{98 \cdot 18}{116} = 15,2.$$

При прямом пуске электродвигателя Д2 общее сопротивление, включенное на трансформатор, равно

$$x_{2\Sigma} = \frac{x_2 x_{\text{э.н}}}{x_2 + x_{\text{э.н}}} = \frac{2,9 \cdot 15,2}{18,1} = 2,4.$$

Остаточное напряжение на шинах

$$U_{\text{Ш0}} = \frac{x_{2\Sigma}}{x_c + x_{\text{T1}} + x_{2\Sigma}} U_c = \frac{2,4 \cdot 1,05}{0,22 + 0,46 + 2,4} = 0,82.$$

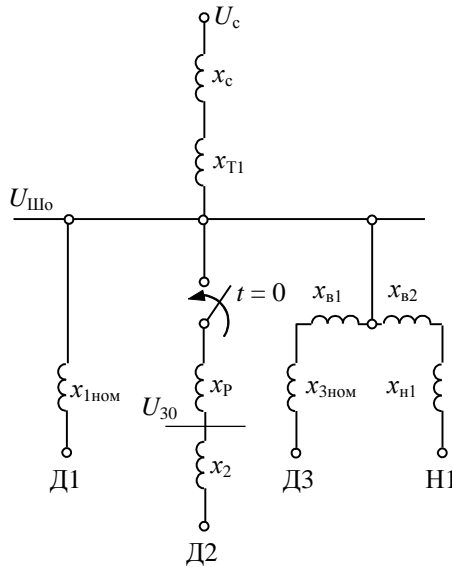


Рис. 17.9. Схема замещения при пуске электродвигателя Д2 через реактор

Так как величина $U_{\text{Ш0}} \approx 0,85$, то практически нет необходимости устанавливать реактор. В противном случае необходимое сопротивление реактора рассчитывается по формулам

$$x_{2\Sigma P} = \frac{0,85(x_c + x_{\text{T1}})}{U_c - 0,85} = \frac{0,85(0,22 + 0,46)}{1,05 - 0,85} = 2,89;$$

$$x_{P*} \geq \frac{x_{2\Sigma P}(x_{\text{э.н}} + x_2) - x_{\text{э.н}} \cdot x_2}{x_{\text{э.н}} - x_{2\Sigma P}} = \frac{2,89(18,1) - 15,2 \cdot 2,9}{12,3} = 0,67;$$

и в омах

$$x_P = x_{P*} \frac{U_6(\text{кВ})}{\sqrt{3}I_6(\text{кА})} = 0,67 \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 9,6} = 0,242 \text{ Ом.}$$

Эта величина служит для подбора необходимого реактора по каталогу: например, реактор РБГ10-630-0,25, $I = 630 \text{ А}$, $x = 0,25 \text{ Ом}$.

Сопrotивление выбранного к установке реактора переводится в относительные базисные единицы

$$x_{\text{Р.кат}} = x_{\text{Р.кат}}(\text{Ом}) \frac{\sqrt{3}I_6(\text{кА})}{U_6(\text{кВ})} = 0,25 \frac{\sqrt{3} \cdot 9,6}{6} = 0,69.$$

Тогда напряжение на зажимах электродвигателя (см. рис. 17.9) вычисляется так

$$U_{\text{Д0}} = 0,85 \frac{x_2}{x_2 + x_{\text{Р.кат}}} = \frac{0,85 \cdot 2,9}{2,9 + 0,69} = 0,68.$$

В этом случае пусковой момент электродвигателя равен

$$m_{\text{пуск}} = m_{\text{Д0}(n=0)} \cdot U_{\text{Д0}}^2 = 0,7 \cdot 0,68^2 = 0,32.$$

Пуск двигателя обеспечивается, так как выполняется условие

$$m_{\text{пуск}} \geq 1,1 \cdot m_{\text{н}}, \text{ т. е. } 0,32 > 0,11,$$

где $m_{\text{н}} = 0,1$ из графика рис. 17.6.

Проверка правильности выбора сдвоенного реактора по условию пуска асинхронного электродвигателя ДЗ

Схема замещения для этого расчета изображена на рис. 17.10. При пуске асинхронного электродвигателя токи, протекающие по ветвям сдвоенного реактора, будут иметь различную величину и, следовательно, реактивные сопротивления ветвей реактора, имеющих электрическую и индуктивную связь, будут различны.

Токораспределение в ветвях реактора можно найти из схемы замещения сдвоенного реактора «звезда» (см. рис. 17.11, а), для которой справедливо

$$x_0 = -k_c x_{0,5};$$

$$x_{\text{I}} = x_{\text{II}} = (1 + k_c) x_{0,5} = (1 + 0,5) 0,64 = 0,96.$$

Отношения токов в ветвях реактора при пуске электродвигателя можно найти из равенства, составленного для этой схемы

$$U_0 = (x_{\text{I}} + x_3) I_{\text{I}} = (x_{\text{II}} + x_{\text{н1}}) I_{\text{II}},$$

а именно

$$k_1 = \frac{I_{\text{I}}}{I_{\text{II}}} = \frac{x_{\text{II}} + x_{\text{н1}}}{x_{\text{I}} + x_3} = \frac{33,96}{3,86} = 8,8; \quad k_2 = \frac{1}{k_1} = 0,114.$$

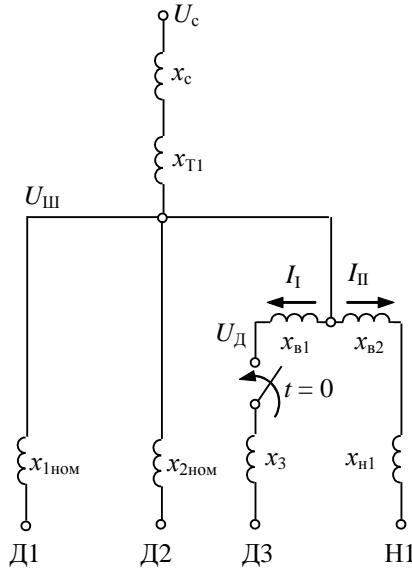


Рис. 17.10. Схема замещения при пуске электродвигателя Д3

Тогда реактивные сопротивления ветвей реактора при включении электродвигателя, согласно принятой в расчете схемы замещения сдвоенного реактора (рис. 17.11, б), определяются по формулам

$$x_{B11} = x_{0,5}(1 - k_2 k_c), \quad x_{B22} = x_{0,5}(1 - k_1 k_c),$$

$$x_{B11} = (1 - 0,5 \cdot 0,114)0,64 = 0,6, \quad x_{B22} = (1 - 0,5 \cdot 8,8)0,64 = -2,2.$$

Следовательно, эквивалентное реактивное сопротивление нагрузки, включенной на трансформатор по схеме замещения, изображенной на рис. 17.10, может быть определено так

$$x_{\text{э.н}} = \frac{1}{Y_{\text{э.н}}} = \frac{1}{0,068} = 14,7,$$

где $Y_{\text{э.н}} = Y_{1\text{НОМ}} + Y_{2\text{НОМ}} + Y_{\text{в.н1}}$ - суммарная реактивная проводимость эквивалентной нагрузки;

$$Y_{1\text{НОМ}} = \frac{1}{x_{1\text{НОМ}}} = \frac{1}{98} = 0,01; \quad Y_{2\text{НОМ}} = \frac{1}{x_{2\text{НОМ}}} = \frac{1}{39} = 0,026;$$

$$Y_{\text{в.н1}} = \frac{1}{x_{B22} + x_{\text{н1}}} = \frac{1}{-2,2 + 33} = 0,032.$$

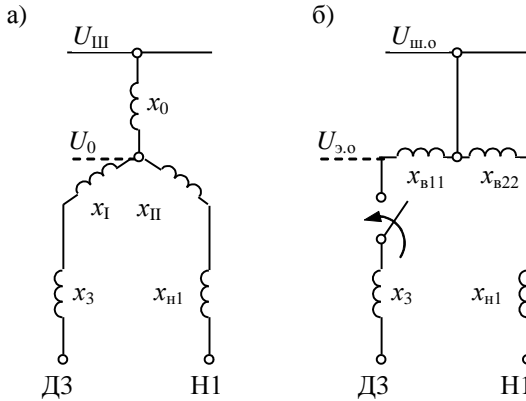


Рис. 17.11. Схема замещения двояного реактора

При пуске асинхронного электродвигателя Д3 общее сопротивление, включенное на трансформатор, равно

$$x_{3\Sigma} = \frac{(x_3 + x_{B11})x_{\text{э.н}}}{x_3 + x_{B11} + x_{\text{э.н}}} = \frac{(2,9 + 0,6)14,7}{18,2} = 2,83.$$

Остаточное напряжение на шинах секции при пуске электродвигателя

$$U_{\text{ш.о}} = \frac{x_{3\Sigma} \cdot U_c}{x_c + x_{T1} + x_{3\Sigma}} = \frac{2,83 \cdot 1,05}{0,22 + 0,46 + 2,83} = 0,85,$$

что удовлетворяет условию задачи.

Напряжение на зажимах электродвигателя при его пуске будет равно

$$U_{\text{до}} = \frac{x_3}{x_{B11} + x_3} U_{\text{ш.о}} = \frac{2,9 \cdot 0,85}{0,6 + 2,9} = 0,7$$

и, следовательно, пусковой момент

$$m_{\text{пуск}} = m_{(n=0)} \cdot U_{\text{до}}^2 = 0,7 \cdot 0,7^2 = 0,34.$$

Разгон электродвигателя обеспечивается, так как

$$m_{\text{пуск}} \geq 1,1m_{(n=0)}, \quad 0,34 > 0,11.$$

Двоянный реактор выбран правильно.

Определение возможности группового самозапуска электродвигателей секции I

При отключении секции шин от трансформатора устройство АВР через 1,5 с включает секционный выключатель и, тем самым обеспечивает питание этой секции от второго трансформатора (рис. 17.12). С момента отключения питания группа электроприводов Д1, Д2, Д3 начинает останавливаться.

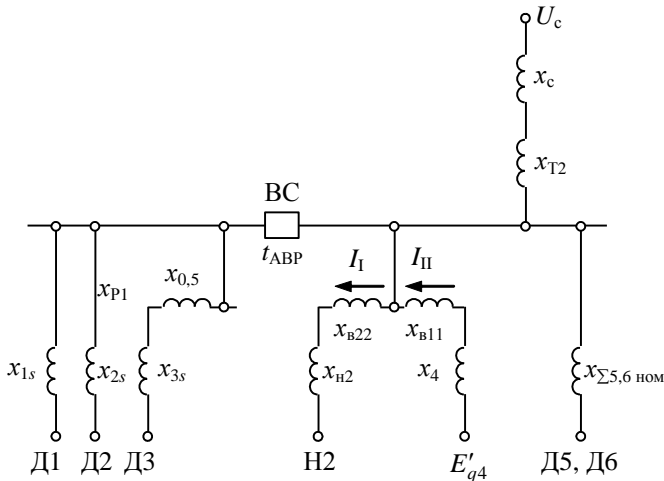


Рис. 17.12. Схема замещения при самозапуске электродвигателей

Выбег электродвигателей будет зависеть от механических постоянных времени, которые рассчитываются по формуле

$$T_{Д1} = \frac{(GD_{Д}^2 + GD_{мех}^2) n_{ном}^2}{365 \cdot 10^3 \cdot P_{ном}} = \frac{1,8 \cdot 0,3 \cdot 3000^2}{365 \cdot 10^3 \cdot 2} = 6,7 \text{ с,}$$

также $T_{Д2} = T_{Д3} = 6,6 \text{ с}$, где $GD_{мех}^2$ - маховый момент вращающихся частей рабочего механизма, $\text{т} \cdot \text{м}^2$; $P_{ном}$ - номинальная мощность электродвигателя, МВт.

Эквивалентная постоянная времени группы электроприводов равна

$$T_{Д\Sigma} = \frac{\Sigma(GD_i^2 \cdot n_{НОМ_i}^2)}{365 \cdot 10^3 \Sigma P_{НОМ_i}} = \frac{\Sigma(T_{Д_i} P_{НОМ_i})}{\Sigma P_{НОМ_i}} = \frac{6,7 \cdot 2 + 2(6,6 \cdot 5)}{12} = 6,6 \text{ с.}$$

Эквивалентный момент сопротивления механизмов

$$m_{с\Sigma} = \frac{\Sigma(k_{з_i} P_{НОМ_i})}{\Sigma P_{НОМ_i}} = \frac{1 \cdot 2 + 2(1 \cdot 5)}{12} = 1.$$

За время перерыва питания $t_{АВР} = 1,5$ с электродвигатели при групповом выбеге достигнут скольжения

$$s_0 = \frac{m_{с\Sigma}}{T_{Д\Sigma}} t_{АВР} = \frac{1}{6,6} 1,5 = 0,23.$$

По этой величине скольжения по рис. 17.6 определяется ток двигателей при самозапуске

$$I_{1s} = I_{2s} = I_{3s} = 4,7.$$

Реактивные сопротивления электродвигателей при самозапуске рассчитываются по формуле

$$x_{1s} = \frac{1}{I_{1s}} \frac{S_6}{S_{Д1}} \left(\frac{U_{Д}}{U_6} \right)^2 = \frac{1}{4,7} \frac{100}{2,3} \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 9,2, \text{ также } x_{2s} = x_{3s} = 3,7.$$

Схема замещения принимает вид, изображенный на рис. 17.13, а. Общее сопротивление группы электродвигателей секции 1 при самозапуске в момент включения секционного выключателя равно

$$x_{\Sigma s} = \frac{1}{Y_{\Sigma s}} = \frac{1}{0,61} = 1,64,$$

где

$$Y_{\Sigma s} = \frac{1}{x_{1s}} + \frac{1}{x_{2s}} + \frac{1}{x_{p3s}} = 0,61;$$

$$x_{1s} = 9,2; \quad x_{2s} = 3,7; \quad x_{3s} = 3,7;$$

$$x_{p3s} = x_{0,5} + x_{3s} = 0,64 + 3,7 = 4,34.$$

Синхронный электродвигатель Д4 при самозапуске электродвигателей секции I будет являться источником ЭДС с внутренним сопротивлением

$$x_4 = \frac{x'_d}{100} \frac{S_6}{S_{Д4}} \left(\frac{U_{Д}}{U_6} \right)^2 = \frac{15 \cdot 100}{100 \cdot 4,6} \left(\frac{6}{6} \right)^2 = 3,26.$$

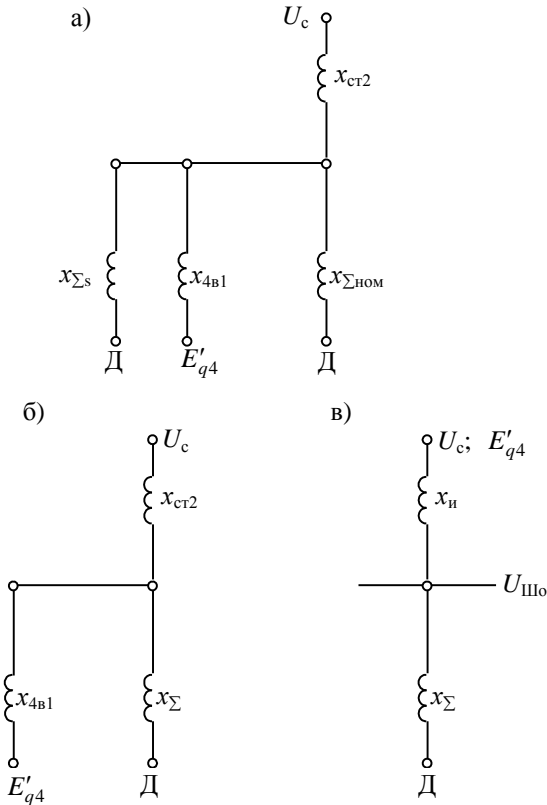


Рис. 17.13. Схемы замещения

При включении секции 1 на шины секции 2 через промежуток времени $t_{\text{ДВР}}$ напряжение на шинах резко снизится, так как при самозапуске рассматриваемой группы электродвигателей большой ток обусловит падение напряжения на сопротивлениях системы x_c и трансформатора x_{T2} . По этой причине синхронный электродвигатель превращается в источник ЭДС, посылающий ток к шинам подстанции.

Токораспределение в ветвях сдвоенного реактора секции 2 определяется по формулам, аналогичным предыдущим для рис. 17.11, но с учетом согласного направления токов в ветвях реактора (см. рис. 17.12) вследствие изменения направления тока синхронного электродвигателя, т. е.

$$k_1 = \frac{x_{11} + x_{н2}}{x_1 + x_4} = \frac{0,96 + 33}{0,96 + 3,26} = 8; \quad k_2 = \frac{1}{K_1} = 0,125.$$

Тогда сопротивления ветвей

$$x_{в11} = (1 + k_c k_2) x_{0,5} = (1 + 0,5 \cdot 0,125) 0,64 = 0,69; \\ x_{в22} = (1 + k_c k_1) x_{0,5} = 3,25.$$

Общее сопротивление асинхронных электродвигателей секции 2 и сопротивление нагрузки Н2 в соответствии со схемой замещения (рис. 17.13, а) равно

$$x_{\Sigma\text{НОМ}} = \frac{1}{Y_{\Sigma\text{НОМ}}} = \frac{1}{0,0635} = 15,8,$$

где

$$Y_{\Sigma\text{НОМ}} = \frac{1}{x_{5\text{НОМ}}} + \frac{1}{x_{6\text{НОМ}}} + \frac{1}{x_{в.н2}} = 0,0635;$$

$$x_{5\text{НОМ}} = 39; \quad x_{6\text{НОМ}} = 98; \quad x_{в.н2} = x_{в22} + x_{н2} = 3,25 + 33 = 36,25.$$

Полное сопротивление электродвигателей и нагрузки, включенное на шины секции 2 с момента срабатывания выключателя ВС (рис. 17.13, б), определится так

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{\Sigma s} x_{\Sigma\text{НОМ}}}{x_{\Sigma s} + x_{\Sigma\text{НОМ}}} = \frac{1,64 \cdot 15,8}{1,64 + 15,8} = 1,49.$$

Так как величины $U_c = 1,05$ и $E'_{q4} = 1,05$ постоянны и равны между собой, то сопротивление от этих источников энергии до шин равно (рис. 17.13, в)

$$x_{н} = \frac{x_{сГ2} x_{4в1}}{x_{сГ2} + x_{4в1}} = \frac{0,68 \cdot 3,95}{0,68 + 3,95} = 0,58,$$

где $x_{сГ2} = x_c + x_{т2}$; $x_{4в1} = x_4 + x_{в11} = 3,26 + 0,69 = 3,95$.

Напряжение на шинах при групповом самозапуске электродвигателей секции 1 вычисляется так

$$U_{Ш0} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{\Sigma} + x_{н}} U_c = \frac{1,49 \cdot 1,05}{2,07} = 0,76.$$

Напряжение на зажимах асинхронного электродвигателя Д3, включенного через реактор, определяется следующим образом:

$$U_{Д3} = \frac{x_{3s}}{x_{3s} + x_{0,5}} U_{Ш0} = \frac{3,7 \cdot 0,76}{3,7 + 0,64} = 0,65 \text{ (см. рис. 17.12).}$$

Вращающие моменты на валах двигателей при скольжении $s_0 = 0,23$ определяются по графику рис. 17.6: $m_{s0} = 1,41$ для $U_{\text{НОМ}}$.

Для рассчитанных напряжений по формуле

$$m_s = m_{s0} U^2$$

имеем:

$$m_{Д1s} = 1,41 \cdot 0,76^2 = 0,81; m_{Д2s} = 1,41 \cdot 0,76^2 = 0,81;$$

$$m_{Д3s} = 1,41 \cdot 0,65^2 = 0,6.$$

Для скольжения $s_0 = 0,23$ момент сопротивления на валах двигателей равен 0,62. Следовательно, условия надежного самозапуска

$$m_{Д} > 1,1 m_{н}$$

двигатели Д1, Д2 имеют, так как $0,81 > 0,68$;

двигатель Д3 в групповом самозапуске не участвует, поскольку $m_{Д3} = 0,6 < m_{н} = 0,68$.

§ 17.3. Снижение, «провал» напряжения на шинах генератора и изменение тока при пуске электродвигателя, соизмеримого по мощности с генератором

Переходные процессы при пуске электродвигателя от синхронного генератора соизмеримой мощности должны рассматриваться на основе уравнений Парка-Горева, так как электромагнитным переходным процессом в генераторе нельзя пренебречь. Величина снижения напряжения на шинах и величина тока при пуске электродвигателя будут зависеть от изменения ЭДС генератора.

Современные генераторы автономных электростанций оснащаются автоматическим регулированием напряжения в виде системы амплитудно-фазового компаундирования (рис. 17.14).

У ненагруженного генератора его номинальное напряжение поддерживается за счет отбора мощности на обмотку возбуждения по каналу трансформатора напряжения, трансформатора суммирующего и блока выпрямителей. По мере увеличения нагрузки генератора увеличивается отбор мощности на возбуждение по каналу трансформатора тока, причем изменение возбуждения генератора с изменением тока и коэффициента мощности нагрузки происходит так, что обеспечивается поддержание напряжения генератора на уровне номинального значения.

Система амплитудно-фазового компаундирования (или саморегулирования) обеспечит при внезапном изменении нагрузки, в том числе и при пуске электродвигателя, практически мгновенное увеличение возбуждения, как показано на рис. 17.15.

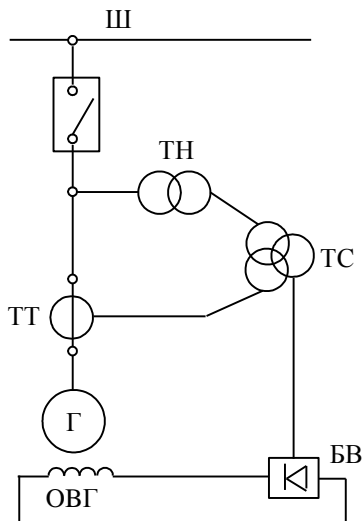


Рис. 17.14. Принципиальная схема генератора с амплитудно-фазовым компаундированием:

Г – генератор синхронный; ОВГ – обмотка возбуждения генератора; БВ – блок выпрямителей; ТТ, ТН, ТС – соответственно трансформаторы тока, напряжения, суммирующий; Ш – шины

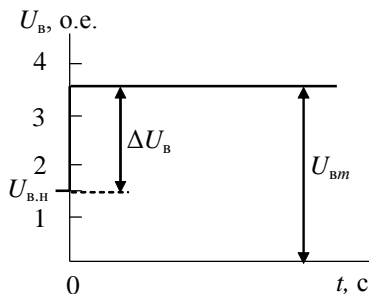


Рис. 17.15. График изменения возбуждения U_B генератора с амплитудно-фазовым компаундированием:

$U_{B.H}$, $U_{B.m}$ - напряжение возбуждения до пуска двигателя и максимальное (потолочное) возбуждение соответственно

Аналитическая зависимость такого скачкообразного изменения возбуждения может быть описана функцией

$$U_{\text{в}}(t) = U_{\text{в.н}} + \Delta U_{\text{в}} \cdot 1(t). \quad (17.9)$$

При рассмотрении переходного процесса генератора при пуске электродвигателя последний может быть представлен в схеме замещения, как и в предыдущем параграфе, постоянным индуктивным сопротивлением $x_{\text{Д}}$, величина которого в относительных генераторных единицах вычисляется так

$$x_{\text{Д}} = \frac{S_{\text{Г}} \eta_{\text{Д}} \cos \varphi_{\text{Д}}}{k_i P_{\text{Д}}} \left(\frac{U_{\text{Д.ном}}}{U_{\text{Г.ном}}} \right)^2, \quad (17.10)$$

где $S_{\text{Г}}$, $P_{\text{Д}}$ - соответственно полная мощность генератора, МВ·А (или кВ·А), и электродвигателя, МВт (или кВт); $U_{\text{Г.ном}}$, $U_{\text{Д.ном}}$ - номинальные напряжения генератора и электродвигателя, кВ (или В); k_i , $\eta_{\text{Д}}$, $\cos \varphi_{\text{Д}}$ - соответственно кратность пускового тока, КПД и коэффициент мощности электродвигателя.

Кроме того, принимаются следующие допущения и условия:
частота вращения ротора генератора постоянна;

активное сопротивление генератора равно нулю и, следовательно, поперечные составляющие тока и потокосцепления также равны нулю; демпферных обмоток генератор не имеет.

Режимы пуска от генератора электродвигателя, индуктивное сопротивление которого $x_{\text{Д}}$ принимается постоянным, можно рассматривать, как режим удаленного короткого замыкания генератора, т. е. как режим к.з. за внешним сопротивлением $x_{\text{Д}}$. Тогда можно воспользоваться уравнениями Парка-Горева, составленными для вышеуказанного режима с учетом того, что напряжение на зажимах генератора соответствует напряжению на зажимах пускаемого электродвигателя

$$U_q = x_{\text{Д}} i_d. \quad (17.11)$$

Составляющая напряжения по продольной оси

$$U_d = x_{\text{Д}} i_q = 0,$$

так как в цепи с индуктивным сопротивлением $i_q = 0$.

Уравнения в § 16.3 отражают переходный процесс генератора, оснащенного устройством форсировки, действующим с запаздыванием τ . В данном же случае можно считать, что генератор также имеет форсировку поля, но без запаздывания. Тогда указанные уравнения Парка-Горева с учетом формул (17.9) и (17.11) запишутся так [27]

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_c} \frac{d\psi_d}{dt} &= 0; \\ \psi_d &= x_{dD} i_d = U_q; \\ T_{d0} \frac{d\psi_B}{dt} + i_B &= U_{в.н} + \Delta U_B 1(t); \\ \psi_d &= -x_d i_d + i_B; \\ \psi_B &= -(x_d - x'_d) i_d + i_B. \end{aligned} \right\} \quad (17.12)$$

Решая совместно второе, четвертое и пятое равенства в этой системе уравнений, найдем

$$i_B = x_{dD} i_d; \quad \psi_B = x'_{dD} i_d, \quad (17.13)$$

где $x_{dD} = x_d + x_{dD}$; $x'_{dD} = x'_d + x_{dD}$.

Подставляя полученные величины в третье уравнение (17.12), получим

$$T_{d0} x'_{dD} \frac{di_d}{dt} + x_{dD} i_d = U_{в.н} + \Delta U_B 1(t).$$

После подстановки $i_d = U_q / x_{dD}$, деления всех членов на произведение $T_{d0} x'_{dD}$ и после введения условных обозначений

$$\alpha = \frac{1}{T'_{dD}}; \quad T'_{dD} = T_{d0} \frac{x'_{dD}}{x_{dD}}, \quad (17.14)$$

где T'_{dD} - постоянная времени обмотки ротора при замкнутой обмотке статора через внешнее сопротивление накоротко, имеем

$$\frac{dU_q}{dt} + \alpha U_q = \alpha \frac{x_{dD}}{x_{dD}} [U_{в.н} + \Delta U_B 1(t)]. \quad (17.15)$$

Прямое преобразование Лапласа этого уравнения дает

$$U_q(s) = \frac{U_q(0)}{s + \alpha} + \frac{x_{dD}}{x_{dD}} [U_{в.н} + \Delta U_B] \frac{\alpha}{s(s + \alpha)}.$$

Здесь $U_q(0)$ - начальное напряжение на шинах (зажимах генератора) в момент включения электродвигателя в соответствии с уравнением (17.11)

$$U_q(0) = x_{dD} i_d(0). \quad (17.16)$$

Величина $i_d(0)$ определяется на основе принципа постоянства результирующих потокосцеплений в воздушном зазоре машины в момент нарушения режима. Из формул (17.13) следует, что

$$\Psi_{\text{в}}(0) = x'_{dД} i_d(0) = \text{const},$$

а поскольку $\Psi_{\text{в}}(0) = E'_q$ - см. формулу (15.17) - то $i_d(0) = E'_q / x'_{dД}$. Следовательно, из выражения (17.16) получим расчетную формулу

$$U_{q0} = \frac{x_{Д}}{x'_{dД}} E'_q. \quad (17.17)$$

Возвращаясь к решению уравнения переходного процесса (17.15), по таблице соответствий 1.1 и после преобразований запишем

$$U_q(t) = U_{q\infty} - \Delta U_{q0} e^{-\frac{t}{T'_{dД}}}, \quad (17.18)$$

где $U_{q\infty} = \frac{x_{Д}}{x_{dД}} U_{\text{вн}}$ - величина напряжения после окончания переходного процесса генератора при «пусковом» сопротивлении двигателя; $\Delta U_{q0} = U_{q\infty} - U_{q0}$ - «провал» напряжения генератора при пуске электродвигателя.

На рис. 17.16 приведены графики изменения напряжения U_q и тока i_d генератора при пуске асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, построенные по формулам (17.18) и (17.11) для «пускового» сопротивления электродвигателя.

При разгоне двигателя его сопротивление увеличивается, а система амплитудно-фазового компаундирования рассчитана так, что в статическом режиме поддерживает напряжение генератора на уровне номинального напряжения $U_{q\infty} = U_{q\text{ном}} = 1$, поэтому формула (17.18) должна быть записана так

$$U_q(t) = 1 - \Delta U_{q0} e^{-\frac{t}{T'_{dД}}}, \quad (17.19)$$

где

$$\Delta U_{q0} = 1 - U_{q0}. \quad (17.20)$$

Изменение тока генератора при пуске электродвигателя можно определить на основе зависимостей (17.11) и (17.19)

$$i_d(t) = \frac{1}{x_{Д}} U_q(t). \quad (17.21)$$

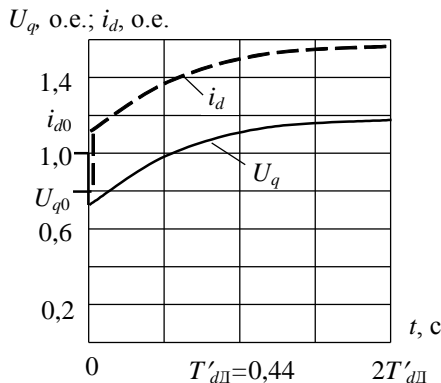


Рис. 17.16. Графики изменения составляющих напряжения и тока генератора МСД-500 мощностью 500 кВт при пуске асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором АМ-32-2 мощностью 150 кВт

Напряжение U и ток I в фазе генератора изменяются в соответствии с формулами (17.19) и (17.21). Графики изменения фазного напряжения и тока для генератора при пуске электродвигателя построены на рис. 17.17.

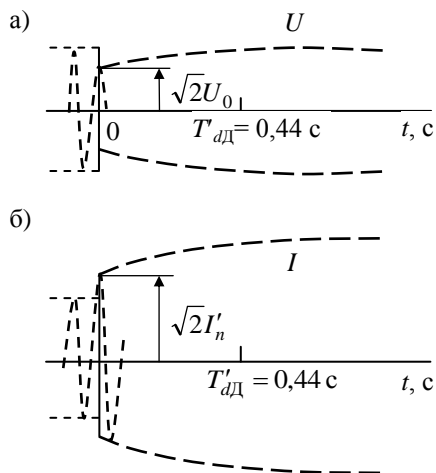


Рис. 17.17. Изменение напряжения (а) и тока (б) в фазе генератора МСД-500 при пуске электродвигателя АМ-32-2

Следует заметить, что в общем случае переходные процессы в синхронном генераторе при пуске электродвигателя соизмеримой мощности должны рассматриваться с учетом влияния изменения частоты вращения генератора [27].

Расчет изменения напряжения синхронного генератора при пуске асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором соизмеримой мощности

Расчет производится по формуле (17.19) для постоянной частоты вращения генератора, оснащенного системой амплитудно-фазового компаундирования. Параметры дизель-генератора СГД-13-42-12 мощностью 320 кВт и электродвигателя АОП2-82-4 мощностью 55 кВт помещены в табл. 17.1.

Принимается, что генератор до пуска электродвигателя был нагружен на 80 % при $\cos \varphi = 0,85$. ЭДС при этом равна (см. формулу (13.10))

$$E'_q = \frac{x'_d x_{qH} + r_H^2}{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_H^2}} U_{ном} = \frac{0,975 \cdot 1,7 + 1,06^2}{1,25 \sqrt{1,7^2 + 1,06^2}} 1 = 1,08,$$

где $z_H = 1,25$,

$$r_H = z_H \cos \varphi_H = 1,25 \cdot 0,85 = 1,06, \quad x_H = z_H \sin \varphi = 1,25 \cdot 0,53 = 0,66,$$

$$x'_{dH} = x'_d + x_H = 0,315 + 0,66 = 0,975, \quad x_{qH} = x_q + x_H = 1,05 + 0,66 = 1,7.$$

Таблица 17.1

Показатели	Генератор	Электродвигатель
Мощность, кВт	320	55
Напряжение, В	400	380
Сила тока, А	578	102
Частота вращения, об/мин	500	1470
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,8	0,89
КПД, η	0,916	0,92
Параметры	$T_{d0} = 1,11$ с $x_d = 1,68$ $x'_d = 0,315$ $x_q = 1,05$ $x''_d = 0,217$	$k_i = 7,5$ $s_k = 0,26$ $\cos \varphi_{пуск} = 0,51$

Напряжение в момент включения электродвигателя по формуле (17.17)

$$U_{q0} = \frac{x_D}{x'_{dD}} E'_q = \frac{0,6}{0,92} 1,08 = 0,7,$$

где индуктивное сопротивление электродвигателя при пуске

$$x_D = z_D \sin \varphi_{\text{пуск}} = 0,7 \cdot 0,86 = 0,6,$$

$$z_D = \frac{P_r \eta_D \cos \varphi_D}{k_i P_D \cos \varphi_r} \left(\frac{U_D}{U_r} \right)^2 = \frac{320 \cdot 0,92 \cdot 0,89}{7,5 \cdot 55 \cdot 0,8} \left(\frac{380}{400} \right)^2 = 0,7.$$

«Провал» напряжения в момент включения электродвигателя

$$\Delta U_{q0} = 1 - U_{q0} = 0,3.$$

Постоянная времени обмотки ротора генератора при пуске электродвигателя

$$T'_{dD} = \frac{x'_{dD}}{x_{dD}} T_{d0} = \frac{0,92}{2,3} 1,11 = 0,44 \text{ с.}$$

После подстановки численных значений расчетная формула (17.19) принимает вид

$$U_q(t) = 1 - 0,3 e^{-\frac{t}{0,44}}.$$

График изменения напряжения по этой зависимости построен на рис. 17.18.

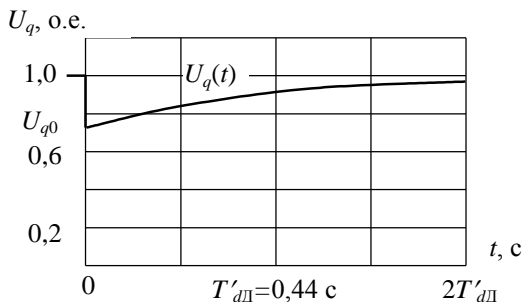


Рис. 17.18. График изменения напряжения генератора с амплитудно-фазовым компаундированием при пуске асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

При пуске электродвигателя, мощность которого превышает 25 % номинальной мощности генератора, расчет необходимо производить с учетом снижения частоты вращения генератора [27].

§ 17.4. Колебания напряжения на шинах автономного генератора при цикличном графике нагрузки

Циклический график нагрузки (рис. 17.19, а) имеет место при работе достаточно большого количества грузоподъемных кранов, при работе сварочных агрегатов и т.п. График нагрузки может по времени характеризоваться циклом, состоящим из рабочего периода $0-t_1$ и паузы t_1-t_2 ; в момент времени $t = 0$ происходит включение, а в момент t_1 – отключение нагрузки. Можно ожидать, что характер изменения напряжения генератора будет подобен графику рис. 17.19, б.

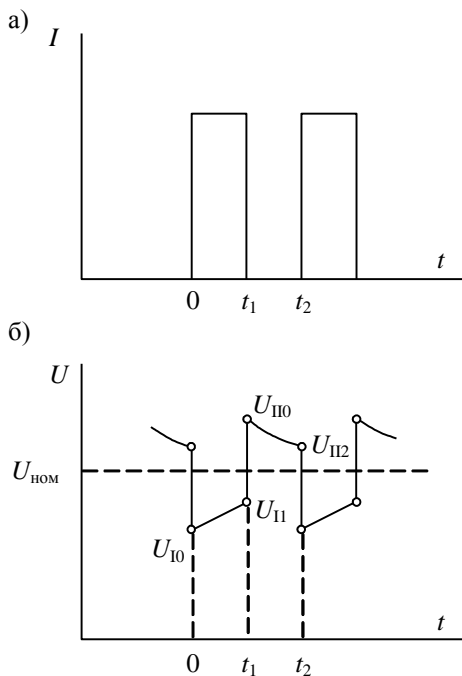


Рис. 17.19. Графики циклической нагрузки (а) и изменения напряжения генератора с саморегулированием (б)

Изменения напряжения можно рассчитать при помощи уравнения (17.15), отдельно рассматривая включение и отключение реактивной нагрузки.

Для случая нагрузки, имеющей не только реактивную составляющую, но и активную, дифференциальное уравнение, описывающее изменение напряжения генератора, имеет вид (см. формулу (14.16))

$$\frac{du}{dt} + k_2 u = k_1 U_{в1} 1(t), \quad (17.22)$$

где

$$k_1 = \frac{\xi'}{T_{d0}}; \quad k_2 = \frac{\xi'}{\xi T_{d0}}; \quad (17.23)$$

$$\xi = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2}; \quad \xi' = \frac{z_H \sqrt{x_{qH}^2 + r_{aH}^2}}{x'_{dH} x_{qH} + r_{aH}^2}; \quad (17.24)$$

x_d, x_q, r_a - параметры генератора; z_H, x_H, r_H - параметры нагрузки; $1(t)$ - единичная функция времени.

Способ последовательного вычисления напряжения при включении и отключении нагрузки исключает возможность исследования процесса в общем виде.

Задача может быть решена при помощи введения в исходное уравнение второй независимости переменной в виде ступенчатой функции, разделяющей время на ряд последовательных интервалов [27].

Переходный режим синхронного генератора с саморегулированием при циклическом изменении нагрузки с учетом принятых условий будет определяться системой двух дифференциальных уравнений соответственно для первой и второй части цикла по формуле (17.22)

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_I + k_{2I} U_I &= k_{1I} U_{вI} 1(t) \quad \text{для } 0 \leq t \leq t_1; \\ \dot{U}_{II} + k_{2II} U_{II} &= k_{1II} U_{вII} 1(t - t_1) \quad \text{для } t_1 \leq t \leq t_2. \end{aligned} \right\} \quad (17.25)$$

Единичная функция $1(t)$ характеризует скачкообразное изменение напряжения возбуждения генератора в первой части цикла, а единичная функция запаздывания $1(t - t_1)$ - во второй части цикла, через интервал времени t_1 . Прямое преобразование по Лапласу составленной системы уравнений дает

$$sU_I(s) - U_I(0) + k_{2I}U_I(s) = k_{1I} \frac{U_{BI}}{s};$$

$$sU_{II}(s) - U_{II}(0) + k_{2II}U_{II}(s) = k_{1II} \frac{U_{BII}}{s} e^{-t_1 s}.$$

Решая эти уравнения относительно напряжения при помощи обратного \mathcal{L} -преобразования, получаем

$$\left. \begin{aligned} U_I(t) &= U_{BI} \frac{k_{1I}}{k_{2I}} \left(1 - e^{-k_{2I}t}\right) + U_{I0} e^{-k_{2I}t} \quad \text{для } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_{II}(t) &= U_{BII} \frac{k_{1II}}{k_{2II}} \left(1 - e^{-k_{2II}(t-t_1)}\right) + U_{II0} e^{-k_{2II}(t-t_1)} \quad \text{для } t_1 \leq t \leq t_2. \end{aligned} \right\} (17.26)$$

Определение начальных условий, т. е. первоначальных значений напряжений, например, во время пика нагрузки и паузы, основывается на постоянстве величины ЭДС за переходным продольным индуктивным сопротивлением генератора в момент нарушения предшествующего режима

$$U_{I0} = \xi'_I E'_{qI}, \quad (17.27)$$

где значение $E'_{qI} = 1$ для ненагруженной машины, а для машины, несущей нагрузку z_I , при номинальном напряжении по формуле (13.10)

$$E'_{qI} = \frac{1}{\xi'_I} = \frac{x'_{dI} x_{qI} + r_{dI}^2}{z_I \sqrt{x_{qI}^2 + r_{dI}^2}}. \quad (17.28)$$

Коэффициент ξ'_I включает в себя параметр x'_d , который полностью будет характеризовать переходный процесс синхронного генератора, особенно в случае наложения переходных процессов друг на друга, когда свободный ток в цепи ротора генератора постоянно поддерживается ударным возбуждением от системы саморегулирования и действие реакции якоря не проявляется в большей мере, чем это определяется указанным сопротивлением машины.

Изменение напряжения генератора в первой части цикла, как установлено, подчиняется первому уравнению системы (17.26). Если в течение этого переходного процесса происходит изменение нагрузки в момент t_1 , то отклонение напряжения U_{II0} также определяется формулой, подобной (17.27),

$$U_{II0} = \xi'_{II} E'_{qII}, \quad (17.29)$$

где коэффициент ξ'_{II} характеризует оставшуюся нагрузку (при полном ее отключении он равен единице), а величина ЭДС E'_{qII} соответствует значению напряжения в момент коммутации

$$E'_{qII} = \frac{U_{II}}{\xi'_I}. \quad (17.30)$$

Линейная зависимость между напряжением на клеммах генератора и ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением сохраняется для случаев включения индуктивной нагрузки, но при отключении, в соответствии с кривой намагничивания, она искажается, и это искажение тем больше, чем больше был предварительно нагружен генератор.

Учитывая, что имеет место соотношение

$$U = \xi E_q = \xi' E'_q$$

и ЭДС E_q пропорциональна току возбуждения генератора, кривую намагничивания можно представить в координатах U, E'_q , как показано на рис 17.20.

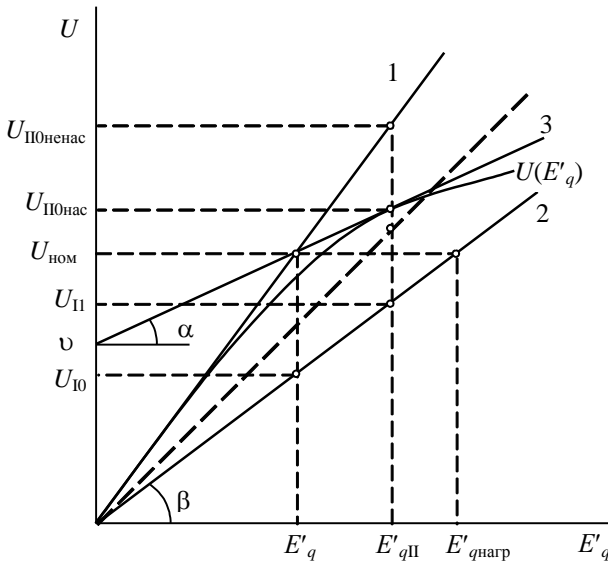


Рис. 17.20. Графики зависимости напряжения генератора от ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением

Реальная характеристика намагничивания в пределах изменения напряжения генератора от нуля до номинального значения заменяется прямой линией 1. Эта прямая в данном случае отражает изменение напряжения ненагруженного генератора в функции ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением. Для нагруженного генератора такая зависимость будет определяться прямой 2 – лучом нагрузки, угол наклона которого зависит от нагрузки генератора

$$\beta = \arctg \frac{U_{\text{ном}}}{E'_{d \text{ нагр}}} = \arctg \xi'_{\text{нагр}}.$$

Из рис. 17.20 видно, что при включении на ненагруженный генератор нагрузки, характеризуемой углом наклона луча 2, напряжение скачком снижается от номинального значения $U_{\text{ном}}$ до значения U_{10} . Затем под влиянием системы возбуждения ЭДС и напряжение машины возрастают в соответствии с характеристикой 2. Если в момент t_1 , когда напряжение достигло величины U_{11} , происходит полное отключение нагрузки, то напряжение скачком должно возрасти до значения $U_{\text{II}0 \text{ ненас}}$. Как видно из рисунка, «заброс» напряжения в этом случае значительно превосходит действительное значение $U_{\text{II}0 \text{ нас}}$, определяемое реальной характеристикой намагничивания.

Величина напряжения на клеммах генератора с учетом насыщения его стали для случая отключения нагрузки может быть найдена при помощи аппроксимации нелинейной части кривой намагничивания прямой 3, как показано на рис. 17.20. Находим

$$U_{\text{II}0} = \upsilon + k_{\upsilon} E'_{q \text{ II}}$$

или, подставляя значения $E'_{q \text{ II}}$ из формулы (17.30),

$$U_{\text{II}0} = \upsilon + \frac{k_{\upsilon}}{\xi'_1} U_{11}, \quad (17.31)$$

где υ и $k_{\upsilon} = \text{tg} \alpha$ - начальная ордината и угловой коэффициент аппроксимирующей прямой.

В данной формуле напряжение на клеммах генератора в момент отключения нагрузки определяется первым уравнением (17.26) для момента времени t_1 , т. е. $U_{\text{II}} = U_{\text{I}}(t_1)$. При этом в случае неполного отключения нагрузки, когда луч, показанный на рис. 17.20 штриховой линией, располагается ниже кривой намагничивания, напряжение $U_{\text{II}0}$

определяется по этому лучу, и тогда коэффициенты в формуле (17.31) принимают значение $\upsilon = 0$, $k_{\upsilon} \equiv \xi'_{II}$.

Вышеизложенные пояснения позволяют представить систему уравнений (17.26) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} U_I(t) &= U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{21}t}\right) + U_{I0} e^{-k_{21}t} \quad \text{для } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_{II}(t) &= U_{вII} \xi_{II} \left(1 - e^{-k_{2II}(t-t_1)}\right) + \\ &+ \left[\upsilon + \frac{k_{\upsilon}}{\xi'_I} U_I(t_1) \right] e^{-k_{2II}(t-t_1)} \quad \text{для } t_1 \leq t \leq t_2. \end{aligned} \right\} \quad (17.32)$$

Взаимосвязь между переходными процессами в предыдущем и последующем циклах можно установить при помощи следующих соображений. Если первоначальное напряжение в момент включения нагрузки, определяемое равенством (17.27), вычислить, исходя из предположения, что включение нагрузки происходит вслед за отключением, т. е. рассматривать $(q+1)$ -й цикл включения и отключения нагрузки, то получим

$$U_{I0}(q+1) = \xi'_I E'_{qI}(q+1). \quad (17.33)$$

Значение ЭДС в этом цикле подобно (17.30) определяется по параметрам предыдущего цикла

$$E'_{qI}(q+1) = \frac{1}{\xi'_{II}} U_{II}(q),$$

где $U_{II}(q)$ - напряжение на клеммах генератора в конце q -го цикла в момент изменения нагрузки.

Тогда выражение (17.33) примет вид

$$U_{I0}(q+1) = \frac{\xi'_I}{\xi'_{II}} U_{II}(q). \quad (17.34)$$

Напряжение на клеммах генератора в конце q -го цикла равно

$$U_{II}(q) = U_{II}(t_2).$$

С учетом этого равенства соотношение (17.34) для момента времени t_2 можно записать

$$U_{I0}(q+1) = \frac{\xi'_I}{\xi'_{II}} U_{II}(t_2)$$

или в развернутом виде с подстановкой выражений (17.32)

$$U_{10}(q+1) = U_{вII} \xi_{II} \frac{\xi'_I}{\xi_{II}} \left(1 - e^{-k_{2II}(t_2 - t_1)}\right) + \frac{1}{\xi'_{II}} \left[\nu \xi'_I + k_{\nu} U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{2I} t_1}\right) + k_{\nu} e^{-k_{2I} t} U_{10}(q) \right] e^{-k_{2II}(t_2 - t_1)}.$$

Так как это равенство относительно независимого аргумента t полностью определено, можно представить его в виде следующего разностного уравнения первого порядка:

$$U_{10}(q+1) - a U_{10}(q) = b, \quad (17.35)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{k_{\nu}}{\xi'_{II}} e^{-k_{2I} t_1} e^{-k_{2II}(t_2 - t_1)}; \\ b &= \frac{1}{\xi'_{II}} \left\{ U_{вII} \xi_{II} \xi'_I \left(1 - e^{-k_{2II}(t_2 - t_1)}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \left[\nu \xi'_I + k_{\nu} U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{2I} t_1}\right) \right] e^{-k_{2II}(t_2 - t_1)} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (17.36)$$

Зависимость $U_{10}(q)$ определена для целых значений q , но ее можно определить для любого q в виде ступенчатой функции, точки которой совпадают с точками рассматриваемой зависимости. Эту заменяющую ступенчатую функцию $\lceil U_{10}(q)$ легко найти из равенства, соответствующего разностному уравнению (17.35),

$$\lceil U_{10}(q+1) - a \lceil U_{10}(q) = b. \quad (17.37)$$

Применяя к этому уравнению прямое преобразование Лапласа, на основании теоремы смещения ступенчатой функции (см. табл. 1.1) можно получить

$$e^s [U_{10}(s) - U_0 p(s)] - a U_{10}(s) = b \frac{e^s p(s)}{e^s - 1}$$

или

$$U_{10}(s) = \frac{b e^s p(s)}{(e^s - 1)(e^s - a)} + U_0 \frac{e^s p(s)}{e^s - a},$$

где $p(s)$ - изображение единичного импульса $p(q) = 1(q) - 1(q-1)$; $U_0 = U_{10}(0)$ - начальное значение функции $U_{10}(q)$ (см. табл. 1.1).

Искомая ступенчатая функция определяется из этого ее изображения при помощи обратного \mathcal{L} -преобразования, а именно

$$\int U_{I0}(q) = b \int \frac{a^q - 1}{a - 1} + U_0 \int a^q \text{ при } q \geq 0. \quad (17.38)$$

Располагая значением первоначального напряжения на клеммах генератора для q -го цикла изменения нагрузки, можно получить выражения законов нарастания и убывания напряжения, определяемых уравнениями (17.32) для любого цикла изменения нагрузки. Подстановка найденной ступенчатой функции в указанные уравнения дает

$$\left. \begin{aligned} U_I(t) &= U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{2I}t} \right) + \left(b \frac{a^q - 1}{a - 1} + U_0 a^q \right) e^{-k_{2I}t} \\ \text{для } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_{II}(t) &= U_{вII} \xi_{II} \left(1 - e^{-k_{2II}(t-t_1)} \right) + \left\{ U + \frac{k_v}{\xi_I} \left[U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{2I}t_1} \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(b \frac{a^q - 1}{a - 1} + U_0 a^q \right) e^{-k_{2I}t_1} \right] \right\} e^{-k_{2II}(t-t_1)} \\ \text{для } t_1 \leq t \leq t_2. \end{aligned} \right\} \quad (17.39)$$

В этой системе уравнений величина q является второй независимой переменной, и поэтому уравнения отражают процесс изменения напряжения на клеммах генератора как во время его установления, так и после достижения установившегося состояния. По мере следования циклов изменения нагрузки друг за другом переходный процесс генератора от цикла к циклу приближается к установившемуся состоянию и достигает его, когда число циклов достаточно велико.

Ориентировочное число циклов, по прошествии которых можно считать переходный процесс генератора установившимся, определяется неравенством $a^q \ll 1$, т. е.

$$\left[\frac{k_v}{\xi_{II}' e^{k_{2I}t_1} e^{k_{2II}(t_2-t_1)}} \right]^q \ll 1. \quad (17.40)$$

Установившийся переходный процесс, наступает когда число циклов q изменения нагрузки велико, и характеризуется равенством

$$\lim_{q \rightarrow \infty} \left[\frac{k_v}{\xi_{II}' e^{k_{2I}t_1} e^{k_{2II}(t_2-t_1)}} \right]^q = 0,$$

ибо, как следует из рис. 17.20, всегда имеет место $\text{tg } \alpha \leq \text{tg } \beta$, т. е. $k_v \leq \xi_{II}'$.

Следовательно, установившийся переходный процесс синхронного генератора при цикличном изменении нагрузки для постоянной скорости вращения описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_I(t) &= U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{2I}t}\right) - \frac{b}{a-1} e^{-k_{2I}t} \text{ для } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_{II}(t) &= U_{вII} \xi_{II} \left(1 - e^{-k_{2II}(t-t_1)}\right) + \\ &+ \left\{ \upsilon + \frac{k_{\upsilon}}{\xi_I'} \left[U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{2I}t_1}\right) - \frac{b}{a-1} e^{-k_{2I}t_1} \right] \right\} e^{-k_{2II}(t-t_1)} \\ &\text{для } t_1 \leq t \leq t_2. \end{aligned} \right\} \quad (17.41)$$

Нетрудно показать, что полученная система уравнений отражает и граничные значения любого q -го цикла. Действительно, в момент $t=0$ напряжение в первой части цикла (например, при включении нагрузки) равно

$$U_I(0) = \frac{b}{1-a}. \quad (17.42)$$

Подставляя значения a, b , получаем

$$\begin{aligned} &U_{вII} \xi_{II} \xi_I' \left[1 - e^{-k_{2II}(t_2-t_1)} \right] + \\ &U_I(0) = \frac{\left[\upsilon \xi_I' + k_{\upsilon} U_{вI} \xi_I \left(1 - e^{-k_{2I}t_1} \right) \right] e^{-k_{2II}(t_2-t_1)}}{\xi_{II}' - k_{\upsilon} e^{-k_{2I}t_1} e^{-k_{2II}(t_2-t_1)}}. \end{aligned} \quad (17.43)$$

Напряжение для второй части цикла в момент времени t_2 определяется из второго уравнения (17.41) и с учетом равенства (17.42) будет иметь значение

$$\begin{aligned} U_{II}(t_2) &= U_{вII} \xi_{II} \left[1 - e^{-k_{2II}(t_2-t_1)} \right] + \\ &+ \left[\upsilon + k_{\upsilon} U_{вI} \frac{\xi_I}{\xi_I'} \left(1 - e^{-k_{2I}t_1} \right) \right] e^{-k_{2II}(t_2-t_1)} + \\ &+ U_I(0) \frac{k_{\upsilon}}{\xi_I'} e^{-k_{2I}t_1} e^{-k_{2II}(t_2-t_1)}. \end{aligned}$$

Первые два члена этого уравнения соответствуют числителю выражения (17.43) и после их замены получим выражение граничных значений q -го цикла

$$U_{II}(t_2) = \frac{\xi'_{II}}{\xi'_I} U_I(0). \quad (17.44)$$

Воспользовавшись зависимостью (15.17), определяющей постоянство величины результирующих потокосцеплений генератора в данный момент времени и учитывая зависимость (13.10), последнее выражение можно представить в виде равенства двух отношений

$$\frac{U_I(0)}{\xi'_I} = \frac{U_{II}(t_2)}{\xi'_{II}} = E'_q = \text{const.}$$

Это равенство служит математическим подтверждением непрерывности переходного процесса генератора при циклическом изменении его нагрузки. Кроме того, формальное сравнение выражения (17.44) с зависимостью (17.34) позволяет утверждать, что в момент времени $t = 0$ конечная точка графика напряжения генератора q -го цикла совпадает с начальной точкой графика напряжения $(q+1)$ -го цикла. Указанное обстоятельство обуславливает поиск экстремального значения напряжения генератора в установившемся переходном процессе при данных параметрах генератора и нагрузки в зависимости от параметров периодического цикла t_1 и t_2 . По обычным правилам нахождения экстремума функции двух переменных следует считать для выражения (17.43)

$$\frac{\partial U_I(0)}{\partial t_1} = 0 \text{ и } \frac{\partial U_I(0)}{\partial t_2} = 0.$$

В общем виде поиск экстремума функции (17.43) затруднен и поэтому целесообразно вести его при конкретных данных.

Практический интерес представляет и величина размаха колебаний напряжения генератора при периодическом циклическом графике нагрузки. Эта величина может быть определена следующей зависимостью:

$$\pm \Delta U = U_{II}(t_1) - U_I(0).$$

Подставляя значения из первого уравнения (17.41) для времени $t = 0$ и из второго для $t = t_1$, имеем

$$\pm \Delta U = U + \left(1 - e^{-k_{21}t_1}\right) \frac{\xi'_I}{\xi'_I} k_v U_{BI} - \left(1 - \frac{k_v}{\xi'_I} e^{-k_{21}t_1}\right) U_I(0). \quad (17.45)$$

Минимальные значения размаха колебаний, несомненно представляющие значительный интерес, могут быть определены по обычным правилам нахождения экстремального значения функции двух переменных. Определение условий, при которых наступает минимальный размах колебаний напряжения генератора, позволяет найти оптимальные параметры последнего для заданных графиков циклической

нагрузки или, наоборот оптимальный график нагрузки при известных параметрах генератора.

В заключение следует отметить, что, используя систему уравнений (17.41), можно найти решение различных задач при коммутациях в цепи статора генератора. Например, можно определить изменение напряжения генератора в случае дополнительного включения нагрузки, не равной предыдущей, с одновременным отключением предыдущей, дополнительного включения нагрузки одной и той же величины в каждом последующем цикле и т. д.

Выведенная система уравнений характеризует общий случай изменения нагрузки синхронного генератора с саморегулированием. Действительно, полагая в первом уравнении (17.39) $q = 0$, получаем уравнение, идентичное (17.18), описывающее процесс генератора при однократном изменении нагрузки. Второе уравнение системы (17.39) при том же условии $q = 0$ описывает переходный процесс генератора для случая частичного или полного отключения нагрузки с необходимым при этом учетом насыщения стали машины.

*Расчет колебаний напряжения синхронного генератора
при циклическом графике нагрузки*

Исходные данные. Генератор МСС 275-500 с саморегулированием: $S_{\Gamma} = 275$ кВА; $U_{\Gamma} = 400$ В; $\cos \varphi = 0,8$; $x_d = 1,336$; $x_q = 0,83$; $x'_d = 0,263$; $T_{d0} = 1,2$ с; предварительной нагрузки нет.

Электродвигатель МАП 612-6/12/24 (для третьей скорости): $P_{\text{Д}} = 32$ кВт; $U_{\text{Д}} = 380$ В; $\cos \varphi_{\text{Д}} = 0,82$; $k_i = 6,55$; $\eta_{\text{Д}} = 0,84$; $m_{\text{max}} = 4,04$; $m_{\text{п}} = 3,24$; $s_{\text{ном}} = 5,5$ %.

Режим нагрузки: число совместно включаемых электродвигателей 7; продолжительность цикла $t_2 = 0,65$ с, паузы - $t_2 - t_1 = 0,2$ с [28, 30].

Расчет

1. Приведенное к генератору сопротивление короткозамкнутой фазы электродвигателя

$$z_1 = \frac{\eta_{\text{Д}} \cdot \cos \varphi_{\text{Д}} P_{\Gamma}}{k_i \cdot \cos \varphi_{\Gamma} \cdot P_{\text{Д}}} \left(\frac{U_{\text{Д}}}{U_{\Gamma}} \right)^2 = \frac{0,84 \cdot 0,82 \cdot 220}{6,55 \cdot 0,8 \cdot 32} \left(\frac{380}{400} \right)^2 = 0,812.$$

2. Критическое скольжение электродвигателя [27]

$$s_k = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-0,995 + \sqrt{0,995^2 + 4 \cdot 0,26 \cdot 0,36}}{2 \cdot 0,26} = 0,262,$$

где

$$a = (m_{\max} - m_n) - s_{\text{НОМ}} m_{\Pi} (m_{\max} - 1) = (4,04 - 3,24) - 0,055 \cdot 3,24(4,04 - 1) = 0,26;$$

$$b = 2 \cdot s_{\text{НОМ}} m_{\max} (m_{\Pi} - 1) = 2 \cdot 0,055 \cdot 4,04(3,24 - 1) = 0,995;$$

$$c = s_{\text{НОМ}} [s_{\text{НОМ}} (m_{\max} - m_{\Pi}) - m_{\Pi} (m_{\Pi} - 1)] = 0,055 [0,055(4,04 - 3,24) - 3,24(3,24 - 1)] = -0,36.$$

3. Коэффициент мощности электродвигателя при пуске (по рис. 17.21) для $s_k = 0,262$ равен $\cos \varphi_{\Pi} = 0,52$.

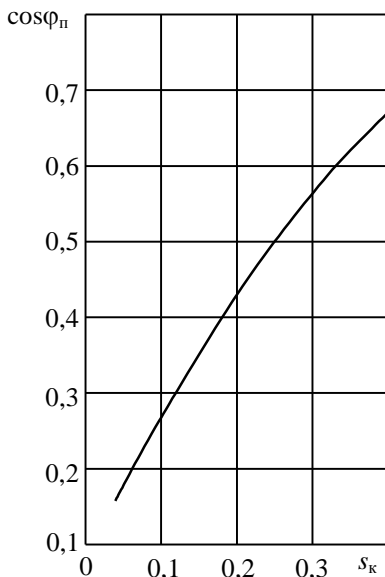


Рис. 17.21. Зависимость пускового значения коэффициента мощности короткозамкнутого асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором от критического скольжения [27]

4. Реактивная и активная составляющие сопротивления к.з. электродвигателя

$$x_I = z_I \sin \varphi_{II} = 0,812 \cdot 0,853 = 0,693;$$

$$r_I = z_I \cos \varphi_{II} = 0,812 \cdot 0,52 = 0,422.$$

5. Полные сопротивления включаемого электродвигателя и генератора

$$x_{dI} = x_d + x_I = 2,03; \quad x'_{dI} = x'_d + x_I = 0,96;$$

$$x_{qI} = x_q + x_I = 1,52; \quad r_{dI} \approx r_I = 0,422.$$

6. Коэффициенты ЭДС для пика цикла по формулам (17.24)

$$\xi_I = 0,392; \quad \xi'_I = 0,783$$

(если учитываются сопротивления цепи r_{II}, x_{II} от генератора до электродвигателя, то при расчете следует взять $x_I + x_{II}, r_I + r_{II}$).

7. Коэффициенты уравнения переходного процесса генератора для пика цикла по формулам (17.23)

$$k_{1I} = \frac{\xi'_I}{T_{d0}} = 0,652; \quad k_{2I} = \frac{\xi_I}{\xi'_I T_{d0}} = 1,66.$$

8. Полные сопротивления предварительной нагрузки генератора при отключении электродвигателя

$$x_{dII} = x_d + x_{II}; \quad x'_{dII} = x'_d + x_{II}; \quad x_{qII} = x_q + x_{II}, \quad r_{dII} = r_a + r_{II}$$

(в данном примере такая нагрузка отсутствует).

9. Коэффициенты ЭДС для паузы цикла вычисляются по аналогии с п. 6. При отключении электродвигателя в случае отсутствия предварительной нагрузки на генераторе коэффициенты имеют значения

$$\xi_{II} = 1 \quad \text{и} \quad \xi'_{II} = 1.$$

10. Коэффициенты уравнения переходного процесса генератора для паузы цикла вычисляются по аналогии с п. 7; при отсутствии нагрузки на генераторе коэффициенты равны

$$k_{1II} = k_{2II} = T_{d0}^{-1} = 0,833.$$

11. Коэффициенты прямой, аппроксимирующей нелинейную часть характеристики холостого генератора (по графику, подобному графику на рис. 17.20),

$$\upsilon = 0,85; \quad k_{\upsilon} = \operatorname{tg} \alpha = 0,15.$$

12. Возбуждение генератора соответственно при пике и паузе цикла по (13.7) (с учетом $E_q = i_b = U_b, o.e$)

$$U_{\text{вI}} = \frac{1}{\xi_{\text{I}}} = 2,55; \quad U_{\text{вII}} = \frac{1}{\xi_{\text{II}}} = 1.$$

13. Коэффициенты переходного процесса для второй независимой переменной по выражениям (17.36)

$$a = 0,15e^{-1,66 \cdot 0,45} e^{-0,8330,2} = 0,06;$$

$$b = 0,783(1 - e^{-0,8330,2}) + [0,85 \cdot 0,783 + 0,15(1 - e^{-1,66 \cdot 0,45})] e^{-0,8330,2} = 0,85.$$

14. Напряжение генератора в начале пика первого цикла включения электродвигателя по уравнениям (17.39) для $t = 0$ и $q = 0$

$$U_{\text{I}}(0) = U_0 = \xi_{\text{I}}' E'_{q\text{I}} = 0,783$$

($E'_{q\text{I}} = \frac{1}{\xi_{\text{II}}}'$ - если генератор имеет предварительную нагрузку и $E'_{q\text{I}} = 1$

в случае ненагруженного генератора).

15. Количество прошедших циклов включений электродвигателей, после которых процесс можно считать установившимся, по формуле (17.40)

$$q > 3,$$

так как должно быть $a^q \ll 1$.

16. Напряжение в установившемся режиме генератора в момент включения электродвигателя по формуле (17.42)

$$U_{10} = 0,9.$$

17. Напряжение в установившемся режиме в момент отключения электродвигателя по первому уравнению системы (17.41) для $t = t_1$

$$U_{\text{II}} = 1 - \Delta U_{10} e^{-k_{21} t_1} = 1 - 0,1e^{-1,66 \cdot 0,45} = 0,95.$$

18. Напряжение в установившемся режиме в начале паузы по второму уравнению системы (17.41) для $t = t_1$

$$U_{\text{III}} = \upsilon + \frac{k_{\text{v}}}{\xi_{\text{I}}}' (1 - \Delta U_{10} e^{-k_{21} t_1}) = 0,85 + \frac{0,15}{0,783} (1 - 0,1e^{-1,66 \cdot 0,45}) = 1,04.$$

19. Напряжение в установившемся режиме в момент включения электродвигателя по второму уравнению системы (17.41) для $t = t_2$

$$U_{\text{II2}} = U_{\text{вII}} + (U_{\text{III}} - U_{\text{вII}}) e^{-k_{21}(t_2 - t_1)} =$$

$$= 1 + 0,03e^{-0,8330,2} = 1 + 0,03 \cdot 0,84 = 1,02.$$

20. График установившихся колебаний напряжения генератора при включениях 7 крановых электродвигателей построен на рис. 17.22. Там же для сравнения построен график изменения напряжения генератора при одиночном включении кранового электродвигателя. График рассчитан по первой формуле системы (17.39) для значения $q = 0$.

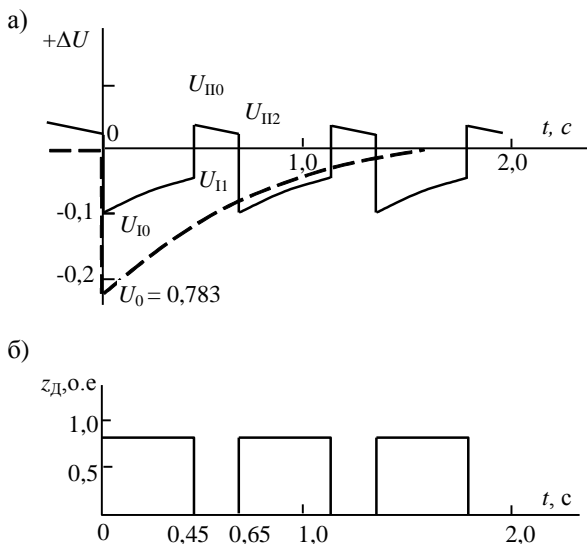


Рис. 17.22. Расчетное изменение напряжения генератора МСС 275-500:

а – при цикличном графике включений 7 электродвигателей (сплошная кривая) и при одиночном включении электродвигателя (пунктирная кривая); б – график циклов работы электродвигателей

Глава 18

Переходные процессы в силовых трансформаторах

§ 18.1. Включение трансформатора в сеть на холостой ход

Переходные процессы в трансформаторах зависят от вида коммутации и предварительного режима трансформатора, так как важную роль в протекании переходного процесса играет насыщение железа. Обычно представляют интерес переходные процессы, связанные с двумя случаями коммутации: включение трансформатора в сеть и короткое замыкание трансформатора.

Схема включения обмоток трансформатора представлена на рис. 18.1, а. Эквивалентная схема одной фазы рассматриваемой симметричной системы показана на рис. 18.1, б, а схема замещения при включении трансформатора в сеть – на рис. 18.1, в.

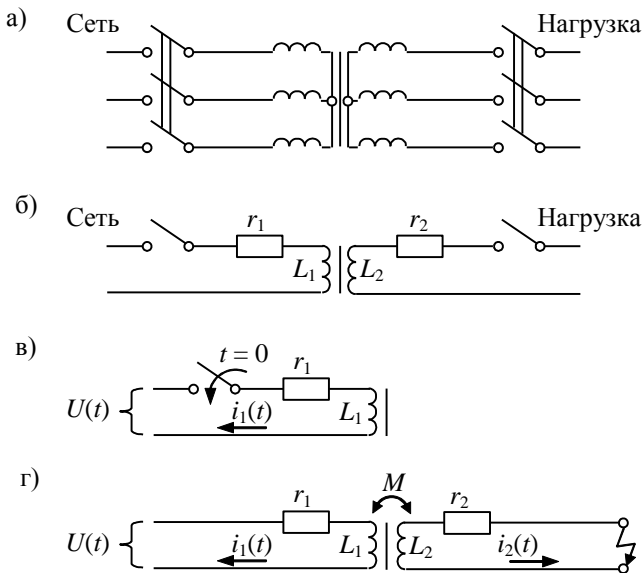


Рис. 18.1 Схемы включения трансформатора:
 а – схема соединения трехфазного трансформатора;
 б – эквивалентная схема одной фазы; в – схема для случая включения трансформатора в сеть на холостой ход; г – схема для случая внезапного короткого замыкания

Первичная обмотка в момент $t = 0$ включается на гармоническое напряжение $U(t) = U_m \sin(\omega t + \gamma)$, вторичная обмотка разомкнута. Так как имеется стальной сердечник, индуктивность обмотки – величина переменная, зависящая от тока, поэтому в уравнении равновесия напряжений должен записываться не ток, а потокосцепление обмотки $\psi = Li$.

Следовательно, изменение тока в цепи описывается таким уравнением

$$\frac{d\psi}{dt} + r_1 i = U_m \sin(\omega t + \gamma), \quad (18.1)$$

где ψ – полное потокосцепление обмотки трансформатора.

Между L и i имеется зависимость $L(i)$, определяемая линейной характеристикой намагничивания железа (рис. 18.2), поэтому уравнение (18.1) является нелинейным и решение может быть приближенным. Чтобы перевести его в линейный вид для приближенного решения, следует выразить второй член через потокосцепления. Это можно сделать, так как для трансформаторов индуктивное сопротивление значительно больше активного, и поэтому основное падение напряжения сети имеет место на индуктивном, а не на активном сопротивлении. Следовательно, второй член в уравнении (18.1) имеет малое значение и его можно представить приближенно, выражая ток через индуктивность цепи, которая принимается постоянной величиной, соответствующей прямолинейному участку характеристики намагничивания стали, т. е. $i = \psi / L_1$. Тогда

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{r_1}{L_1} \psi = U_m \sin(\omega t + \gamma). \quad (18.2)$$

Включение трансформатора может произойти в любой момент времени, т. е. при любом значении угла $\gamma = 0 \dots \pi/2$. Известно, что максимальное значение тока в цепи r, L , включаемой на гармоническое напряжение, наступает при прохождении напряжения через нулевое значение, т. е. при $\gamma = 0$, поэтому в написанном уравнении следует принять $\gamma = 0$.

Применяя к уравнению (18.2) \mathcal{L} -преобразование, имеем

$$s\psi(s) - \psi(0) + \alpha\psi(s) = U_m \frac{\omega}{s^2 + \omega^2},$$

где $\psi(0) = \psi_0$ – начальные потокосцепления – потокосцепления от

остаточного намагничивания стали сердечника; $\alpha = \frac{r_1}{L_1} = \frac{1}{T_1}$ - обратная величина постоянной времени контура.

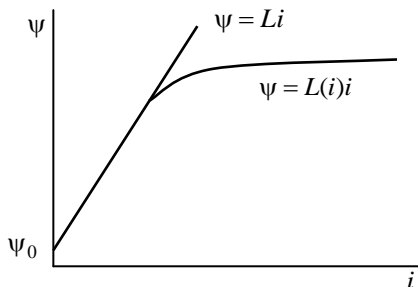


Рис. 18.2. График намагничивания железа трансформатора

Изображение потокосцеплений равно

$$\Psi(s) = \frac{\Psi_0}{s + \alpha} + \frac{\omega U_m}{(s^2 + \omega^2)(s + \alpha)}.$$

Обратное \mathcal{L} -преобразование по таблице соответствий 1.1 дает

$$\Psi(t) = \left(\Psi_0 + \frac{\omega U_m}{\alpha^2 + \omega^2} \right) e^{\alpha t} + \frac{U_m}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (18.3)$$

где $\varphi = \arctg \frac{\omega}{\alpha} = \arctg \frac{\omega L_1}{r_1}$.

После подстановки условных обозначений в выражение (18.3) получаем для отдельных выражений

$$\sqrt{\alpha^2 + \omega^2} = \sqrt{\left(\frac{r_1}{L_1} \right)^2 + \omega^2} = \frac{z_1}{L_1}; \quad \alpha^2 + \omega^2 = \left(\frac{z_1}{L_1} \right)^2.$$

Тогда, учитывая, что $r_1 \ll \omega L_1$ и, следовательно,

$$\varphi \cong \pi/2 \text{ и } \Psi_m = L_1 I_m = L_1 (U_m / x_1),$$

окончательно можно записать

$$\Psi(t) = (\Psi_0 + \Psi_m) e^{-\frac{t}{T_1}} - \Psi_m \cos \omega t. \quad (18.4)$$

Выражение (18.4) совпадает с переходным током в линейной цепи r, L , а именно: переходные потокосцепления состоят из аperiodической и периодической составляющих, как показано на рис. 18.3.

Располагая выражением для изменения потокосцеплений во времени, можно при помощи графика намагничивания стали построить график изменения тока в цепи. Такое построение выполнено на рис. 18.4.

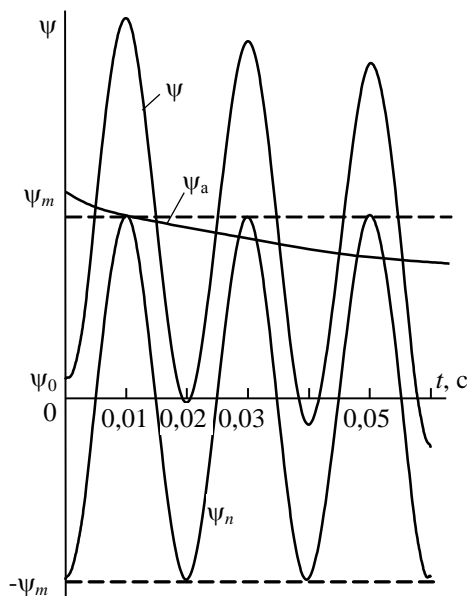


Рис. 18.3. Изменение потокосцеплений трансформатора при включении его в сеть на холостой ход

Построение начинается с вычерчивания графика $\psi(t)$ в первом квадранте координат и графика $\psi(i)$ - кривой намагничивания сердечника трансформатора - во втором и четвертом квадрантах (при $\psi_0 = 0$).

Искомая зависимость $i(t)$ строится в третьем квадранте по точкам следующим образом: на оси времени первого квадранта берется точка 1, от нее восстанавливается перпендикуляр до пересечения с графиком $\psi(t)$ и отмечается значение ψ ; по этой величине слева во втором квадранте отмечается точка 1 и сносится на ось i , пересечение координат i и t в третьем квадранте дает первую точку 1 графика $i(t)$. Аналогично выполняется построение графика $i(t)$ для точек 2, 3 и т. д. Видно, что вследствие насыщения стали бросок тока намагничивания

при включении обмотки в сеть значительно превосходит ток намагничивания нормального режима. Этот бросок тока может в десятки раз превышать ток холостого хода, он может превышать не только номинальный ток нагрузки, но и ток установившегося короткого замыкания. Следует отметить, что, как следует из рис. 18.3, потокосцепление остаточного намагничивания ψ_0 увеличивает бросок тока в цепи.

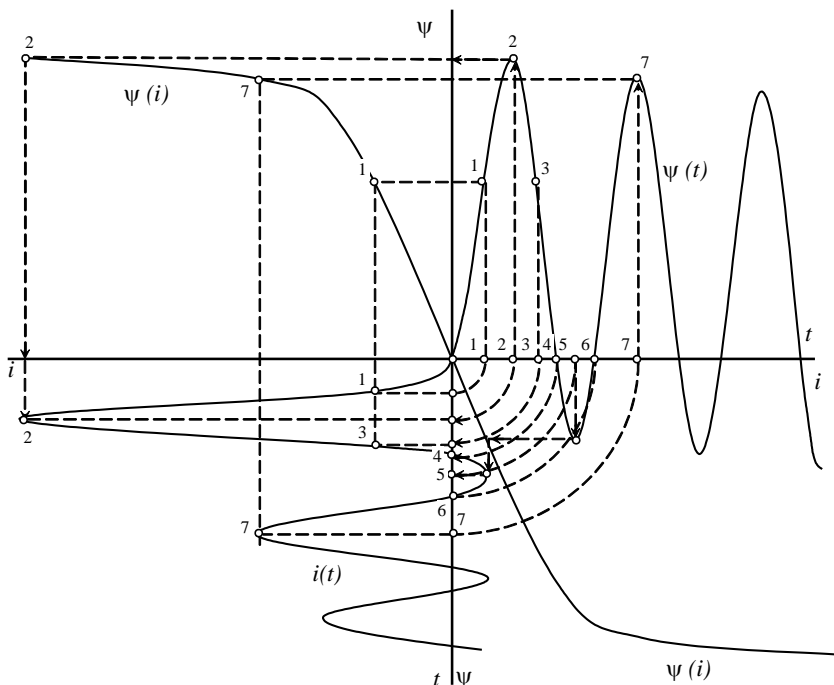


Рис. 18.4. Построение графика изменения тока трансформатора

§ 18.2. Внезапное трехфазное короткое замыкание на выводах трансформатора

Схема замещения этого режима показана на рис. 18.1, г. В момент $t = 0$ во второй обмотке происходит короткое замыкание. Принимается, что до короткого замыкания в установившемся режиме в обмотках трансформатора не протекал ток нагрузки $i_n = 0$.

При исследовании этого процесса применяются обычно два условия: а) ток намагничивания по сравнению с током нагрузки

и с величиной тока короткого замыкания очень мал и изменение его незначительно, а поэтому им можно пренебречь; б) влияние насыщения стали мало, поэтому оно не учитывается.

При этих условиях уравнения равновесия напряжений в контурах схемы рис. 18.1, г с момента $t = 0$ записываются так

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

После решения этой системы уравнений можно увидеть, что полный ток короткого замыкания в обмотке трансформатора состоит из трех составляющих

$$i_1(t) = I_a'' e^{-\frac{t}{T''}} + I_a' e^{-\frac{t}{T'}} + I_{II} \sin(\omega t + \varphi), \quad (18.5)$$

где две составляющие – аperiodические, затухающие, с постоянными времени T'' и T' , а третья – периодическая, обусловленная действием приложенного напряжения.

Постоянные времени равны

$$T' = \frac{1+p}{2}(T_1 + T_2); \quad T'' = \frac{1-p}{2}(T_1 + T_2),$$

где p зависит от величины общего потока рассеяния трансформатора σ .

Наличие стального сердечника в трансформаторе обуславливает малое значение потока рассеяния и потому (если считать, что $\sigma \cong 0$) $p = 1$. Тогда постоянные времени равны

$$T' = (T_1 + T_2), \quad T'' \cong 0.$$

Более точно последняя постоянная времени вычисляется так

$$T'' = \sigma \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}.$$

Численные значения постоянных времени показывают, что одна аperiodическая составляющая тока короткого замыкания в первичной обмотке трансформатора затухает с постоянной времени, равной сумме постоянных времени каждой обмотки, а другая, определяемая в основном величиной рассеяния потока, затухает почти мгновенно. Однако отношение начальных значений этих составляющих тока противоположное: медленно затухающая I_a' имеет меньшее значение по

сравнению с быстро затухающей составляющей I_a'' , т. е. $\frac{I_a''}{I_a'} \cong \frac{T'}{T''}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры элементов систем электроснабжения в эквивалентных схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей*

Синхронные генераторы, компенсаторы и электродвигатели

Сопротивления синхронных машин $x_d, x'_d, x''_d, x_q, x''_q, r_a$, которые используются для расчетов симметричных режимов, являются сопротивлениями прямой последовательности, так как вращение магнитного потока, созданного токами в этом режиме, совпадает с направлением вращения симметричной системы прямой последовательности. Поэтому всем вышеуказанным сопротивлениям может быть присвоен индекс «1».

В случае несимметричного режима появляются токи обратной и нулевой последовательностей. Токи обратной последовательности создают в машинах магнитный поток, вращение которого противоположно вращению основного потока, хотя их угловые частоты вращения равны $\omega_1 = \omega_2$. Очевидно, что эквивалентное сопротивление машин для токов обратной последовательности будет иным.

Для машин с явнополюсным ротором и без демпферных обмоток в случае питания от источника бесконечной мощности это сопротивление принимается равным:

без демпферных обмоток

$$x_2 \cong \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q}; \quad (\text{П.1})$$

с демпферными обмотками (см. § 15.5)

$$x_2 \cong \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q}. \quad (\text{П.1, а})$$

Эти выражения учитывают влияние третьей гармоники тока.

В общем случае при несимметричном режиме поле обратной последовательности вызывает в статорной обмотке весь спектр нечетных гармоник. Тогда сопротивление машин следует определять по формулам Н.Н. Щедрина:

*Щедрин Н.Н. Токи коротких замыканий высоковольтных систем (методы вычисления), - 1; М.: ОНТИ, 1935.

Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970.

без демпферных обмоток

$$x_2 \cong \sqrt{x'_d x'_q}, \quad (\text{П.2})$$

с демпферной обмоткой

$$x_2 \cong \sqrt{x''_d x''_q}. \quad (\text{П.2, а})$$

Для машин с неявнополюсным ротором, для турбогенераторов, у которых $x'_d = x_q$ и $x''_d = x''_q$, предыдущие формулы изменяются, а именно

$$x_2 \cong x'_d, \quad x_2 \cong x''_d. \quad (\text{П.3})$$

Однако более точное значение этого сопротивления вычисляется по формуле

$$x_2 \cong 1,22 x''_d. \quad (\text{П.4})$$

Токи нулевой последовательности в машинах создают в статорной обмотке только потоки рассеяния, величина которых зависит от типа последней. Поэтому сопротивление нулевой последовательности машин неоднозначно и равно

$$x_0 = (0,15 \dots 0,6) x''_d. \quad (\text{П.5})$$

Для расчетов электромагнитных переходных процессов в электрических системах целесообразно использовать данные по синхронным машинам и трансформаторам, приведенным в [23].

Трансформаторы

В трансформаторах сопротивление магнитной цепи как при прямом, так и при обратном чередовании фаз симметричной трехфазной системы токов не изменяется, и поэтому сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы: $x_1 = x_2$.

Сопротивления же нулевой последовательности определяются конструкцией и схемой соединения обмоток. Очевидно, что со стороны обмоток, соединенных в треугольник или в звезду без заземления нейтрали, как показано на рис. П.1, а сопротивления трансформатора $x_0 = \infty$ (независимо от схемы соединения других обмоток), так как в таком трансформаторе нет пути току нулевой последовательности. Следовательно, у трансформатора $x_0 \neq \infty$ может быть только со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, как показано на рис. П.1,б-ж.

При соединении обмоток Y_0 / Δ (рис. П.1, б) ток нулевой последовательности протекает по замкнутому контуру вторичной обмотки и, следовательно, создает падение напряжения на реактивном

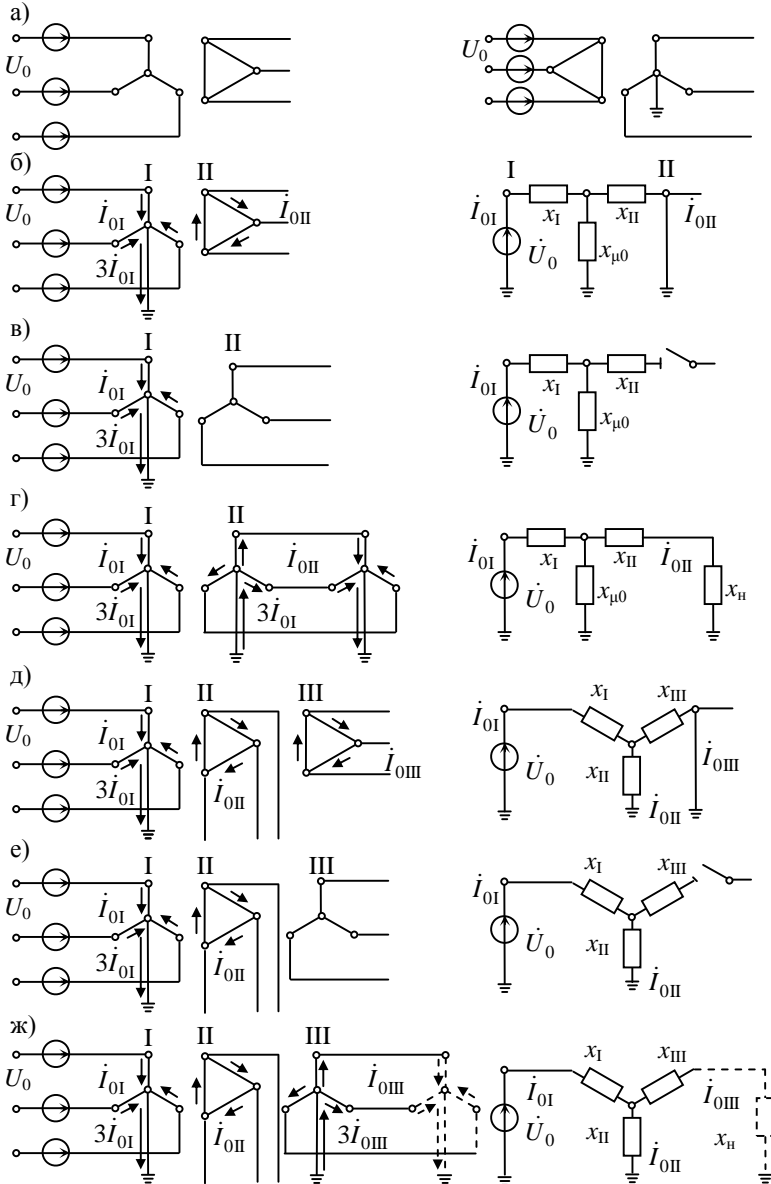


Рис. П.1. Соединения обмоток трансформаторов и схемы их замещения для токов нулевой последовательности

сопротивлении рассеяния этой обмотки. Поэтому T -образная схема замещения трансформатора для тока нулевой последовательности (см. рис. П.1, б) включает в себя сопротивление рассеяния первичной x_1 , вторичной x_{II} обмоток и реактивность намагничивания $x_{\mu 0}$. Как видно из схемы, ток нулевой последовательности I_0 не выходит за пределы схемы замещения трансформатора. Сумма сопротивлений x_1 и x_{II} соответствует при условии, что $x_{\mu 0} = \infty$, сопротивлению прямой последовательности трансформатора x_1 .

Величина $x_{\mu 0}$ зависит от конструкции трансформатора (рис. П.2).

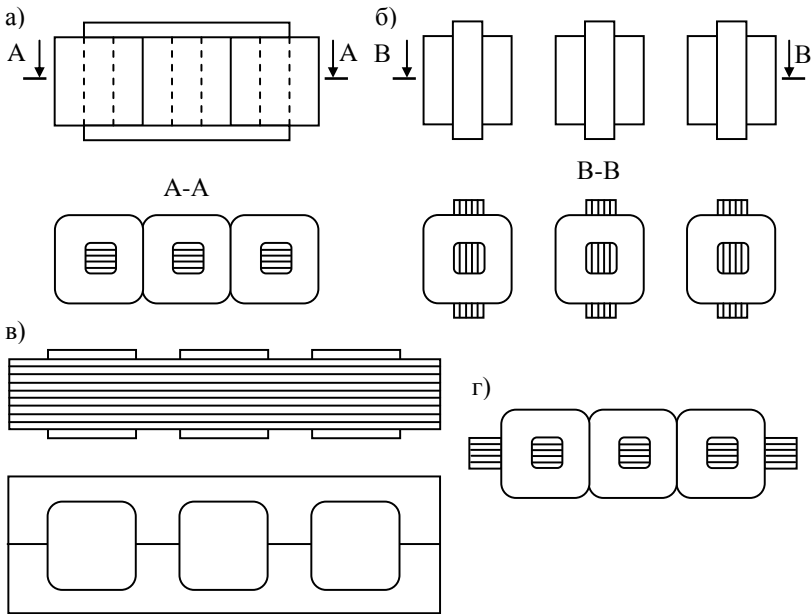


Рис. П.2. Конструкции трехфазных трансформаторов:

- а – трехстержневой; б – группа трех однофазных трансформаторов;
- в – четырехстержневой; г – пятистержневой (броневой)

Для группы из трех однофазных трансформаторов и для четырех- и пятистержневых (броневых) трансформаторов величина $x_{\mu 0} \cong \infty$, так

как сопротивление магнитной цепи для токов нулевой последовательности мало, ибо магнитные потоки замыкаются по стержням сердечника и величина тока нулевой последовательности весьма мала.

В трехстержневом же трансформаторе магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются через железо кожуха трансформатора, магнитное сопротивление которого значительно по сравнению с сердечником, и поэтому для преодоления этого сопротивления ток нулевой последовательности увеличивается. Следовательно, сопротивление $x_{\mu 0}$ здесь значительно меньше, чем $x_{\mu 1}$, однако сопротивление x_{II} (см. схему замещения) значительно меньше $x_{\mu 0}$ и поэтому также считают, что $x_{\mu 0} \cong \infty$.

При соединении обмоток Y_0 / Y (рис. П.1, в) во вторичной обмотке нет пути току нулевой последовательности – это, как показано на схеме замещения, режим холостого хода трансформатора для тока нулевой последовательности, т. е. $x_0 = x_1 + x_{\mu 0}$, где величина $x_{\mu 0}$ зависит от конструкции трансформатора (см. выше).

Для случая соединения обмоток Y_0 / Y_0 (см. рис. П.1, г) и обеспечения пути тока I_0 во вторичной обмотке схема замещения будет включать в себя и сопротивление внешней цепи. Так же, как и в предыдущем случае, величина $x_{\mu 0}$ зависит от конструкции трансформатора.

В табл. П1 помещена сводка формул для значения x_0 двухобмоточных трансформаторов.

Таблица П.1

**Величина сопротивления нулевой последовательности
трехфазных двухобмоточных трансформаторов**

Схема соединения обмоток	Конструкция сердечника (см. рис.)	x_0
Y_0 / Δ (рис. П.1, б)	Любого типа	x_1
Y_0 / Y (рис. П.1, в)	Трехстержневой	$x_1 + x_{\mu 0}$
Y_0 / Y_0 (рис. П.1, г)	То же	$x_1 + x_{\mu 0} // (x_{II} + x_n)$
Y_0 / Y (рис. П.1, в)	Группа из однофазных или четырехстержневой, или «броневой»	∞
Y_0 / Y_0 (рис. П.1, г)	То же	x_1

В трехобмоточных трансформаторах одна из обмоток, как правило, соединена в треугольник, и поэтому для них сопротивление намагничивания току нулевой последовательности можно принимать $x_{\mu 0} = \infty$; следовательно, схемы замещения будут содержать только сопротивления трех обмоток (см. рис. П.1, д, е, ж). В этих схемах путь тока нулевой последовательности в обмотке III соответствует схеме рис. П.1, б, в, г. Поэтому для схемы рис. П.1, д сопротивление нулевой последовательности

$$x_0 = x_I + \frac{x_{II} x_{III}}{x_{II} + x_{III}}; \quad (\text{П.6})$$

для схемы рис. П.1, е

$$x_0 = x_I + x_{II}; \quad (\text{П.7})$$

для схемы рис. П.1, ж (если есть путь тока на стороне обмотки III)

$$x_0 = x_I + x_{II} // (x_{III} + x_{IV}). \quad (\text{П.8})$$

Автотрансформаторы

Обмотки автотрансформатора имеют между собой не только электромагнитную, но и электрическую связь (рис. П.3).

При глухом заземлении нейтрали автотрансформатора схема заземления его для тока нулевой последовательности будет аналогична схеме замещения соответствующего трансформатора. Так, схеме замещения трансформатора (см. рис. П.1, г) соответствует схема замещения автотрансформатора (рис. П.3, а) (пренебечь намагнивающим током и активным сопротивлением), которая состоит из суммарного индуктивного сопротивления рассеяния автотрансформатора x_{I-II} . Соответственно схема замещения трехобмоточного трансформатора (рис. П.1, е) подобна схеме замещения автотрансформатора с третьей обмоткой (см. рис. П.3, б).

Для автотрансформатора нельзя из отдельно взятой схемы замещения определить в его нейтрали ток нулевой последовательности, так как величина последнего соответствует разности токов, протекающих в первичной и вторичной цепях, $\dot{I}_{ON} = 3(\dot{I}_{OI} - \dot{I}_{OII})$, где \dot{I}_{OI} и \dot{I}_{OII} отнесены к своей ступени напряжения.

Для автотрансформатора с заземленной нейтралью через сопротивление (см. рис. П.3, в) падение напряжения на нем при протекании тока нулевой последовательности будет равно

$\dot{U}_{ON} = 3x_{IV} \dot{I}_{ON} = 3x_{IV} (\dot{I}_{O1} - \dot{I}_{OII})$ и величина этого сопротивления току нулевой последовательности определится так

$$\frac{U_{ON}}{I_{O1}} = 3x_{IV} \frac{(I_{O1} - I_{OII})}{I_{O1}} = 3x_{IV} \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right). \quad (\text{П.9})$$

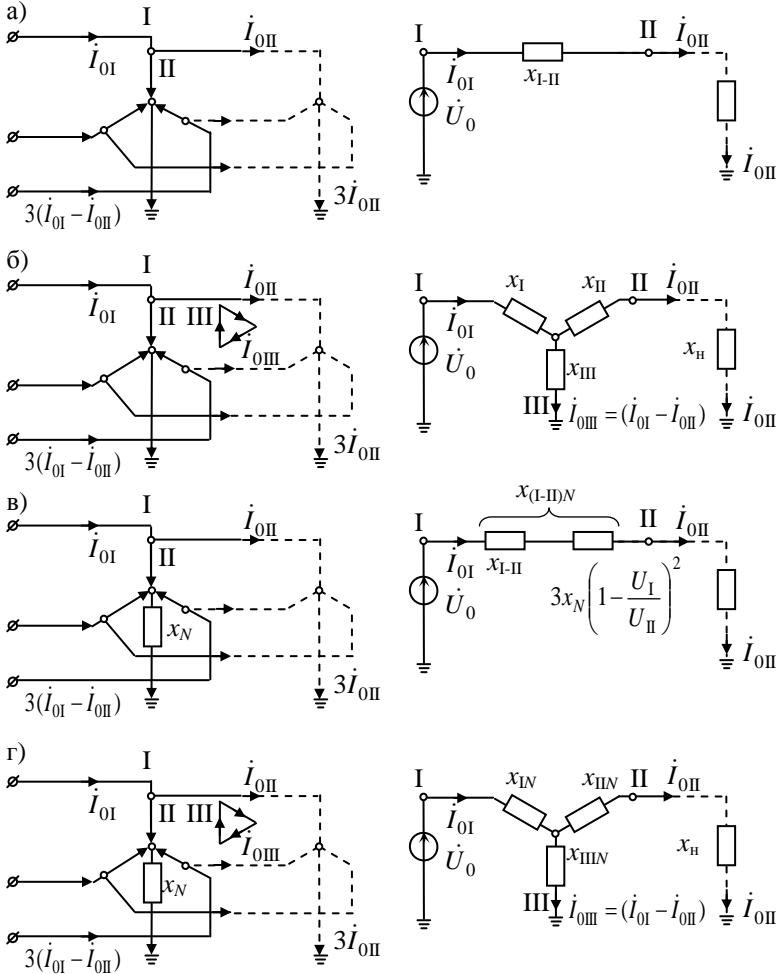


Рис. П.3. Схемы соединения обмоток автотрансформаторов и схемы их замещения для тока нулевой последовательности

С другой стороны, если напряжения выводов автотрансформатора относительно нейтрали равны U_{MI}, U_{MII} , то его суммарное индуктивное сопротивление, отнесенное к ступени I , равно

$$x_{I-II} = \frac{U_{MI} - U_{MII}}{I_{0I}}. \quad (\text{П.10})$$

Результирующее же сопротивление нулевой последовательности автотрансформатора, имеющего заземление нейтрали через сопротивление x_N , отнесенное к I ступени, как следует из схемы рис. П.3, в, равно

$$x_{(I-II)N} = \frac{U_{MI} + U_N}{I_{0I}} - \frac{U_{MII} + U_N}{I_{0I}} \left(\frac{U_I}{U_{II}} \right),$$

или

$$x_{(I-II)N} = \frac{U_{MI} - U_{MII}}{I_{0I}} + \frac{U_N}{I_{0I}} \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right),$$

после подстановки значений (П.9) и (П.10) эта формула примет вид

$$x_{(I-II)N} = x_{I-II} + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right)^2. \quad (\text{П.11})$$

Аналогично для трехобмоточного автотрансформатора (см. рис.П.3, г) результирующие сопротивления нулевой последовательности равны

$$\left. \begin{aligned} x_{IN} &= x_{I-II} + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right)^2; \\ x_{IIV} &= x_{I-III} + 3x_N; \\ x_{IIIV} &= x_{II-III} + 3x_N \left(\frac{U_I}{U_{II}} \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П.12})$$

Для трехлучевой схемы замещения трехобмоточного автотрансформатора по формулам преобразования и по равенствам (П.12) определяются результирующие сопротивления нулевой последовательности каждого луча (см. рис. П.3, г)

$$\left. \begin{aligned} x_{IN} &= x_I + 3x_N \left(1 - \frac{U_I}{U_{II}} \right); \\ x_{IIN} &= x_{II} + 3x_N \frac{(U_I - U_{II})U_I}{U_{II}^2}; \\ x_{IIIN} &= x_{III} + 3x_N \frac{U_I}{U_{II}}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П.13})$$

Автотрансформатор двухобмоточный с разземленной нейтралью в схеме нулевой последовательности имеет режим холостого хода (т. е. током нулевой последовательности автотрансформатора можно пренебречь, учитывая $x_{\mu 0} = \infty$). В трехобмоточном же автотрансформаторе разземление нейтрали не обуславливает режим холостого хода для тока нулевой последовательности, так как наличие третьей обмотки является условием циркуляции этого тока (см. рис. П.3, б, г).

Воздушные линии электропередачи

В воздушных линиях ток нулевой последовательности циркулирует по проводам по заземленным цепям (грозозащитные тросы, рельсовые пути вдоль линий) и в земле, образуя замкнутый контур. Основная трудность определения сопротивления нулевой последовательности в этом случае заключается в учете распределения тока в земле. Характер изменения плотности тока в земле, которая служит обратным проводом однопроводной линии переменного тока, весьма сложен.

Индуктивное сопротивление такой линии определяется как сопротивление эквивалентной двухпроводной линии «провод»-«земля»:

$$x_{Л} = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_3}, \text{ Ом/км,}$$

где D_3 - расстояние между проводами, называемое эквивалентной глубиной возврата тока через землю, зависящее от частоты тока и удельной проводимости земли; обычно принимают $D_3 = 1000$ м; r_3 - эквивалентный радиус провода, равный для жилы из медных проводников около $0,75r$, а из алюминиевых проводников - $0,95r$, где r - истинный радиус жилы.

Активное сопротивление линии «провод-земля» состоит из активного сопротивления провода r_{II} и сопротивления $r_3 \cong 0,05$ Ом/км, учитывающего потерю активной мощности в земле: $r = r_{II} + r_3$. Следовательно, полное сопротивление однопроводной линии

$$z_{Л} = r + jx_{Л}, \text{ Ом/км.} \quad (\text{П.14})$$

Для трехфазной одноцепной линии с полным циклом транспозиции проводов сопротивление взаимной индукции между фазами при возврате тока через землю равно

$$z_M = 0,05 + j0,1451g \frac{D_3}{D_{cp}}, \text{ Ом/км,} \quad (\text{П.15})$$

где D_{cp} - среднее геометрическое расстояние между проводами фаз

$$A, B, C; D_{cp} = \sqrt[3]{d_{AB}d_{AC}d_{BC}}.$$

Таким образом, сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной линии $z_0 = z_{Л} + z_M$ или после подстановки (П.14), (П.15) получим

$$z_0 = (r_n + 0,15) + j0,4351g \frac{D_3}{\sqrt[3]{r_3 D_{cp}^2}}. \quad (\text{П.16})$$

Важно отметить, что при токах нулевой последовательности, протекающих в одном направлении в трех фазах линии, взаимная индукция между фазами увеличивает полное сопротивление нулевой последовательности z_0 , а при токах прямой (или обратной) последовательности взаимная индукция между фазами за счет сдвига токов в фазах на 120° уменьшает полное сопротивление прямой z_1 (или обратной z_2) последовательности. А так как сопротивления z_L и z_M соизмеримы между собой, то величины z_0 и z_1, z_2 отличаются значительно.

Соотношения индуктивных сопротивлений для воздушных линий передач помещены в табл. П.2.

Таблица П.2

Средние значения соотношений между x_0 и x_1 для воздушных линий передачи

Характеристика линий	Отношение x_0 / x_1
Одноцепная линия без тросов	3,5
То же со стальными тросами	3,0
То же с хорошо проводящими тросами	2,0
Двухцепная линия без тросов	5,5
То же со стальными тросами	4,7
То же с хорошо проводящими тросами	3,0

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии дополнительно увеличивается при одинаковом направлении токов в них за счет взаимоиндукции между проводами параллельной цепи (см. табл. П.2). Взаимоиндукция проявляется особенно сильно при расположении обеих цепей на одной опоре и уменьшается с увеличением расстояния между цепями: при расстоянии 500 м увеличение z_0 вследствие влияния взаимоиндукции не превышает 10 %.

Влияние грозозащитных тросов на величину сопротивления нулевой последовательности значительно, так как при заземленных тросах в них протекают токи нулевой последовательности, существенно изменяя взаимоиндуктивность цепи (см. табл. П.2). При уравновешенной системе токов в воздушной линии в грозозащитных тросах токи практически не наводятся, и поэтому влияния тросов на сопротивления x_1 и x_2 нет.

Наиболее сильное влияние на величину z_0 оказывают тросы, заземленные на каждой опоре. В случае же закрепления тросов на изоляторах отдельными разными участками, с одной стороны которых осуществляется заземление, а с другой – устраивают искровой промежуток, влияние тросов на сопротивление нулевой последовательности практически не наблюдается.

Подобно грозозащитному тросу на сопротивление z_0 двухцепной линии оказывает одна из параллельных цепей, выведенная в ремонт и заземленная по условиям техники безопасности.

Формулы для детального расчета сопротивления нулевой последовательности линии с учетом конструкции горизонтального троса помещены в [3]. Емкостное сопротивление линии дается в каталогах в виде удельного сопротивления (Ом/км). Полное емкостное сопротивление линии определяется делением заданного значения на полную длину (в км) линии.

Кабели

Сопротивления прямой и обратной последовательностей кабеля равны между собой и даются заводами-изготовителями в каталогах.

Сопротивление нулевой последовательности кабеля может быть рассчитано так же, как и воздушной линии, т. е. с учетом распределения обратного тока подземной цепи «провод-земля». Поэтому сопротивление кабеля без токопроводящей оболочки можно рассчитать по (П.16), учитывая в последней средний геометрический радиус трех жил кабеля (рис. П.4)

$$D_{\text{ср}} = 2R_{\text{ср}} = 2\sqrt[3]{r_3 d^2},$$

где r_3 - эквивалентный, радиус жилы; d - расстояние между центрами жил.

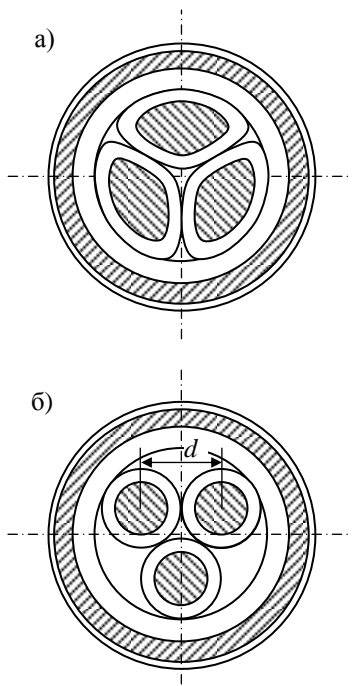


Рис. П.4. Конструкция трехжильного кабеля с секторными (а) и круглыми (б) жилами

Однако, как правило, оболочка кабеля является токопроводящей и заземляется по концам кабеля и на соединительных муфтах. Поэтому оболочка кабеля для токов нулевой последовательности подобна защитному тросу воздушных линий. Определение расчетного сопротивления нулевой последовательности кабеля связано с большими трудностями, и поэтому обычно для трехжильного кабеля принимают

$$x_0 \cong (3,5..4,6)x_1 \text{ и } r_0 \cong 10r_1. \quad (\text{П.17})$$

Емкостное сопротивление кабеля дается в каталогах в виде удельного сопротивления Ом/км. Полное емкостное сопротивление всего кабеля определяется делением заданного значения на полную длину (км) кабеля.

Асинхронные электродвигатели и обобщенная нагрузка

В нормальном режиме величина сопротивления асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при номинальной частоте вращения соответствует относительному значению $x_D = 1$ (рис. П.5). По отношению к магнитному потоку обратной последовательности ротор электродвигателя будет вращаться со скоростью, равной $2n_{\text{НОМ}}$, т. е. магнитный поток обратной последовательности будет вращаться относительно ротора, как видно из рис. П.5, практически с двойной синхронной частотой. В этом случае сопротивление обратной последовательности электродвигателя практически равно его сопротивлению короткого замыкания (при заторможенном роторе), т. е.

$$x_2 \cong x_k. \quad (\text{П.18})$$

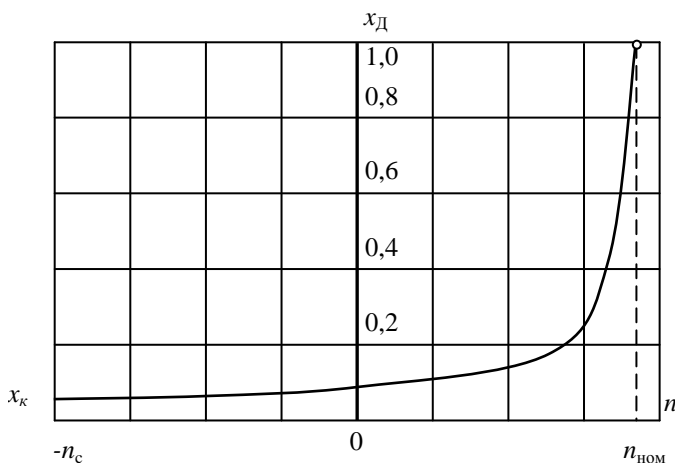


Рис. П.5. Изменение относительного индуктивного сопротивления асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в зависимости от направления и частоты вращения его ротора

Реактивность нулевой последовательности асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором определяется сопротивлением рассеяния статорной обмотки и зависит от конструкции последней. Величина этого сопротивления дается заводами-изготовителями.

Обобщенная нагрузка представляет собой совокупность различных приемников электроэнергии, и для типовой промышленной нагрузки считают, что она состоит в основном из асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Поэтому реактивность обратной последовательности обобщенной нагрузки практически совпадает с реактивным сопротивлением обратной последовательности асинхронных электродвигателей и в расчетах принимается такой же, как в начальный момент нарушения режима, т. е.

$$x_1 = x_2 \cong 0,35. \quad (\text{П.19})$$

Эта величина отнесена к полной рабочей мощности обобщенной нагрузки S_H , МВ·А, и к номинальному напряжению U_{cp} , кВ, на ступени нагрузки.

Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки зависит от конфигурации сети, конструкции трансформаторов и поэтому должно определяться для каждого отдельного случая расчета.

Параметры элементов для расчета токов короткого замыкания в установках с напряжением до 1000 В*

Таблица П.3

Сопротивления понижающих трансформаторов с вторичным напряжением 0,4 кВ

Номинальная мощность, кВ·А	Схема соединения обмоток	u_k , %	Значение сопротивлений, мОм							
			прямой последовательности			нулевой последовательности		току однофазного КЗ		
			$r_{ГТ}$	$x_{ГТ}$	$z_{ГТ}$	$r_{0Г}$	$x_{0Г}$	$r_T^{(I)}$	$x_T^{(I)}$	$z_T^{(I)}$
25	Y/Y_H	4,5	154	244	287	1650	1930	1958	2418	3110
25	Y/Z_H	4,7	177	243	302	73	35,4	-	-	-
40	Y/Y_H	4,5	88	157	180	952	1269	1128	1583	1944
40	Y/Z_H	4,7	100	159	188	44	13,4	-	-	-
63	Y/Y_H	4,5	52	102	114	504	873	608	1077	1237
63	Y/Z_H	4,7	59	105	119	28	12	-	-	-

* Справочник по проектированию электроснабжения. Под ред. Ю.Т. Барыбина и др.-М.: Энергоатомиздат, 1990.

Окончание таблицы П.3

Номинальная мощность, кВ·А	Схема соединения обмоток	u_k , %	Значение сопротивлений, мОм								
			прямой последовательности			нулевой последовательности		току однофазного КЗ			
			$r_{ГТ}$	$x_{ГТ}$	$z_{ГТ}$	$r_{0ГТ}$	$x_{0ГТ}$	$r_T^{(i)}$	$x_T^{(i)}$	$z_T^{(i)}$	
100	Y/Y_H	4,5	31,5	65	72	254	582	317	712	779	
100	Y/Z_H	4,7	36,3	65,7	75	15,6	10,6	-	-	-	
160	Y/Y_H	4,5	16,6	41,7	45	151	367	184	450	486	
160	Δ/Y_H	4,5	16,6	41,7	45	16,6	41,7	49,8	125	135	
250	Y/Y_H	4,5	9,4	27,2	28,7	96,5	235	115	289	311	
250	Δ/Y_H	4,5	9,4	27,2	28,7	9,4	27,2	28,2	81,6	86,3	
400	Y/Y_H	4,5	5,5	17,1	18	55,6	149	66,6	183	195	
400	Δ/Y_H	4,5	5,9	17	18	5,9	17	17,7	51	54	
630	Y/Y_H	5,5	3,1	13,6	14	30,2	95,8	36,4	123	128	
630	Δ/Y_H	5,5	3,4	13,5	14	3,4	13,5	10,2	40,5	42	
1000	Y/Y_H	5,5	1,7	8,6	8,8	19,6	60,6	2,3	77,8	81	
1000	Δ/Y_H	5,5	1,9	8,6	8,8	1,9	8,6	5,7	25,8	26,4	
1600	Y/Y_H	5,5	1	5,4	5,5	16,3	50	18,3	60,8	63,5	
1600	Δ/Y_H	5,5	1,1	5,4	5,5	1,1	5,4	3,3	16,2	16,5	
2500	Δ/Y_H	5,5	0,64	3,46	3,52	0,64	3,46	1,92	10,38	10,56	

Таблица П.4

Значение сопротивлений комплектных шинпроводов, мОм/м

Параметры	ШМА68П		ШМА73		ШМА4		
Номинальный ток, А	2500	4000	1600	1250	1600	2500	3200
Сопротивление на фазу $R_{ш}$	0,02	0,013	0,031	0,034	0,03	0,017	0,015
Сопротивление на фазу $x_{ш}$	0,02	0,015	0,022	0,016	0,014	0,008	0,07

Окончание таблицы П.4

Параметры	ШМА68П		ШМА73		ШМА4		
	Номинальный ток, А	1600	250	400	630	250	400	630
Сопротивление на фазу $R_{ш}$	0,014	0,21	0,15	0,1	0,21	0,15	0,1
Сопротивление на фазу $x_{ш}$	0,006	0,221	0,17	0,13	0,21	0,17	0,13

Таблица П.5

Значение сопротивлений кабелей до 1 кВ

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление при 20°C жилы, мОм/м		Индуктивное сопротивление, мОм/м	
	алюминиевой	медной	кабеля с поясной бумажной изоляцией	трех проводов в трубе, кабеля с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией
1	-	18,5	-	0,133
1,5	-	12,3	-	0,126
2,5	12,5	7,4	0,104	0,116
4	7,81	4,63	0,095	0,107
6	5,21	3,09	0,09	0,1
10	3,12	1,84	0,073	0,099
16	1,95	1,16	0,0675	0,095
25	1,25	0,74	0,0662	0,091
35	0,894	0,53	0,0637	0,088
50	0,625	0,37	0,0625	0,085
70	0,447	0,265	0,612	0,082
95	0,329	0,195	0,0602	0,081
120	0,261	0,154	0,0602	0,08
150	0,208	0,124	0,0596	0,079
185	0,169	0,1	0,0596	0,078
240	0,13	0,077	0,0587	0,077

Таблица П.6

Значения сопротивлений автоматических выключателей

$I_{НОМ}$, А	R_a , МОм	x_a , МОм	$I_{НОМ}$, А	R_a , МОм	x_a , МОм
50	7	4,5	600	0,41	0,13
70	3,5	2	1000	0,25	0,1
100	2,15	1,2	1600	0,14	0,08
140	1,3	0,7	2500	0,13	0,07
200	1,1	0,5	4000	0,1	0,05
400	0,65	0,17	-	-	-

Таблица П.7

Приближенные значения активных сопротивлений разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ

Номинальный ток аппарата, А	Активное сопротивление, МОм	
	рубильника	разъединителя
50	-	-
70	-	-
100	0,5	-
150	-	-
200	0,4	-
400	0,2	0,2
600	0,15	0,15
1000	0,08	0,08
2000	-	0,03
3000	-	0,02

Таблица П.8

Ориентировочные значения сопротивлений первичных обмоток катушечных трансформаторов тока напряжением до 1 кВ типа ТКФ

Коэффициент трансформации трансформаторов тока	Значение сопротивлений, МОм, для трансформатора тока класса точности			
	x	r	x	r
	1		2	
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2

Окончание таблицы П.8

Коэффициент трансформации трансформаторов тока	Значение сопротивлений, мОм, для трансформатора тока класса точности			
	x	r	x	r
	1		2	
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	1,7	2,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,09
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1950. – 550 с.
2. Щедрин Н.Н. Токи короткого замыкания высоковольтных систем (методы вычисления) – М.; Л.: ОНТИ, 1935. – 456 с.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
4. Лебедев С.А., Жданов П.С. Устойчивость параллельной работы электрических систем – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1934. – 388 с.
5. Лютер Р.А. Теория переходных режимов синхронных машин с применением операторного анализа. – Л.: ГЭИ, 1939.
6. Жданов П.С. Устойчивость электрических систем. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 399 с.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы синхронных генераторов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 199 с.
8. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.
9. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Пер. с 1-го амер. изд. – М.: И, 1955. – 714 с.
10. Лайбль Т. Теория синхронной машины при переходных процессах. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 250 с.
11. Конкордия Ч. Синхронные машины. Переходные и установившиеся процессы. – М.; Л.: ГЭИ, 1959. – 215 с.
12. Адкинс Б. Общая теория электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 250 с.
13. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
14. Кимбарк Е. Синхронные машины и устойчивость электрических систем – М.; Л.: 1960. – 120 с.
15. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.; Л.: АН СССР, 1962. – 624 с.
16. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1978. – 415 с.
17. Гарднер М.Ф. и Бэрнс ДЖ. Л. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1951. – 520 с.

18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

19. Борисов В.В. Коммутационные аппараты высокого напряжения. – СПб.: Северо-Западный филиал АО "ГВЦ Энергетики" РАО «ЕЭС России», 1999. – 124 с.

20. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2003. – 928 с.

21. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – ГОСТ 27514-87.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 30 с.

22. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования /Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: НЦ ЭНАС, 2000. – 50 с.

23. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справ. материалы. 4-е издание – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 607 с.

24. Справочник по проектированию электроснабжения /Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

25. Обзор по координации уровней токов короткого замыкания в электрических сетях энергосистем. Министерство топлива и энергетики Российской Федерации. – М.: РАО «ЕЭС России». Департамент науки и техники, 1993. – 109 с.

26. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.

27. Мелешкин Г.А. Исследование переходных процессов, возникающих при пуске асинхронного к.з. электродвигателя от синхронного генератора в судовых электростанциях, с учетом влияния изменения частоты. Канд. диссертация. – Л.: ЛВИМУ им. адм. С.О. Макарова, 1955. – 110 с.

- Переходные режимы судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1971. – 344 с.

- Прикладные методы анализа переходных режимов синхронных генераторов в судовых электроэнергетических установках. Автореферат диссерт. на соискание уч. степени д.т.н. – Л.: ЛВИМУ им. адм. С.О. Макарова, 1971. – 56 с.

- Расчет переходных режимов в системах электроснабжения. – Л.: СЗПИ, 1980. – 76 с.
 - Расчет несимметричных режимов в системах электроснабжения. – Л.: СЗПИ, 1980. – 80 с.
 - Симметричные и несимметричные режимы в системах электроснабжения. – Л.: СЗПИ, 1982. – 68 с.
 - Алгоритм и программное обеспечение оптимального распределения реактивной мощности по синхронным двигателям на промышленном предприятии. Всероссийская научно-техническая конференция «Электроснабжение промышленных предприятий в современных условиях». – СПб., 2000.
28. Бабаев А.М. Электроприводы перегрузочных комплексов большой грузоподъемности. – СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2001. – 144 с.
29. Логашев В.Г. Технологические основы гибких автоматических производств. – Л.: Машиностроение, 1985. – 175 с.
30. Панов В.А., Хомяков Н.М. К вопросу об определении расчетных электрических нагрузок групп потребителей повторно-кратковременного режима работы /Электричество, № 3, 1964.
31. Шорин В.П. Электрический привод и теория электропривода. – СПб: ГУВК, 2003. – 305 с.
32. Куляпин Г.Т. Электроприводы механизмов собственных нужд электрических станций. – Л.: СЗПИ, 1986. – 70 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ	
Глава 1. Задачи изучения и математический аппарат для исследования переходных процессов	7
§ 1.1. Задачи изучения и расчета переходных процессов в системах электроснабжения; принимаемые допущения	7
§ 1.2. Этапы исследования переходных процессов. Преобразование Лапласа	11
Глава 2. Переходный процесс в трехфазной цепи при коротком замыкании	22
§ 2.1. Составление дифференциального уравнения переходного процесса	22
§ 2.2. Решение уравнения переходного процесса. Оценка начальных условий	25
§ 2.3. Анализ решения и построение графика переходного процесса	27
§ 2.4. Характерные величины переходного процесса. Расчетные условия	30
РАЗДЕЛ II. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ СИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ	
Глава 3. Особенности практических методов расчета токов короткого замыкания	37
§ 3.1. Цель и область применения практических методов расчета токов короткого замыкания	37
§ 3.2. Требования к расчетам токов короткого замыкания	40
Глава 4. Расчет начального, сверхпереходного тока короткого замыкания	43
§ 4.1. Схемы замещения. Расчет параметров в именованных и в относительных единицах	43

§ 4.2. Преобразование схем замещения для расчета токов короткого замыкания	53
§ 4.3. Расчет начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от электрической системы	60
§ 4.4. Расчет апериодической составляющей и ударного значения тока короткого замыкания	63
§ 4.5. Расчет тока, посылаемого нагрузкой в точку короткого замыкания	66
Глава 5. Расчет тока короткого замыкания для данного момента времени	69
§ 5.1. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания (метод расчетных кривых)	69
§ 5.2. Пример расчета токов при трехфазном коротком замыкании в системе электроснабжения с трансформаторными подстанциями	73
§ 5.3. Пример расчетов токов при трехфазном коротком замыкании в системе электроснабжения с синхронными генераторами	80
§ 5.4. Компьютерная программа для расчета токов короткого замыкания в системе электроснабжения	94
Глава 6. Расчет токов короткого замыкания с учетом полного сопротивления цепи	103
§ 6.1. Расчет токов короткого замыкания в распределительных сетях и системах электроснабжения	103
§ 6.2. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В	109
РАЗДЕЛ III. АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ	
Глава 7. Особенности режима трехфазной цепи при нарушении симметрии	116
§ 7.1. Основные положения, условия и допущения	116
§ 7.2. Метод симметричных составляющих и применение его для расчета несимметричных режимов	119
Глава 8. Аварийные режимы при поперечном нарушении симметрии цепи	128
§ 8.1. Режим при двухфазном коротком замыкании	128
§ 8.2. Режим при однофазном коротком замыкании	130

§ 8.3. Режим при двухфазном коротком замыкании на землю	133
§ 8.4. Режим при замыкании фазы на землю в системе с изолированной нейтралью	137
Глава 9. Аварийные режимы при продольном нарушении симметрии цепи	139
§ 9.1. Режим при разрыве одной фазы	139
§ 9.2. Режим при разрыве двух фаз	143
§ 9.3. Режим при конечном сопротивлении в месте разрыва фазы	145
Глава 10. Практические методы расчета несимметричных режимов	148
§ 10.1. Правило эквивалентности прямой последовательности	148
§ 10.2. Расчет токов несимметричных коротких замыканий методом расчетных кривых	149
§ 10.3. Расчет несимметричных режимов в сетях до 1000 В	150
Глава 11. Расчеты аварийных несимметричных режимов	152
§ 11.1. Составление расчетных схем прямой и обратной последовательностей	152
§ 11.2. Составление расчетной схемы нулевой последовательности	157
§ 11.3. Составление комплексных схем замещения и построение векторных диаграмм	161
§ 11.4. Расчет тока в обмотке статора синхронного генератора при несимметричных коротких замыканиях	171
§ 11.5. Расчет режима асинхронного электродвигателя при разрыве фазы	173
§ 11.6. Расчет токов в схеме электроснабжения при несимметричных коротких замыканиях	177
§ 11.7. Графоаналитический метод расчета симметричных составляющих напряжения при несимметричном режиме	184
Глава 12. Уровень токов короткого замыкания и стойкость электрооборудования к токам короткого замыкания	191
§ 12.1. Уровень токов короткого замыкания	191
§ 12.2. Проверка электрооборудования на стойкость к токам короткого замыкания	192

РАЗДЕЛ IV. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Глава 13. Параметры, определяющие электромагнитный переходный процесс в синхронной машине	194
§ 13.1. Основные виды переходного процесса в синхронной машине	194
§ 13.2. Параметры и векторные диаграммы синхронной машины	196
Глава 14. Уравнения Парка-Горева, описывающие электромагнитный переходный процесс синхронной машины	221
Глава 15. Переходные процессы в синхронном генераторе до его включения на параллельную работу с сетью	230
§ 15.1. Переходные процессы в цепи ротора и статора генератора при включении постоянного возбуждения	230
§ 15.2. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при трехфазном коротком замыкании	235
§ 15.3. Переходные процессы в цепях ротора и статора генератора при гашении магнитного поля ротора в случае трехфазного короткого замыкания	243
§ 15.4. Переходный процесс в цепи статора генератора при несимметричном коротком замыкании	249
§ 15.5. Аperiodическая составляющая тока при трехфазном коротком замыкании в цепи статора генератора	251
Глава 16. Переходные процессы в синхронном генераторе при его включении в сеть и при параллельной работе с сетью	257
§ 16.1. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при его включении в сеть методом самосинхронизации до включения возбуждения	257
§ 16.2. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при его включении в сеть методом самосинхронизации с учетом подачи возбуждения	264
§ 16.3. Переходные процессы в цепях статора и ротора генератора при форсировке магнитного поля в случае удаленного трехфазного короткого замыкания	269

§ 16.4. Переходные процессы в цепях ротора и статора генератора при внезапном отключении от сети (при сбросе нагрузки)	278
§ 16.5. Переходный процесс при включении генератора на параллельную работу с генератором соизмеримой мощности	283
§ 16.6. Синхронизация генераторов соизмеримой мощности через индуктивное сопротивление – реактор ("грубая" синхронизация)	294
Глава 17. Переходные процессы при включении мощных электродвигателей в сеть	298
§ 17.1. Характеристика переходных процессов при включении мощных электродвигателей в сеть	298
§ 17.2. Снижение, "провал" напряжения на шинах трансформаторной подстанции и изменение тока при пуске и самозапуске мощных электродвигателей	301
§ 17.3. Снижение, "провал" напряжения на шинах генератора и изменение тока при пуске электродвигателя, соизмеримого по мощности с генератором	318
§ 17.4. Колебания напряжения на шинах автономного генератора при циклическом графике нагрузки	326
Глава 18. Переходные процессы в силовых трансформаторах	341
§ 18.1. Включение трансформатора в сеть на холостой ход	341
§ 18.2. Внезапное трехфазное короткое замыкание на выводах трансформатора	345
ПРИЛОЖЕНИЕ	347
Параметры элементов систем электроснабжения в эквивалентных схемах прямой, обратной и нулевой последовательностей	347
Параметры элементов для расчета токов короткого замыкания в установках с напряжением до 1000 В	360
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	365