



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
(РИИ АлтГТУ)

А.Н. ТАТАРНИКОВА, Н.А. ПАРФЕНОВА

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Часть 1

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Учебное пособие для студентов подготовки «Электроэнергетика
и электротехника» всех форм обучения

*Рекомендовано Рубцовским индустриальным институтом (филиалом)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова» в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению подготовки «Электроэнергетика
и электротехника»*

Рубцовск 2016

УДК 621.311

Татарникова А.Н., Парфенова Н.А. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Часть 1: Электромагнитные переходные процессы: Учебное пособие для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения /Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2016.- 75 с.

Рассмотрены электромагнитные переходные процессы. Пособие может служить руководством на занятиях и при самостоятельной работе студентов.

Рассмотрено и одобрено на заседании НМС РИИ.
Протокол № 4 от 08.06.16 г.

Рецензент: гл. инженер ЗАО «Контакт-108»

И.А. Оборовский

© Рубцовский индустриальный институт, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ	4
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ.....	4
1.1. Основные понятия и определения.....	4
1.2. Причины возникновения переходных процессов	5
1.3. Виды коротких замыканий.....	6
1.4. Причины и последствия коротких замыканий	7
1.5. Назначение расчетов коротких замыканий	8
1.6. Допущения при расчетах токов короткого замыкания	9
Глава 2. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТАМ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ	10
2.1. Расчетные схемы.....	10
2.2. Параметры элементов расчетных схем.....	11
2.3. Составление схем замещения.....	13
2.4. Преобразование схем замещения	14
2.5. Система относительных единиц.....	20
2.6. Приведение параметров схемы к основной ступени напряжения.....	20
2.7. Переходные процессы в неразветвленной цепи	26
2.8. Короткое замыкание на зажимах генератора без автоматического регулирования возбуждения.....	30
2.9. Короткое замыкание на зажимах генератора с автоматическим регулированием возбуждения.....	32
2.10. Короткое замыкание в цепи, питающейся от системы	34
2.11. Расчет начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания ...	35
2.12. Способы определения ударного коэффициента и ударного тока короткого замыкания	37
2.13. Определение тока короткого замыкания в произвольный момент времени по расчетным кривым	41
2.14. Расчет тока короткого замыкания по его общему и индивидуальному изменениям.....	46
2.15. Учет электродвигателей при расчете токов короткого замыкания	47
2.16. Расчеты токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В	50
Глава 3. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	57
3.1. Метод симметричных составляющих	57
3.2. Основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений.....	59
3.3. Сопротивления элементов токам отдельных последовательностей.....	61
3.4. Правила составления схем замещения отдельных последовательностей	64
3.5. Токи и напряжения в месте несимметричного короткого замыкания.....	65
3.5.1. Двухфазное короткое замыкание	65
3.5.2. Однофазное короткое замыкание	67
3.5.3. Двухфазное короткое замыкание на землю	69
3.6. Правило эквивалентности прямой последовательности.....	71
3.7. Применение метода расчетных кривых для расчета несимметричных КЗ.....	73
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	75

Часть 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

1.1. Основные понятия и определения

Электроэнергетическая система представляет собой совокупность электрических станций, электрических и тепловых сетей и узлов потребления, объединенных процессом производства, передачи и распределения электрической и тепловой энергии и связанных общим оперативным и хозяйственным управлением.

Электрическая система (ЭС) – это условно выделенная часть электроэнергетической системы, в которой осуществляется выработка, преобразование, передача и потребление электрической энергии. В результате аварийных ситуаций в системе возникают переходные процессы, в течение которых происходит переход от одного режима к другому.

Режим работы системы – это совокупность процессов, характеризующих работу электрической системы и ее состояние в любой момент времени.

Для электрических систем характерны четыре режима работы: нормальный, аварийный, послеаварийный и ремонтный, причем аварийный режим является кратковременным режимом, а остальные – продолжительными режимами.

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение, отключение нагрузок, источников питания; отдельных цепей, производство испытаний и пр.), так и в аварийных условиях (обрыв нагруженной цепи или отдельной ее фазы, короткое замыкание, выпадение машины из синхронизма и т.д.).

При любом переходном процессе происходит в той или иной мере изменение электромагнитного состояния системы и нарушение баланса между моментом на валу каждой вращающейся машины и электромагнитным моментом. Это означает, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе, которые взаимно связаны и представляют собой единое целое. Тем не менее очень часто переходный процесс делится на две стадии. На первой стадии из-за большой инерции вращающихся машин в ЭС преобладают электромагнитные изменения. Эта стадия длится от нескольких сотых до 0,1 – 0,2 с и называется электромагнитным переходным процессом. На второй стадии проявляются механические свойства системы, которые оказывают существенное влияние на переходные процессы. Эта стадия называется электромеханическим переходным процессом.

В результате этого нарушения соответственно изменяются скорости вращения машин, т.е. у одних скорости увеличиваются, другие тормозятся. Такое положение существует до тех пор, пока регулирующее устройство не восстановит нормальное состояние, если это вообще осуществимо при изменившихся условиях.

1.2. Причины возникновения переходных процессов

Переходные процессы в электрических системах возникают вследствие изменения режимов, вызванных эксплуатационными условиями, или в результате повреждения изоляции или токоведущих частей установок.

Основные причины возникновения переходных процессов:

- включение, отключение и переключение источников питания электрической энергии (генераторов), трансформаторов, линий электропередачи (ЛЭП), электроприемников и других элементов;
- появление несимметрии токов и напряжений в результате отключения отдельных фаз, несимметричных изменений нагрузки, обрывов фаз и др.;
- короткие замыкания (КЗ) в элементах системы;
- форсировка возбуждения синхронных машин (увеличения тока возбуждения при понижении напряжения в системе) и гашение их магнитного поля;
- внезапные набросы и сбросы нагрузки;
- асинхронный ход синхронных машин после выпадения их из синхронизма;
- атмосферно-климатические воздействия на элементы электрической системы;
- повторные включения и отключения короткозамкнутых цепей.

Переходные процессы, обусловленные коммутационными переключениями, относятся к нормальной эксплуатации, а КЗ, обрыв фаз, автоматическое повторное включение (АПВ) и отключение короткозамкнутых цепей и прочие нарушения представляют собой аварийные условия. Аварийные условия возникают как при устойчивых, так и при неустойчивых повреждениях изоляции элементов СЭС.

К неустойчивым повреждениям изоляции относятся:

- в воздушных линиях (ВЛ) - перекрытия гирлянд подвесных изоляторов, сближение проводов при определенных климатических условиях, приближение к проводам ветвей деревьев, а также набросы на провода различных предметов;
- в кабельных линиях (КЛ) - пробой изоляции, самоустраиваемые благодаря специфическим свойствам бумажно-масляной изоляции (в разрядном промежутке создаются условия, способствующие гашению дуги);
- в распределительных устройствах (РУ) – набросы или поверхностные перекрытия при повышенном увлажнении либо загрязнении.

Практикой эксплуатации электрических систем установлено, что большая часть возникающих повреждений, особенно на воздушных линиях, имеет проходящий характер, т.е. повреждения самоустраиваются после отключения поврежденного участка и не возникают вновь при обратном включении его. Примером может служить обычное перекрытие по поверхности гирлянды изоляторов линии, вызванное грозovým разрядом. После отключения линии электрическая прочность воздушного промежутка восстанавливается в течение небольшого отрезка времени, необходимого для деионизации воздуха в месте перекрытия.

В соответствии с этим широкое применение нашло автоматическое повторное включение (АПВ) цепей и особенно ВЛ.

В кабельных линиях число самоустраняющихся повреждений заметно меньше, чем в воздушных.

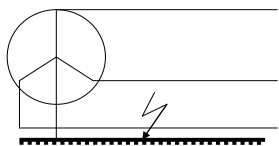
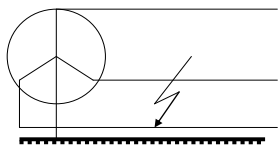
1.3. Виды коротких замыканий

В процессе эксплуатации СЭС одной из основных причин нарушения нормального режима работы отдельных электроустановок (ЭУ) и системы в целом являются возникающие КЗ. **Короткое замыкание** – это всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных фаз или полюсов электроустановки между собой или с землей в системах с глухо- или эффективно заземленными нейтралью (таблица 1.1). В системах с изолированными нейтралью или с нейтралью, заземленными через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной фазы на землю называют **простым замыканием**.

При возникновении КЗ в электрической системе сопротивление цепи резко уменьшается), степень уменьшения зависит от положения точки КЗ в системе), что приводит к увеличению токов в отдельных ветвях системы по сравнению с токами нормального режима. В свою очередь, это вызывает снижение напряжения в системе, которое особенно велико вблизи места КЗ.

Таблица 1.1

Вероятность коротких замыканий в электрических системах

Вид КЗ и его обозначение	Принципиальная схема	Относительная вероятность КЗ (%) в сетях различных напряжений, кВ				
		6 - 20	35	110	220	500
1	2	3	4	5	6	7
однофазное $K^{(1)}$		61	67	83	88	95
двухфазное $K^{(2)}$		17	18	5	3	2

1	2	3	4	5	6	7
двухфазное на землю $K^{(1,1)}$		11	7	8	7	2
трехфазное $K^{(3)}$		11	8	4	2	1

В системах с изолированной нейтралью:

$Z^{(1)}$ - замыкание однофазное на землю (рис. 1.1);

$Z^{(1,1)}$ – двойное заземление на землю (рис.1.2).

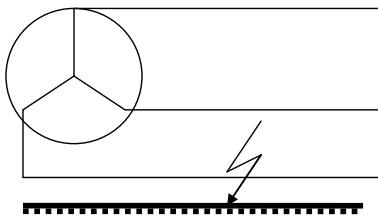


Рис. 1.1

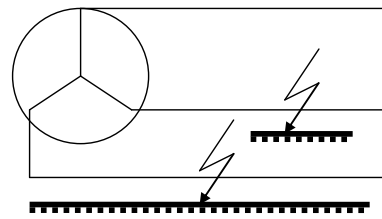


Рис. 1.2

Чаще всего КЗ происходит через переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю. Иногда возникают металлические КЗ без переходного сопротивления. При замыкании между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги.

Трехфазное КЗ является симметричным, так как при нем все фазы остаются в одинаковых условиях. Напротив, все остальные виды КЗ являются несимметричными, поскольку при каждом из них фазы находятся уже в неодинаковых условиях; поэтому системы токов и напряжений при этих видах КЗ в той или иной мере искажены.

1.4. Причины и последствия коротких замыканий

Из всего многообразия причин возникновения КЗ можно выделить несколько основных:

1) нарушение изоляции ЭУ, вызываемое ее старением в процессе эксплуатации, перенапряжением, загрязнением поверхности изоляторов, механическими повреждениями;

2) механические повреждения элементов электрической сети (обрыв провода линии электропередачи, набросов посторонних предметов на токоведущие части и т.п.);

3) преднамеренные КЗ, вызываемые действием короткозамыкателей;

4) перекрытие токоведущих частей животными и птицами;

5) неудовлетворительный уход за электрическим оборудованием и ошибки персонала подстанций при проведении переключений.

Уменьшение количества КЗ в ЭС связано со строгим соблюдением Правил технической эксплуатации электроустановок и повышением качества продукции электротехнической промышленности.

Последствиями КЗ являются:

- недопустимый нагрев электрического оборудования и его термическое повреждение из-за значительного увеличения токов (в 10-15 раз и более), так как тепловыделение пропорционально квадрату тока;

- появление больших механических усилий между токоведущими частями, которые могут привести к их механическому повреждению и даже разрушению;

- снижение напряжения и искажение его симметрии, что отрицательно сказывается на работе потребителей. Так, при понижении напряжения на 30-40% в течение времени более 1 секунды происходит отключение пусковой аппаратуры и отключение двигателей, в результате чего возможны нарушения технологического цикла на предприятиях, появление брака продукции и другие последствия;

- наведение при несимметричных КЗ электродвижущей силы в соседних линиях связи и сигнализации, опасных для обслуживающего персонала;

- нарушение устойчивости отдельных элементов и режима СЭС в целом, приводящее к возникновению аварийных ситуаций с отключением большого количества потребителей электрической энергии;

- возгорание электроустановок.

Наибольшая опасность при КЗ угрожает элементам системы, прилегающим к месту его повреждения. В зависимости от места и продолжительности КЗ его последствия могут иметь местный характер (удаленное от источников питания КЗ) или отражаться на функционировании всей системы.

1.5. Назначение расчетов коротких замыканий

Расчет электромагнитных переходных процессов в СЭС при КЗ предусматривает определение токов и напряжений в той или иной короткозамкнутой цепи при заданных (расчетных) условиях. В зависимости от назначения такого расчета находят указанные величины для заданного момента времени или находят их изменения в течение всего переходного процесса.

Расчеты токов КЗ необходимы для следующих конечных целей:

- выявления условий работы потребителей при возможных КЗ и определения допустимости того или иного режима;

- выбора электрических аппаратов электроустановок по условиям термической и электродинамической стойкости;
- проектирования и настройки средств релейной защиты и автоматики СЭС;
- сопоставления и выбора схем электрических соединений СЭС;
- координации и оптимизации значений токов КЗ;
- оценки устойчивости работы СЭС и ее узлов нагрузки;
- проектирования заземляющих устройств;
- определения влияния токов КЗ на линии связи;
- выбора разрядников;
- анализа аварий в электроустановках;
- проведения различных испытаний в СЭС.

Точность расчета КЗ зависит от его целевого назначения. Для выбора и проверки электрических аппаратов точность расчета может быть ниже, чем для решения других задач. Так, при выборе средств релейной защиты и автоматики точность расчета аварийных режимов должна быть значительно выше. В этом случае необходимо определить наибольшие и наименьшие значения токов и напряжений, возможный сдвиг между ними в отдельных фазах либо между их симметричными составляющими и т. п.

1.6. Допущения при расчетах токов короткого замыкания

При решении большинства практических задач, связанных с расчетами токов КЗ, принимают ряд допущений, не вносящих существенных погрешностей в точность расчетов. Применительно к сетям напряжением выше 1 кВ основные допущения следующие:

- не учитывается насыщение магнитных систем всех элементов цепи КЗ (генераторов, трансформаторов и электродвигателей);
- все нагрузки представляют постоянными индуктивными сопротивлениями;
- пренебрегают активными сопротивлениями элементов схемы, если отношение результирующих сопротивлений от источника до точки КЗ $R_{PE3} / X_{PE3} \leq \frac{1}{3}$, кроме случаев определения степени затухания апериодических составляющих токов КЗ;
- пренебрегают емкостными проводимостями на землю ВЛ напряжением до 220 кВ (для КЛ напряжением 110 кВ и выше емкостные проводимости необходимо учитывать);
- не учитывают сдвиг по фазе ЭДС источников энергии, входящих в расчетную схему;
- считают, что все элементы СЭС симметричны, а нарушение симметрии происходит только в месте КЗ;
- приближенно учитывают затухание апериодической составляющей тока КЗ в схемах с несколькими независимыми контурами;
- учитывают в виде обобщенных нагрузок центров питания все электроприемники, за исключением мощных электродвигателей,

подключенных непосредственно в месте КЗ или на небольшом электрическом удалении от него;

- пренебрегают различием значений сверхпереходных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям синхронных машин.

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

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

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

- переходные сопротивления в месте КЗ;

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

Применение вычислительной техники для расчетов переходных процессов позволяет отказаться от некоторых допущений и тем самым повысить точность расчетов, более полно учесть явления, характеризующие переходной процесс.

Глава 2. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТАМ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

2.1. Расчетные схемы

На первом этапе расчета аварийных режимов на основе принципиальной схемы СЭС составляют расчетную схему, исходя из нормальных условий работы системы:

- если на сборных шинах предусмотрен реактор, то он должен быть включен в работу;

- если предусмотрена параллельная работа вводов, секционный выключатель должен быть включен;

- на электростанции предполагается одновременная параллельная работа всех генераторов;

- все источники питания имеют автоматические регуляторы возбуждения (АРВ).

Принципиальная схема должна соответствовать предшествующему нормальному режиму эксплуатации с наибольшим числом включенных источников питания и подпиткой точек КЗ в последующих аварийных режимах.

Расчетная схема составляется для аварийного режима СЭС, и на ней, как правило, в однолинейном изображении показывают источники СЭС, точки КЗ, все силовые элементы (генераторы, синхронные компенсаторы, силовые

трансформаторы и автотрансформаторы, реакторы; ВЛ и КЛ, связывающие источники с местом КЗ), по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих.

В соответствии с ГОСТом все КЗ подразделяются на удаленные и близкие. КЗ считается удаленным, если амплитуды периодической составляющей тока статора данной электрической машины в начальный и произвольный моменты КЗ практически одинаковы, и близким, если эти амплитуды отличаются.

В зависимости от постановки задачи на схеме намечают несколько расчетных точек КЗ и указывают виды КЗ.

При проверке электрических аппаратов и жестких проводников вместе с поддерживающими и опорными конструкциями на электродинамическую стойкость расчетным видом КЗ является трехфазное КЗ.

При проверке гибких проводников на электродинамическую стойкость (тяжение, опасное сближение и схлестывание проводников) расчетным видом КЗ является двухфазное КЗ.

При проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость расчетным видом КЗ в общем случае является трехфазное КЗ.

При проверке электрических аппаратов на коммутационную способность расчетным видом КЗ может быть трехфазное или однофазное КЗ в зависимости от того, при каком виде КЗ ток КЗ имеет наибольшее значение.

Расчетная точка КЗ находится непосредственно с одной или с другой стороны рассматриваемого элемента ЭУ в зависимости от того, когда для него создаются наиболее тяжелые условия в режиме КЗ.

При проверке кабелей на термическую стойкость расчетной точкой КЗ является:

- для одиночных кабелей одной строительной длины - точка КЗ в начале кабеля;
- для одиночных кабелей со ступенчатым соединением по длине – точка КЗ в начале каждого участка нового сечения;
- для двух и более параллельно включенных кабелей одной кабельной линии – в начале каждого кабеля.

После составления схемы замещения рассчитываются ее параметры в именованных или относительных единицах, затем полученные значения приводятся к основной ступени напряжения.

2.2. Параметры элементов расчетных схем

Каждый элемент расчетной схемы характеризуется соответствующими параметрами, необходимыми для расчета токов КЗ, которые указаны ниже.

1) **Синхронный генератор** - полная номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ·А) или номинальная активная мощность $P_{ном}$ (МВт), номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$, номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ), сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси в относительных единицах X''_{*d} , индуктивное сопротивление обратной последовательности X''_{*2} , постоянная времени затухания апериодической составляющей тока трехфазного КЗ T_a (с). Эквивалентные источники питания могут быть получены

объединением нескольких генераторов с суммарной номинальной мощностью $S_{\Sigma ном}$ и результирующим сверхпереходным сопротивлением x''_c .

2) **Синхронный компенсатор** - полная номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ·А), номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ), сверхпереходное сопротивление по продольной оси X''_{*d} , сопротивление обратной последовательности X''_{*2} , постоянная времени затухания T_a (с).

3) **Синхронный двигатель** - полная номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ·А) или номинальная активная $P_{ном}$ (МВт) мощность, номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$, номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ), КПД - η (%), сверхпереходное индуктивное сопротивление X''_{*d} или кратность пускового момента $M_{*пуск}$, причем

$$X''_{*d} \approx \frac{1}{I_{*пуск}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{M_{*пуск}}{I_{*пуск}} \right)^2}. \quad (2.1)$$

4) **Асинхронный двигатель** - номинальная активная мощность $P_{ном}$ (МВт), номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ), номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$, КПД- η (%), кратность пускового тока $I_{*пуск}$, кратность максимального момента M_{*max} ;

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

6) **Двухобмоточный трансформатор** - номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ·А), номинальные высшее и низшее напряжение U_B, U_H (кВ), напряжение короткого замыкания между обмотками u_K (%), потери короткого замыкания P_K (кВт) или отношение X_I / R_I .

7) **Трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор** - полная номинальная мощность $S_{ном}$ (МВ·А), номинальные напряжения обмоток U_B, U_C, U_H (кВ), напряжения КЗ между обмотками $u_{KB-C}, u_{KB-H}, u_{KC-H}$ (%), потери КЗ $P_{KB-C}, P_{KB-H}, P_{KC-H}$;

8) **Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой** низшего напряжения (НН) - номинальная мощность обмотки высшего напряжения S_B или номинальная мощность обмотки низшего напряжения $S_{H1(H2)} = 0,5 \cdot S_B$ (МВ·А), номинальные напряжения обмоток $U_B, U_{H1(H2)}$ (кВ), напряжения КЗ между обмотками $u_{KB-H1(H2)}$ и u_{KH1-H2} (%); потери КЗ P_K (кВт) или отношение X_I / R_I .

9) **Токоограничивающие реакторы** характеризуются номинальным напряжением $U_{ном}$ (кВ), номинальным индуктивным сопротивлением $X_{ном}$ (Ом или %), коэффициентом связи $K_{св}$ (для сдвоенного реактора), номинальным током $I_{ном}$ (А), номинальными потерями мощности $P_{ном}$ (кВт) или отношением $X_{ном} / R_{ном}$.

10) Воздушные линии электропередачи - номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ), длина l (км), количество параллельных цепей, удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности X_l и удельное индуктивное сопротивление нулевой последовательности X_0 (Ом/км); удельное активное сопротивление прямой последовательности R_l (Ом/км) или отношение X_l/R_l , удельное активное сопротивление нулевой последовательности R_0 (Ом/км). Значения сопротивлений линий даются в справочниках в зависимости от марки провода и усредненного значения расстояния между проводами.

Средние расчетные значения X_l следующие:

- для ВЛ напряжением 6 – 220 кВ $X_l = 0,4$ Ом/км,
- для ВЛ напряжением 330 кВ (два провода на фазу) $X_l = 0,33$ Ом/км,
- для ВЛ напряжением 500 кВ (три провода на фазу) $X_l = 0,3$ Ом/км.

Сопротивление X_0 зависит от сечения проводов, расстояния между фазами, наличия заземленных тросов и соседних параллельных цепей.

11) Кабельные линии электропередачи - номинальное напряжение $U_{ном}$ (кВ), длина l (км), количество кабелей в линии, удельные индуктивные сопротивления прямой X_l , нулевой X_0 последовательности (Ом/км), удельное активное сопротивление прямой R_l , нулевой R_0 последовательности (Ом/км). Значения сопротивлений КЛ зависят от типов кабелей, способ прокладки и изменяются в широких пределах.

Средние расчетные значения в случае трехжильных КЛ:

- для КЛ напряжением 35 кВ - $X_l = 0,12$ Ом/км,
- для КЛ напряжением 6-10 кВ - $X_l = 0,08$ Ом/км,
- для КЛ напряжением 3кВ - $X_l = 0,07$ Ом/км.

Значения сопротивлений X_0 и R_0 зависят от способов прокладки кабелей и их типов. В случае трехжильных КЛ приближенно можно считать, что $X_0 = (3,5 \div 4,6)X_l$; $R_0 = 10R_l$.

2.3. Составление схем замещения

Схему замещения СЭС составляют на основе ее расчетной схемы для начального момента переходного процесса. Ее компонуют для каждой точки КЗ и в нее включают все элементы расчетной схемы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих к данной точке КЗ. Переход от расчетной схемы к схеме замещения сводится к замене расчетной схемы эквивалентной электрической цепью, включающей в себя источники ЭДС и неизменные сопротивления и к приведению параметров элементов и ЭДС различных ступеней СЭС к базисным условиям (к одной ступени напряжения, выбранной за основу).

Схема замещения СЭС - это совокупность схем замещения ее отдельных элементов, соединенных в той же последовательности, причем трансформаторные связи заменяются электрическими.

Путем эквивалентных преобразований схема замещения СЭС приводится к простейшему виду для определения результирующего сопротивления короткозамкнутой цепи. С этой целью используются известные методы преобразования, применяемые при расчете линейных электрических цепей:

последовательное и параллельное сложение сопротивлений; замена нескольких источников с разными ЭДС и сопротивлениями, присоединенных к общей точке сети, одним эквивалентным источником; преобразования треугольника в эквивалентную звезду, звезды в эквивалентный треугольник и многолучевой звезды в полный многоугольник с диагоналями (табл. 2.2).

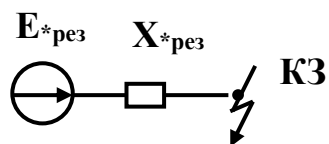


Рис. 2.1

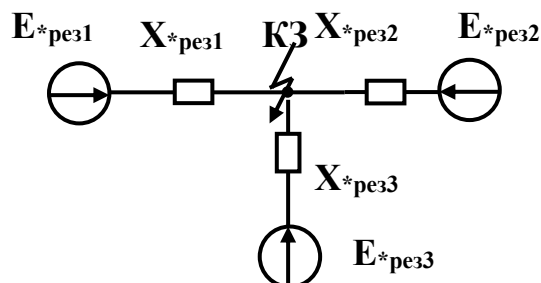


Рис. 2.2

2.4. Преобразование схем замещения

Основной задачей расчета режима с $KЗ$ является нахождение тока в аварийной ветви или в месте $KЗ$, поэтому аварийная ветвь должна быть сохранена до конца преобразований. С этой целью концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых считаются равными нулю, не следует соединять с точкой трехфазного $KЗ$, а лучше эти ветви объединять в эквивалентные с генерирующими ветвями.

1) Если металлическое трехфазное $KЗ$ находится в узле с несколькими сходящимися ветвями (рис. 2.3), то этот узел можно разрезать, сохранив на конце каждой ветви такое же $KЗ$ (рис. 2.4). Далее схему можно преобразовать относительно любой из точек $KЗ$, учитывая другие ветви с $KЗ$ как обычные нагрузочные ветви с ЭДС равными нулю (рис. 2.5).

2) При симметрии схемы замещения СЭС относительно точки $KЗ$ или симметрии участка схемы относительно промежуточной точки. В ходе преобразования можно соединить точки, имеющие одинаковые потенциалы, и исключить из схемы сопротивления, по которым токи $KЗ$ не протекают.

Если элементы, расположенные симметрично элементу $X7$, одинаковы, то потенциалы точек 1 и 3 также одинаковы (рис. 2.3). Это позволяет соединить названные узлы и полученные параллельные ветви 1 и 3 , 4 и 5 , 6 и 8 заменить эквивалентными (рис. 2.9). Вместо двух контуров схема содержит один, преобразив который в эквивалентную звезду, легко привести к элементарному виду (рис. 2.10).

Расчетные схемы и схемы замещения элементов СЭС

Наименование элемента	Расчетная схема	Схема замещения
Генератор (компенсатор)		
Эквивалентный источник системы		
Синхронный двигатель		
Асинхронный двигатель		
Обобщенная нагрузка		
Двухобмоточный трансформатор		
Трехобмоточный трансформатор		
Трехфазный трансформатор с расцепленной обмоткой		
Трехфазный автотрансформатор		
Реактор		
Сдвоенный реактор		
Воздушная линия		
Кабельная линия		

Основные формулы преобразования схем

Вид преобразования	Схема исходная	Схема эквивалентная	Эквивалентное сопротивление
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{\text{эк}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{\text{эк}} = \frac{1}{\underline{Y}_{\text{эк}}} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \dots + \frac{1}{\underline{Z}_n}}$ <p>При двух ветвях:</p> $\underline{Z}_{\text{эк}} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Замена группы источников эквивалентным			$\dot{E}_{\text{эк}} = \frac{\dot{E}_1 \cdot \underline{Y}_1 + \dot{E}_2 \cdot \underline{Y}_2 + \dots + \dot{E}_n \cdot \underline{Y}_n}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n}$ $\underline{Z}_{\text{эк}} = \frac{1}{\underline{Y}_{\text{эк}}} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Y}_1} + \frac{1}{\underline{Y}_2} + \dots + \frac{1}{\underline{Y}_n}}$ <p>При двух ветвях:</p> $\dot{E}_{\text{эк}} = \frac{\dot{E}_1 \cdot \underline{Z}_2 + \dot{E}_2 \cdot \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Преобразование треугольника в звезду			$\underline{Z}_{\Sigma} = \underline{Z}_{HF} + \underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH}$ $\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG} \cdot \underline{Z}_{YF}}{\underline{Z}_{\Sigma}}$ $\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG} \cdot \underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_{\Sigma}}$ $\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH} \cdot \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{\Sigma}}$
Преобразование трехлучевой звезды в треугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \cdot \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \cdot \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$ $\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_F \cdot \underline{Z}_H}{\underline{Z}_G}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \cdot \underline{Z}_G \cdot \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \cdot \underline{Z}_H \cdot \sum \underline{Y}$ <p>.....</p> $\sum \underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}_F} + \frac{1}{\underline{Z}_G} + \frac{1}{\underline{Z}_H} + \frac{1}{\underline{Z}_j}$ <p>Аналогично и при большем числе ветвей</p>

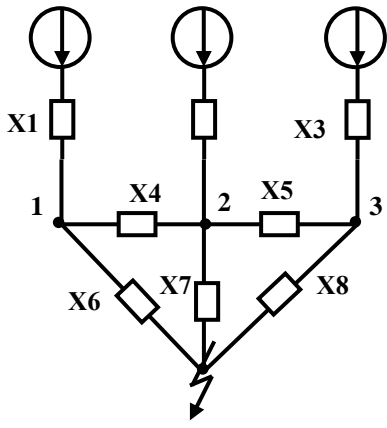


Рис. 2.3

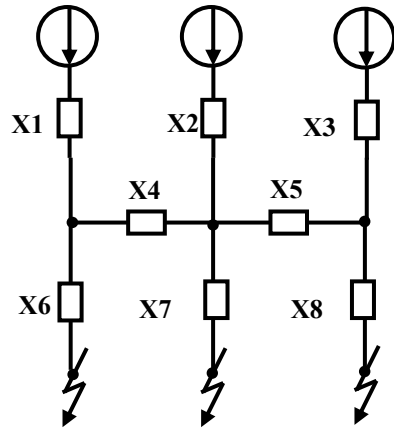


Рис. 2.4

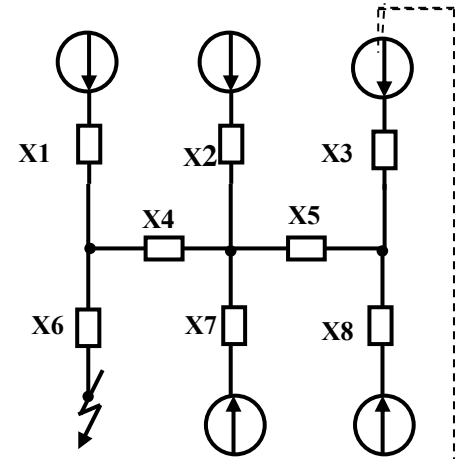


Рис. 2.5

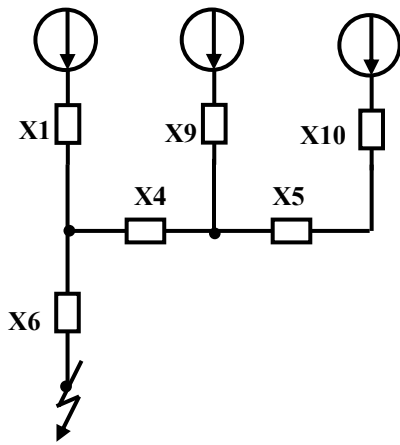


Рис. 2.6

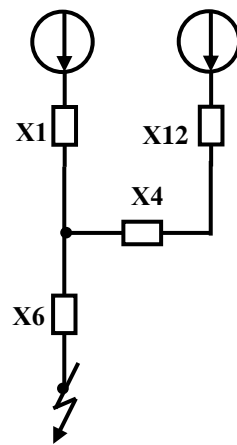


Рис. 2.7

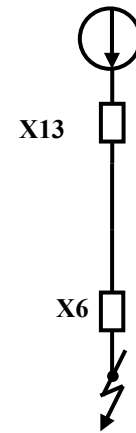


Рис. 2.8

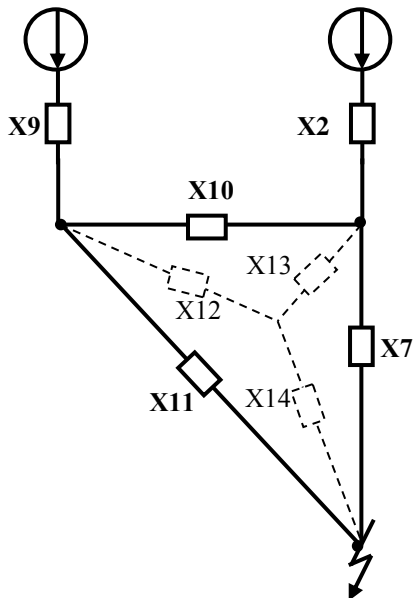


Рис. 2.9

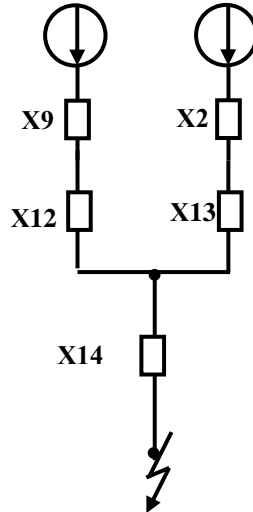


Рис. 2.10

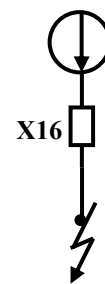


Рис. 2.11

3) Если генераторные ветви $1, 2, 3$ одинаковы и одинаковы элементы $X6, X7, X8$ (рис. 2.3), то элементы $X4$ и $X5$ можно исключить из схемы (рис. 2.12),

т.к. по ним токи не протекают и каждая генерирующая ветвь получается независимой.

4) В ряде случаев преобразование схем замещения СЭС упрощается, если трехлучевую звезду заменить эквивалентным треугольником, затем разрезать его по вершине, где приложена ЭДС. Образовавшиеся параллельные ветви заменяют эквивалентными с такой же ЭДС.

В общем случае, когда все элементы различны (рис. 2.15), тогда необходимо преобразовать одну из звезд Y ($X5-X3-X8$) в эквивалентный треугольник Δ ($X9-X10-X11$) (рис. 2.16 и 2.17), затем разрезать его вершину, где приложена ЭДС, и к образовавшимся ветвям подключить по такой же ЭДС (рис. 2.18). Образовавшиеся параллельные ветви 2 и 10, 7 и 9 заменить эквивалентными (рис. 2.19).

Замена двух и более однотипных источников питания возможно, если источники находятся в одинаковых условиях по отношению к точке КЗ, что проверяется по условию

$$\frac{S_{1НОМ} \cdot X_{*PE31}}{S_{2НОМ} \cdot X_{*PE32}} = 0,4 \div 0,5, \quad (2.2)$$

где $S_{1НОМ}$, $S_{2НОМ}$ - номинальные мощности источников,

x_{*PE31} , x_{*PE32} - результирующее сопротивление между источником и точкой КЗ.

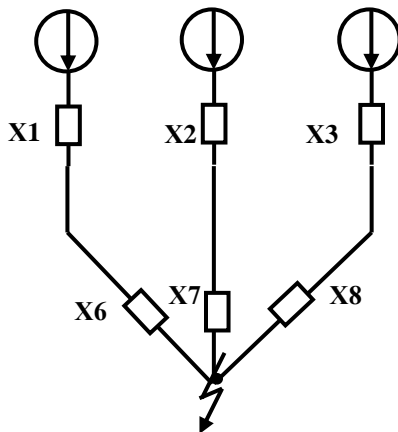


Рис. 2.12

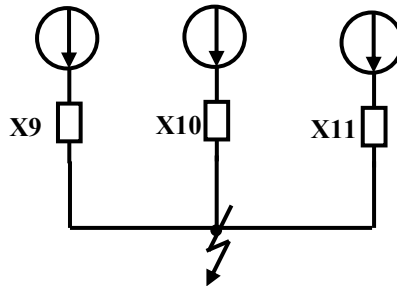


Рис. 2.13

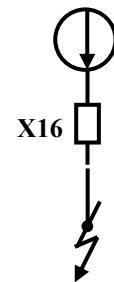


Рис. 2.14

Для СЭС промышленных предприятий характерно совместное питание от энергетической системы и электростанции предприятия. Объединение этих источников допустимо, если расчетное сопротивление каждой ветви между источником и точкой КЗ $X_{*PE3} > 3$.

При упрощении схемы замещения можно пренебречь источником меньшей мощности, если

$$\frac{X_{*PE32}}{x_{*PE31}} \geq 2 \text{ и } \frac{S_{2НОМ}}{S_{1НОМ}} \leq 0,05, \quad (2.3)$$

где $S_{2НОМ}$ - мощность меньшего источника питания.

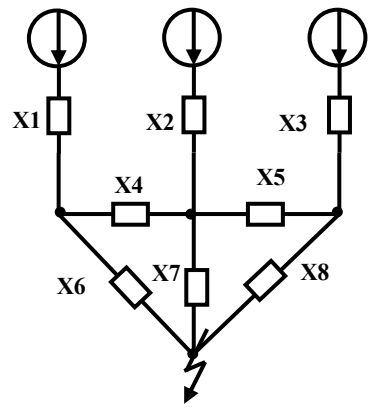


Рис. 2.15

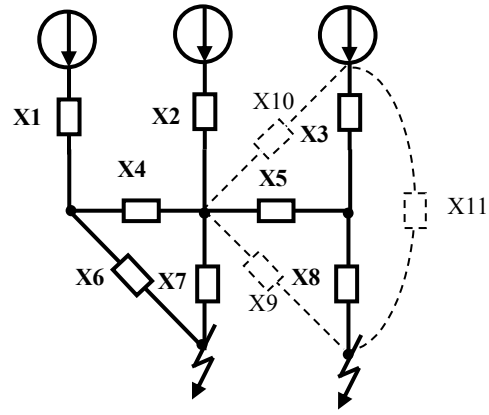


Рис. 2.16

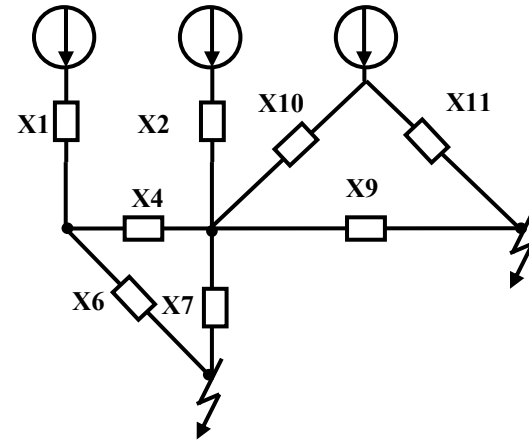


Рис.2.17

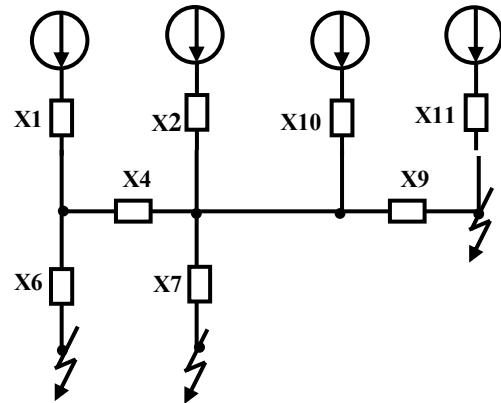


Рис. 2.18

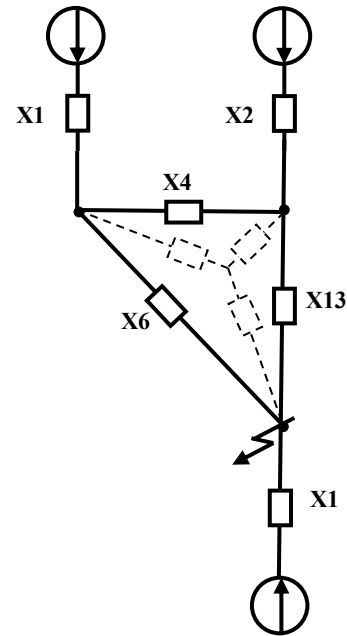


Рис. 2.19

2.5. Система относительных единиц

Сопротивления элементов, ЭДС источников питания, а также токи ветвей и напряжений в любых точках схемы замещения могут быть выражены в именованных или относительных единицах. Расчет токов КЗ в высоковольтных сетях обычно производится в относительных единицах, так как схема СЭС имеет несколько ступеней трансформации. Расчет токов КЗ в сетях напряжением до 1000 В производится в именованных единицах.

Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу (называемой базисной или основной), т.е. все величины сравниваются с базисной.

При выбранных базисных условиях относительные значения ЭДС, напряжения, тока, мощности и сопротивления будут вычисляться по формулам:

$$\begin{aligned} E_{*\delta} &= \frac{E}{U_B}; & U_{*\delta} &= \frac{U}{U_B}; & I_{*\delta} &= \frac{I}{I_B}; \\ S_{*\delta} &= \frac{S}{S_B}; & Z_{*\delta} &= \frac{Z}{Z_B}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где звездочка (*) указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (δ) - что величина приведена к базисным условиям,

Z - заданное сопротивление на фазу, Ом;

I_B - базисный ток, кА;

U_B - базисное линейное напряжение, кВ;

S_B - базисная мощность, МВ·А.

Следовательно, для расчета в относительных единицах выполняют приведение параметров к базисным условиям на основной ступени напряжения: базисной мощности S_B и базисному напряжению U_B . За базисную мощность S_B принимают произвольную величину, кратную десяти (10, 100, 1000 МВ·А и т.д.), или часто повторяющуюся в схеме номинальную мощность. За базисное напряжение U_B принимают среднее номинальное напряжение U_{CP} основной ступени (обычно в качестве основной ступени выбирают ступень напряжения, где произошло КЗ).

Базисный ток для основной ступени и базисное сопротивление трехфазной системы определяются по формулам:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}; \quad (2.5)$$

$$Z_{*\delta} = \frac{Z}{Z_B} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_B}{U_B} = Z \cdot \frac{S_B}{U_B^2}. \quad (2.6)$$

2.6. Приведение параметров схемы к основной ступени напряжения

Расчетные выражения, используемые для приведения параметров различных элементов исходной расчетной схемы к основной ступени напряжения, зависят от того, известны или не известны фактические коэффициенты трансформации всех трансформаторов и автотрансформаторов

расчетной схемы, а также от того, в каких единицах требуется выразить параметры схемы замещения: именованных или относительных. Обычно приведение параметров различных элементов к основной ступени напряжения с учетом фактических коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов называю **точным приведением**, а приведение по средним коэффициентам трансформации – **приближенным**.

При выражении параметров элементов схемы в именованных единицах с приведением к выбранной основной ступени напряжения и с учетом фактических коэффициентов трансформации приведенные значения ЭДС источников, напряжения, тока и сопротивлений различных элементов схемы следует определять по формулам:

$$\dot{E} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N) \cdot E, \quad (2.7)$$

$$\dot{U} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N) \cdot U, \quad (2.8)$$

$$\dot{I} = \frac{I}{(k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N)} \cdot I, \quad (2.9)$$

$$\dot{Z} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N)^2 \cdot Z, \quad (2.10)$$

где E, U, I, Z - приводимые параметры или действительные значения величин, ступени, где они известны. Эти величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько имеется трансформаторов на пути между приводимой цепью и принятой основной ступенью;

$\dot{E}, \dots, \dot{I}, \dot{Z}$ - приведенные параметры к основной ступени;

k_1, k_2, \dots, k_N - действительные коэффициенты трансформаторов - это отношение напряжения холостого хода обмотки, обращенной к основной ступени напряжения, к напряжению обмотки другой ступени, более близкой к ступени, элементы которой подлежат приведению.

Для основной ступени напряжения базисный ток

$$I_{Б.ОСН} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{Б.ОСН}}. \quad (2.11)$$

Для других ступеней напряжения базисные условия пересчитывают по формулам

$$U_{\delta N} = \frac{U_{Б.ОСН}}{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N}, \quad (2.12)$$

$$I_{\delta N} = (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N) \cdot I_{Б.ОСН}, \quad (2.13)$$

или проще, поскольку базисная мощность для всех ступеней напряжения одинакова,

$$I_{Б.N} = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{Б.N}}. \quad (2.14)$$

Приведение в именованных единицах. Все сопротивления элементов схемы в этом случае должны быть выражены в омах. Для элементов, сопротивления которых приведены в относительных номинальных единицах (генераторов, трансформаторов и др.), выражения сопротивлений будут следующими:

$$Z = Z_{*НОМ} \cdot Z_{НОМ} = Z_{*НОМ} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = Z_{*НОМ} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ}}. \quad (2.15)$$

Сопротивления, приведенные к основной ступени напряжения, определяются с учетом формулы (2.10)

$$Z_{\sigma} = Z_{*НОМ} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N)^2, \quad (2.16)$$

$$Z_{\sigma} = Z_{*НОМ} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ}} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_N)^2. \quad (2.17)$$

Токи и напряжения, рассчитываемые в схеме, реальны только для ее основной ступени. Истинные токи и напряжения на других ступенях схемы находятся пересчетом по выражениям (2.8) и (2.9).

Приведение в относительных базисных единицах.

Для расчета параметров схемы в относительных единицах необходимо выбрать базисные единицы для одной из ступеней схемы, а затем по формулам (2.12) и (2.14) определить базисные напряжения и базисные токи для других ступеней.

Затем в относительных базисных единицах рассчитываются все величины по выражениям (2.4), причем в каждом из указанных выражений под U_B , I_B , Z_B следует понимать базисные параметры той ступени трансформации, на которой находятся подлежащие приведению элементы. Если в приведении участвуют действительные коэффициенты трансформации, то приведение считается точным.

В практических расчетах применяется приближенное приведение, позволяющее упростить выражения, уменьшить объем вычислений.

При ***приближенном приведении*** параметров рекомендуется замена действительных напряжений холостого хода обмоток трансформаторов или автотрансформаторов, а также номинальных напряжений различных элементов (кроме реакторов) расчетной схемы, находящихся на одной ступени трансформации, средними номинальными напряжениями $U_{ср.ном.}$

Шкала этих напряжений, принятая исходя из номинальных напряжений сетей, следующая: 1175; 770; 515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,4; 0,23; 0,127 кВ, что на 5% выше соответствующего номинального напряжения линии электропередачи.

Коэффициент трансформации любого трансформатора или автотрансформатора равен отношению $U_{ср}$ тех ступеней, которые он связывает, а результирующий коэффициент трансформации всех трансформаторов расчетной схемы определяется отношением средних номинальных напряжений крайних ступеней. Расчетные выражения при этом становятся проще.

Выражения (2.7)-(2.10), используемые для определения в именованных единицах параметров элементов, приведенных к основной ступени трансформации, где находится точка КЗ, упрощаются и принимают вид

$$\dot{E} = \frac{U_B}{U_{ср}} \cdot E, \quad \dot{U} = \frac{U_B}{U_{ср}} \cdot U, \quad (2.18)$$

где U_{CP} – номинальное напряжение ступени, с которой выполняется приведение;

U_B – то же основной ступени.

Расчет относительных базисных сопротивлений производится различными формулами в зависимости от способа задания сопротивления на расчетной схеме.

Если сопротивление элемента задано в Омах:

$$Z_{*\delta} = Z \cdot \frac{S_B}{U_{BN}^2}, \text{ или } Z_{*\delta} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{BN}}{U_{BN}}. \quad (2.19)$$

Если сопротивление элемента задано в относительных единицах:

$$Z_{*\delta} = Z_* \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}. \quad (2.20)$$

Если сопротивление элемента задано в %:

$$Z_{*\delta} = \frac{Z, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}. \quad (2.21)$$

Если сопротивление элемента задано в относительных единицах при номинальных условиях (т.е. при номинальном напряжении $U_{НОМ}$ и номинальной мощности $S_{НОМ}$ элемента), то сопротивление, приведенное к основной ступени напряжения, определяется по формуле:

$$Z_{*\delta} = Z_{*НОМ} \cdot \frac{I_{BN} \cdot U_{НОМ}}{I_{НОМ} \cdot U_{BN}}. \quad (2.22)$$

В практических расчетах сопротивления элементов короткозамкнутой цепи в относительных единицах, приведенные к базисным условиям, определяют по нижеприведенным формулам.

1) **Синхронный генератор, компенсатор и электродвигатель** при включении на ступень напряжения N с базисным напряжением $U_{BN} = U_{CP}$

$$X_{*\delta} = X''_{*d} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ}}, \quad (2.23)$$

где X''_{*d} - сверхпереходное сопротивление по продольной оси в начальный момент КЗ;

$S_{НОМ}$ - номинальная мощность генератора, МВ·А.

Для этих элементов заводами-изготовителями указывается сверхпереходное продольное индуктивное сопротивление по продольной оси X''_{*d} в относительных единицах. Если исходное значение сопротивления X''_{*d} неизвестно, то можно использовать данные, приведенные в таблице.

2) **Линии электропередачи** при включении на ступени с напряжением $U_{CP,НОМ}$

$$X_{*\delta} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_B}{U_{CP,НОМ}^2}, \quad (2.24)$$

где $X_{уд}$ – удельное сопротивление линии, Ом/км можно определить по таблице;

l – протяженность линии, км.

3) **Трехфазные двухобмоточные трансформаторы** при включении на ступень напряжения N с базисным напряжением $U_{BN} = U_{CP}$

$$X_{*T\bar{6}} = \frac{u_{\kappa}, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}, \quad (2.25)$$

где $u_{\kappa}/100 = u_{*НОМ.Т} \approx X_{*НОМ.Т}$;

$S_{НОМ}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

4) **Трехфазные трехобмоточные трансформаторы** (автотрансформаторы) при включении на ступень напряжения N с базисным напряжением $U_{BN} = U_{CP}$

$$X_{*BT\bar{6}} = \frac{u_{KB}, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}, \quad X_{*CT\bar{6}} = \frac{u_{KC}, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}, \quad X_{*HT\bar{6}} = \frac{u_{KH}, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}, \quad (2.26)$$

где $u_{*BT\bar{6}} = 0,5(u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H})$;

$u_{*CT\bar{6}} = 0,5(u_{KB-C} + u_{KC-H} - u_{KB-H})$;

$u_{*HT\bar{6}} = 0,5(u_{KB-H} + u_{KC-H} - u_{KB-C})$. (2.27)

5) Для группы **трех однофазных трансформаторов** (автотрансформаторов), при включении на ступень напряжения N с базисным напряжением $U_{BN} = U_{CP}$, необходимо учесть, что мощность их дана в таблице на одну фазу, поэтому номинальная мощность должна быть утроена.

$$X_{*BT\bar{6}} = \frac{u_{KB}, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{3 \cdot S_{НОМ}},$$

$$X_{*CT\bar{6}} = \frac{u_{KC}, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{3 \cdot S_{НОМ}},$$

$$X_{*HT\bar{6}} = \frac{u_{KH}, \%}{100} \cdot \frac{S_B}{3 \cdot S_{НОМ}}. \quad (2.28)$$

6) **Токоограничивающие реакторы** с номинальным напряжением реактора $U_{НОМ.Р}$ выше среднего номинального напряжения сети

$$X_{*P\bar{6}} = \frac{X_{НОМ.Р}, \%}{100} \cdot \frac{I_{\bar{6}N} \cdot U_{НОМ.Р}}{I_{НОМ.Р} \cdot U_{\bar{6}N}}, \quad (2.29)$$

где $X_{*НОМ.Р}$, $I_{НОМ.Р}$, $U_{НОМ.Р}$ – номинальные сопротивление, ток и напряжение реактора.

Если номинальное напряжение реактора $U_{НОМ.Р}$ равно среднему номинальному напряжению сети,

$$X_{*P\bar{6}} = \frac{X_{НОМ.Р}, \%}{100} \cdot \frac{I_{\bar{6}N}}{I_{НОМ.Р}}. \quad (2.30)$$

7) **Обобщенная нагрузка** в схему замещения вводится приведенным сопротивлением

$$X_{*НАГР.\bar{6}} = X''_{*НАГР} \cdot \frac{S_B}{S_{НАГР}}, \quad (2.31)$$

где $X''_{*НАГР} = 0,35$ – сверхпереходное сопротивление нагрузки.

8) Приведенное сопротивление **питающей системы**

$$X_{*C\bar{6}} = \frac{S_B}{S_K}, \quad (2.32)$$

где S_K – заданная мощность КЗ на шинах понижающей подстанции в точках, где СЭС связана с ЭЭС.

Параметры элементов электрической схемы замещения можно выразить в относительных единицах как по точному приведению, так и по приближенному. Для точного приведения рекомендуется применять следующую последовательность:

1. Обозначить цифрами имеющиеся в схеме ступени трансформации, считая ступень короткого замыкания (КЗ) первой.

2. Принять для ступени короткого замыкания базисные мощность S_b и напряжение U_{b1} .

3. Пересчитать U_{b1} последовательно на другие ступени трансформации:

$$U_{b2} = U_{b1} \frac{1}{k_{1-2}}, \quad U_{b3} = U_{b2} \frac{1}{k_{2-3}} \text{ и т.д.}$$

Особо следует обратить внимание на контроль получаемых значений U_{b2} , U_{b3} и т.д., который состоит в том, что при принятых условиях значения U_{b2} , U_{b3} и т.д. не должны отличаться от номинальных напряжений соответствующих ступеней трансформации более чем на 10 - 15%,

Подсчитать значения базисных токов для тех ступеней трансформации, на которых располагаются токоограничивающие реакторы.

4. По формулам точного приведения, представленным в таблице 2.3, рассчитать значения сопротивлений элементов схемы замещения в относительных единицах.

Формулы приближенного приведения используются тогда, когда нет сведений о действительных коэффициентах трансформации всех или части трансформаторов рассматриваемой схемы или когда допущения расчетного метода приводят к погрешности того же порядка, что и погрешность, обусловленная приближенным приведением параметров схемы замещения. Сущность приближенного приведения элементов к одной ступени трансформации состоит в том, что для каждой ступени трансформации вместо действительных напряжений начала и конца, которые разнятся не более чем на 10%, в расчетах устанавливают среднее номинальное напряжение $U_{ср.ном.}$

Таблица 2.3

Формулы точного приведения элементов СЭС

Элемент схемы	Формула точного приведения
1	2
Генератор	$X_{*Гб} = X_{*d}'' \cdot \frac{S_b \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_b^2}$
Трансформатор трехфазный двухобмоточный	$X_{*Тб} = \frac{u_k, \%}{100} \cdot \frac{S_b \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_b^2}$

1	2
Трансформатор трехфазный трехобмоточный (автотрансформатор)	$X_{*BT\bar{0}} = \frac{u_{KB}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{0}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{0}}^2}$
	$X_{*CT\bar{0}} = \frac{u_{KC}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{0}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{0}}^2}$
	$X_{*HT\bar{0}} = \frac{u_{KH}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{0}} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\bar{0}}^2}$
	$u_{*BT\bar{0}} = 0,5(u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H})$ $u_{*CT\bar{0}} = 0,5(u_{KB-C} + u_{KC-H} - u_{KB-H})$ $u_{*HT\bar{0}} = 0,5(u_{KB-H} + u_{KC-H} - u_{KB-C})$
Три однофазных трансформатора или три однофазных автотрансформатора	$X_{*BT\bar{0}} = \frac{u_{KB}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{0}} \cdot U_{ном}^2}{3 \cdot S_{ном} \cdot U_{\bar{0}}^2}$
	$X_{*CT\bar{0}} = \frac{u_{KC}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{0}} \cdot U_{ном}^2}{3 \cdot S_{ном} \cdot U_{\bar{0}}^2}$
	$X_{*HT\bar{0}} = \frac{u_{KH}, \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{0}} \cdot U_{ном}^2}{3 \cdot S_{ном} \cdot U_{\bar{0}}^2}$
Реактор	$X_{*P\bar{0}} = \frac{X_{ном.P}, \%}{100} \cdot \frac{I_{\bar{0}N} \cdot U_{ном.P}}{I_{ном.P} \cdot U_{\bar{0}N}}$
ЛЭП	$X_{*Л\bar{0}} = X_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{0}}}{U_{ср.ном}^2}$
Нагрузка	$X_{*нагр.\bar{0}} = X''_{нагр} \cdot \frac{S_{\bar{0}}}{S_{нагр}}$
Система	$X_{*с.\bar{0}} = \frac{S_{\bar{0}}}{S_{КЗ}}$

2.7. Переходные процессы в неразветвленной цепи

На рисунке 2.20 представлена простейшая симметричная трехфазная цепь, которая присоединена к источнику синусоидального напряжения с неизменными амплитудой и частотой.

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_{MAX} \cdot \sin(\omega t + \alpha), \\ \dot{U}_B &= U_{MAX} \cdot \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ), \\ \dot{U}_C &= U_{MAX} \cdot \sin(\omega t + \alpha - 240^\circ). \end{aligned} \quad (2.33)$$

В цепи условно принято, что на одном ее участке имеется взаимоиндукция между фазами, а на другом она отсутствует.

Рассмотрим переходный процесс, вызванный включением выключателя Q , что равносильно возникновению металлического трехфазного короткого замыкания между двумя участками данной цепи.

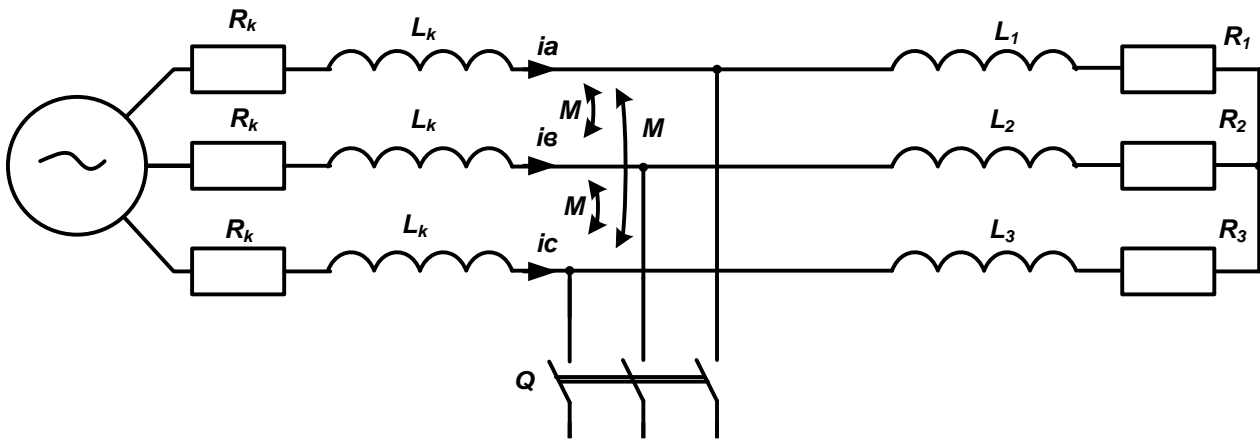


Рис. 2.20. Простейшая трехфазная электрическая цепь

Векторная диаграмма рассматриваемой цепи показана на рисунке 2.21. Векторы $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – характеризуют предшествующий режим рассматриваемой цепи, а вертикаль $t-t$ является неподвижной линией времени. Векторы напряжения опережают векторы тока на угол φ . Угол φ между током и напряжением каждой фазы определяется соотношением активных и индуктивных сопротивлений всей цепи, включая нагрузку. Мгновенные значения тока и напряжения определяются проекциями на вертикальную ось $t-t$. Момент возникновения КЗ фиксируется значением угла α (т.е. фазой включения) между вектором напряжения фазы A и горизонталью.

Угол сдвига φ_H между векторами тока и напряжения для нормального режима определяется соотношением активных и индуктивных сопротивлений всей цепи, включая нагрузку. При возникновении КЗ для реальных цепей обычно $\varphi_K = 45^\circ \div 90^\circ$, так как $x_K \gg r_K$. Векторная диаграмма показана при $\varphi_K = 90^\circ$.

После включения выключателя цепь разбивается на два участка, в которых переходные процессы протекают независимо. В правом зашунтированном участке с R_I и L_I ток будет поддерживаться до тех пор, пока запасенная в индуктивности L_I энергия магнитного поля не перейдет в тепло, выделяющееся в активном сопротивлении R_I . Этот ток при активно-индуктивном характере сопротивления цепи не превышает тока нормального режима и, постепенно затухая до нуля, не представляет опасности для оборудования.

Его решение общеизвестно:

$$i = i_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_{A1}}}, \quad (2.34)$$

оно показывает, что здесь имеется только свободный ток, который затухает по экспоненте с постоянной времени

$$T_{A1} = \frac{L_I}{R_I} = \frac{x_I}{\omega \cdot R_I}, \text{ сек.} \quad (2.35)$$

Начальное значение свободного тока i_0 в каждой фазе зашунтированного участка цепи равно предшествующему мгновенному значению тока нагрузки

$(i_{A(0)} = i_H)$, поскольку в цепи с индуктивностью внезапного изменения тока произойти не может (рисунок 2.22).

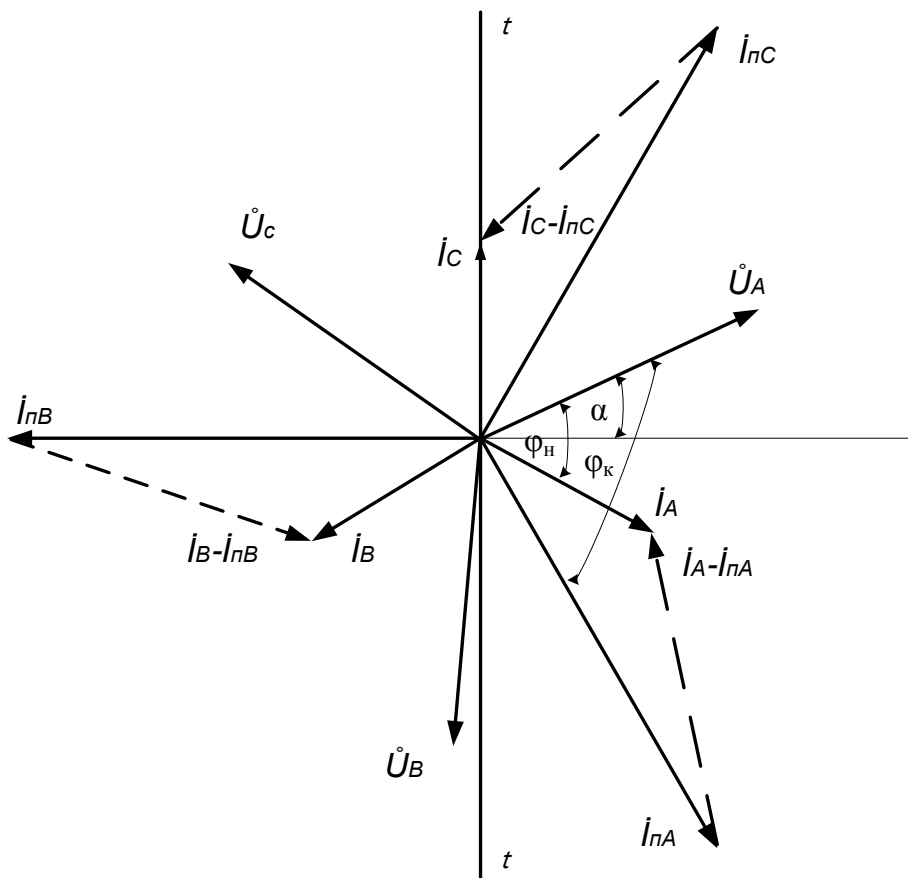


Рис. 2.21. Векторная диаграмма для начального момента трехфазного короткого замыкания

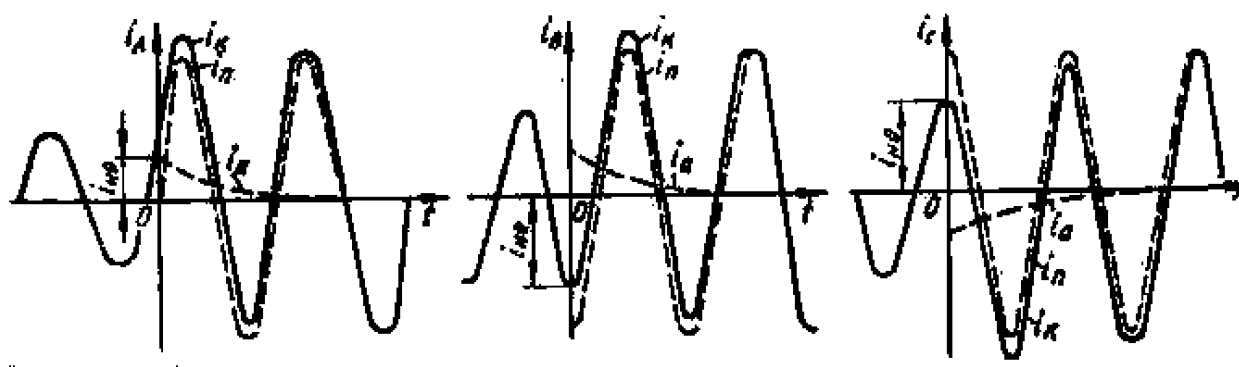


Рис. 2.22. Изменение аperiodического тока

В одной из фаз свободный ток может вообще отсутствовать, если в момент возникновения КЗ ток нагрузки проходил через нуль, в двух других фазах свободные токи равны по величине, но противоположно направлены.

Изменение режима в левой части цепи, содержащей источник питания, при наличии индуктивности L_K также сопровождается переходным процессом,

описывающим известным из курса «ТОЭ» дифференциальным уравнением равновесия для любой из фаз левой цепи:

$$u = i \cdot R_K + L_K \cdot \frac{di}{dt}, \quad (2.36)$$

где $L_K = L - M$ – результирующая индуктивность с учетом двух других фаз.

Решение этого уравнения дает выражение для мгновенного значения тока в любой момент времени от начала КЗ

$$i = \frac{U_{MAX}}{Z_K} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{A0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a1}}}, \quad (2.37)$$

где U_{MAX} – амплитудное значение фазного напряжения источника;

Z_K – полное сопротивление участка, присоединенного к источнику.

Как видно из уравнения, полный ток КЗ складывается из двух составляющих: вынужденной, обусловленной действием напряжения источника и свободной, обусловленной изменением запаса энергии магнитного поля в индуктивности.

Вынужденная составляющая тока КЗ имеет периодический характер с частотой, равной частоте напряжения источника. Называют эту составляющую обычно периодической составляющей тока КЗ

$$i_{п.т} = \frac{U_{MAX}}{Z_K} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) = I_{п.т. MAX} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K), \quad (2.38)$$

где $I_{п.т}$ – амплитудное значение периодической составляющей тока.

Свободная составляющая тока

$$i_{A.t} = i_{A.0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a1}}} \quad (2.39)$$

имеет аперриодический характер изменения, поэтому ее называют аперриодической составляющей тока КЗ. В процессе КЗ аперриодический ток затухает по закону показательной функции, т.е. затухает по экспоненте с постоянной времени.

$$T_A = \frac{L_K}{R_K} = \frac{x_K}{\omega \cdot R_K}. \quad (2.40)$$

Быстрота затухания аперриодического тока зависит от соотношения между активным и индуктивным сопротивлениями цепи КЗ: чем больше активное сопротивление, тем затухание происходит интенсивней. Для малых R среднее значение $T_A = 0,05$ с, а время затухания аперриодического тока при КЗ на зажимах генератора составляет $0,1 - 0,2$ с.

Периодический ток $\dot{I}_{пА}$, $\dot{I}_{пВ}$, $\dot{I}_{пС}$, генерируемый источником питания, имеет величину больше предыдущего тока \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C и сдвиг по фазе ($\varphi_K \approx 90^\circ$). Однако мгновенного увеличения тока в обмотке статора генератора и короткозамкнутой цепи произойти не может из-за того, что цепь обладает индуктивностью L_K . В начальный момент КЗ в обмотке статора и индуктивных сопротивлениях цепи наводится ЭДС самоиндукции, препятствующая изменению тока. Эта ЭДС индуцирует ток самоиндукции встречного направления, так называемый свободный аперриодический ток. Аперриодическим этот ток называется потому, что не изменяет своего направления.

В результате взаимодействия этих токов полный ток в цепи в начальный момент КЗ остается равным мгновенному значению тока нагрузки:

$$i_{A0} + i_{I0} = i_{H0}.$$

На основании уравнения апериодический ток равен:

$$i_{A0} = i_{H0} - i_{I0} = I_{MAX} \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{П.МАХ} \cdot \sin(\alpha - \varphi_K). \quad (2.41)$$

Из выражения следует, что начальное значение апериодического тока будет максимальным при отсутствии тока нагрузки и может достигать амплитуды периодической составляющей (при $i_{H0} = 0$, $i_{A0MAX} = -i_{I0} = -I_{П0MAX}$).

Амплитуда периодического тока зависит от ЭДС генератора, его внутреннего сопротивления и сопротивления внешней цепи.

$$I_{П.МАХ} = \frac{U_{МАХ}}{Z_K}. \quad (2.42)$$

Полный ток короткого замыкания изменяется в процессе КЗ по сложному закону, зависящему от многих факторов: мощности источника питания, времени затухания апериодических токов, наличия автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) на генераторах и т.п.

Часть процесса КЗ, которая характеризуется изменением по величине амплитудных значений тока КЗ, называют **неустановившимся или переходным процессом**.

В **установившемся режиме** все возникшие в начальный момент КЗ свободные токи затухают и изменение напряжения на ее зажимах под действием АРВ прекращается.

Рассмотрим трехфазные КЗ для случаев питания сети: от генератора без АРВ, от генератора с АРВ и от системы неограниченной мощности.

Системой неограниченной мощности S_∞ называют мощный источник питания, напряжение на шинах которого остается постоянным при любых изменениях режима сети - сбросах нагрузки, перегрузках, при КЗ. Внутреннее сопротивление такого источника принимается равным нулю ($X_C = 0$).

В действительности мощность источника всегда имеет вполне определенное значение, но свойства системы неограниченной мощности широко используются для практических расчетов максимально возможных токов КЗ.

2.8. Короткое замыкание на зажимах генератора без автоматического регулирования возбуждения

Внезапное КЗ на зажимах генератора приводит к возникновению в нем переходного процесса, обусловленного уменьшением сопротивления короткозамкнутой цепи по сравнению с ее сопротивлением в нормальном режиме.

Переход электрической цепи из одного состояния в другое сопровождается появлением апериодического (свободного) тока, который накладывается на периодический (принужденный) ток, генерируемый источниками питания. Изменения полного тока и его составляющих на зажимах одной из фаз трехфазного генератора без АРВ при КЗ показаны на рисунке 2.23.

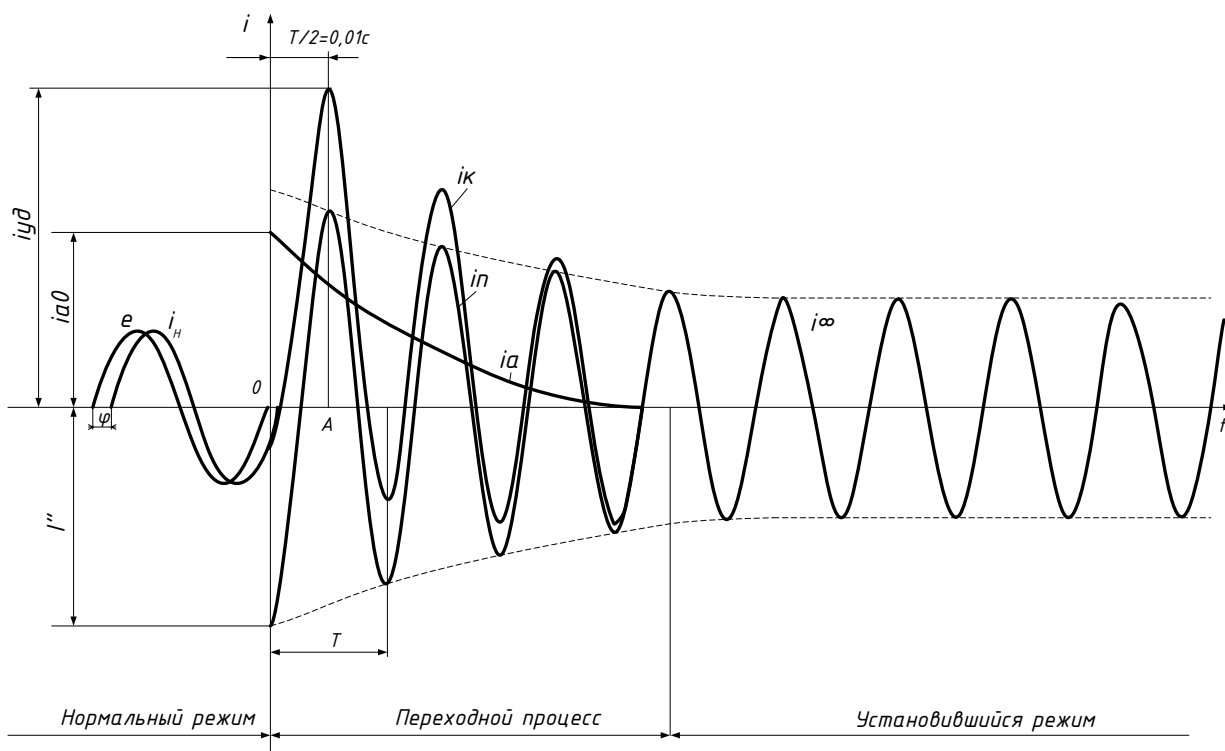


Рис. 2.23. Изменение полного тока и его составляющих одной из фаз генератора без АРВ при внезапном КЗ на его зажимах

До начала КЗ (точка 0) генератор работал в нормальном режиме, при котором в цепи нагрузки протекал ток i_n , отстающий по фазе от ЭДС на угол φ . В момент времени, когда ток нагрузки имел значение i_{n0} , произошло КЗ, под влиянием которого наступил переходный процесс, сопровождающийся увеличением тока.

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

Начальные значения аperiodических составляющих зависят от фазы включения цепи на КЗ. Максимальное значение аperiodической составляющей тока КЗ в начальный момент i_{A0} зависит как от фазы включения, так и от предшествующего тока нагрузки i_{n0} поврежденной цепи.

При $\varphi_k \approx 90^\circ$ максимум аperiodической составляющей тока КЗ наблюдается при нулевой фазе включения на КЗ и отсутствии предшествующего тока в цепи. В этом случае значение i_{A0} оказывается равным амплитуде периодической составляющей, если в момент КЗ эта составляющая имеет максимум, т. е.

$$i_{A0} = i_{n0} = I_{п.макс} = \sqrt{2} I'' \quad (2.43)$$

Полный ток КЗ во время переходного процесса состоит из периодической и аperiodической составляющих.

Мгновенное значение полного тока КЗ в любой момент времени t

$$i_{Kt} = i_{\Pi} + i_{At}. \quad (2.44)$$

Периодическая составляющая тока КЗ, если напряжение источника в течение переходного процесса не изменяется, остается неизменной по амплитуде и определяется выражением

$$i_{\Pi} = \frac{U_{MAX}}{Z_K} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K). \quad (2.45)$$

Для генераторов без АРВ с исчезновением аperiodического тока переходной процесс не заканчивается.

Поскольку генератор является источником конечной мощности и в соответствии с принятым условием работает без АРВ, напряжение на его зажимах, а следовательно, и периодическая составляющая тока КЗ с течением времени уменьшаются. Объясняется это тем, что по мере затухания свободных токов, наведенных в начальный момент КЗ в обмотке возбуждения, демпферных обмотках и в массиве ротора, поток реакции статора при неизменном токе возбуждения ослабляет результирующий магнитный поток в воздушном зазоре генератора. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению ЭДС, наводимой в статоре, падению напряжения на зажимах генератора и изменению периодической составляющей тока КЗ.

На рисунке 2.23 периодическая составляющая тока КЗ i_{Π} в течение переходного процесса изображена в виде синусоиды с убывающей амплитудой. Заметим при этом, что длительность переходного процесса превышает время затухания аperiodической составляющей тока КЗ. Кроме того, начальный ток КЗ больше установившегося значения тока ($I'' > I_{\infty}$).

Аperiodическая составляющая тока КЗ в любой момент времени t определяется исходя из затухания ее по экспоненциальному закону по (2.39)

$$i_{At} = i_{A.0} \cdot \exp(-t/T_a) = i_{A.0} \cdot \gamma, \quad (2.46)$$

где $\gamma = \exp(-t/T_a) = i_{At} / i_{A.0}$ - коэффициент затухания аperiodической составляющей.

Кривая полного тока КЗ получается при сложении значений периодической и аperiodической составляющих в каждый момент времени с учетом их знака. Она асимметрична относительно оси времени. Ее криволинейной осью симметрии служит кривая аperiodической составляющей. После полного затухания последней кривая полного тока КЗ сливается с периодической составляющей. Максимальное мгновенное значение полного тока КЗ называется **ударным током**. Он возникает при первом наибольшем значении периодической составляющей, совпадающей по знаку с аperiodической составляющей тока КЗ, т.е. через полпериода после появления КЗ ($t=0,01$ с).

2.9. Короткое замыкание на зажимах генератора с автоматическим регулированием возбуждения

Назначение АРВ состоит в поддержании на зажимах генератора номинального напряжения при всех возможных режимах работы генератора.

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

Повышение напряжения генератора благодаря АРВ начинается не в момент возникновения КЗ, а через некоторое время, которое необходимо для срабатывания АРВ. Этот временной интервал определяется временем понижения напряжения до значения, при котором вступает в действие АРВ, и собственным временем срабатывания АРВ. Поэтому ток КЗ до вступления в действие АРВ уменьшается так же, как и при отсутствии АРВ, а затем начинает увеличиваться и достигает установившегося значения, соответствующего возросшему напряжению генератора за счет действия АРВ (рис. 2.24).

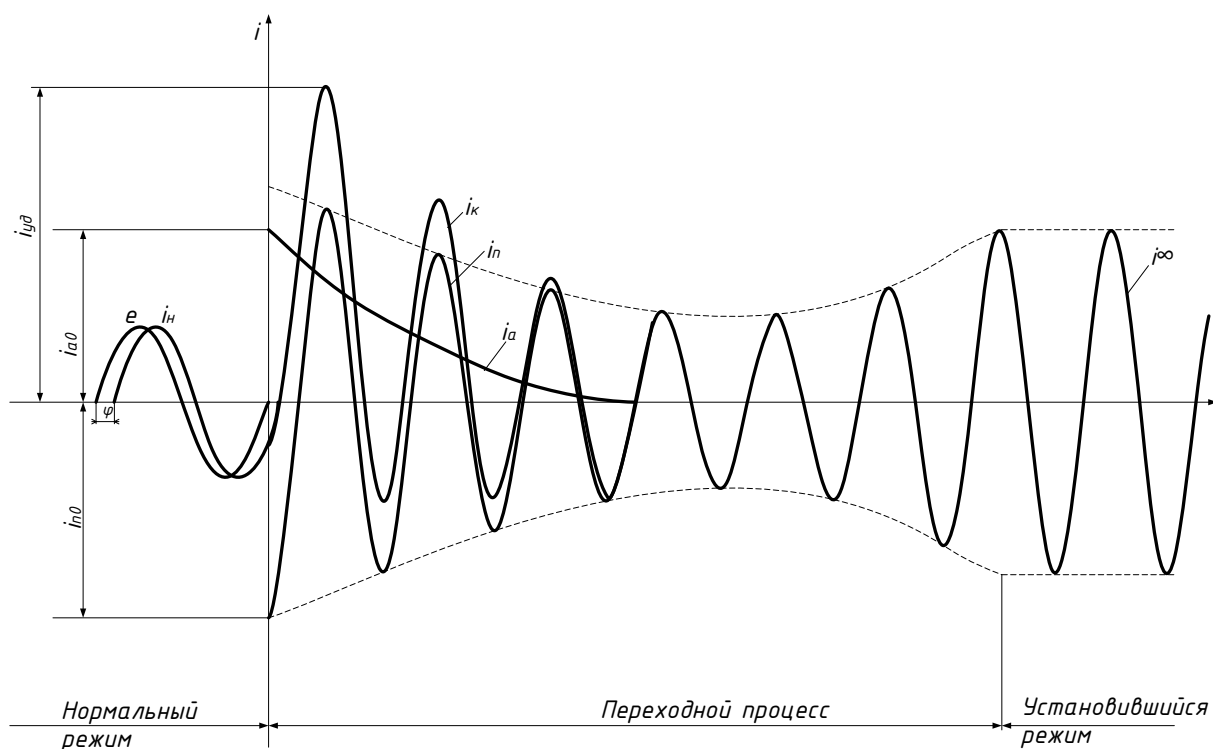


Рис. 2.24. Изменение полного тока и его составляющих одной из фаз генератора с АРВ при внезапном КЗ на его зажимах

В связи с тем, что действие АРВ проявляется через несколько периодов после появления КЗ, начальные значения полного тока КЗ и его составляющих, а также ударный ток КЗ остаются такими же, как и при отсутствии АРВ. Если под действием АРВ напряжение генератора достигает предельного значения (может принимать также номинальное значение), то ток КЗ в дальнейшем остается неизменным.

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

2.10. Короткое замыкание в цепи, питающейся от системы

Из предыдущего известно, что при КЗ в элементах сети напряжение на шинах системы неограниченной мощности не изменяется. Неизменность напряжения определяет постоянство амплитуд вынужденной периодической составляющей тока КЗ в течение всего переходного процесса.

При КЗ в элементах СЭС токи в обмотках генератора будут меньше, чем в случае КЗ на зажимах генератора, так как результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи увеличивается. Вследствие этого уменьшаются влияние КЗ в СЭС на работу генератора, а также пределы изменения тока КЗ в течение переходного процесса, которые зависят от удаленности точки КЗ относительно источника и будут тем меньше, чем дальше находится точка КЗ.

При КЗ в удаленных точках СЭС периодическая составляющая тока во время переходного процесса в генераторе практически не изменяется (рис. 2.25).

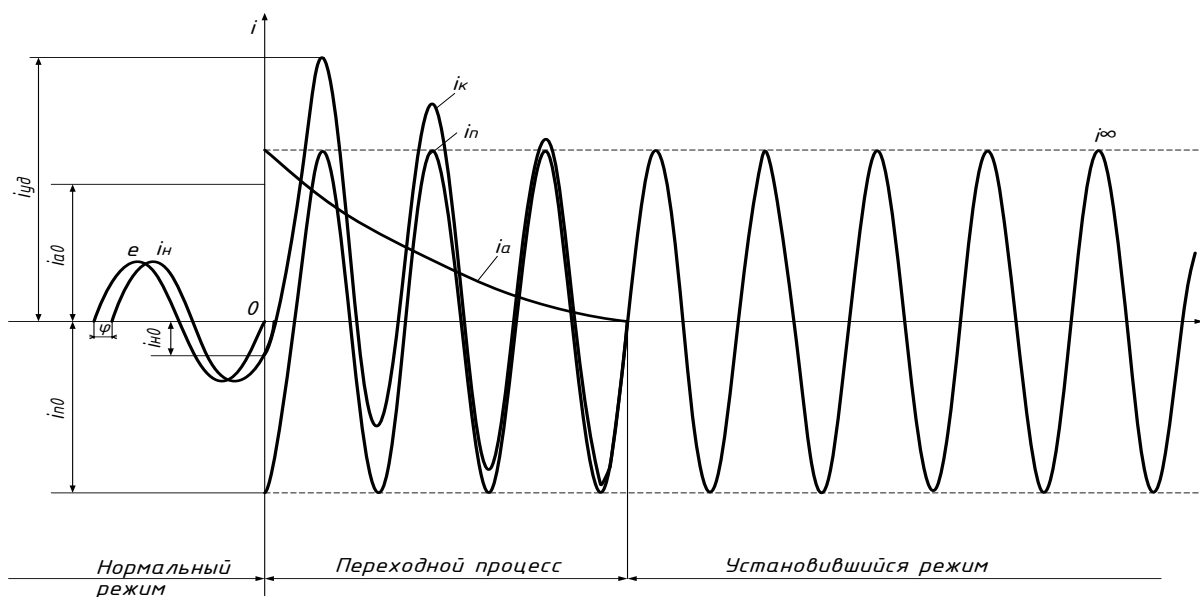


Рис. 2.25. Изменение полного тока и его составляющих при КЗ в удаленных точках СЭС

Удаленной точкой называют такую точку СЭС, при КЗ в которой ток генераторов электростанции изменяется настолько незначительно, что изменением ЭДС генераторов можно пренебречь и считать напряжение на их зажимах неизменным и равным номинальному. При этом ток КЗ может значительно превышать номинальный и является опасным для участка СЭС, где расположена удаленная точка.

Считая, что при КЗ в удаленной точке ЭДС генератора и напряжение на его зажимах неизменны, можем утверждать, что периодическая составляющая тока также не меняется и с самого начального момента КЗ принимает установившееся значение

$$I'' = I_{пт} = I_{\infty}. \quad (2.47)$$

Апериодическая составляющая тока возникает при любой удаленности точки КЗ от источника, поскольку всякая цепь обладает индуктивным сопротивлением, и затухает тем быстрее, чем больше активное сопротивление короткозамкнутой цепи. В протяженных КЛ и сетях напряжением до 1 кВ, где преобладает активное сопротивление, апериодическая составляющая тока затухает в течение 0,15—0,2 с.

2.11. Расчет начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания

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

При расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ в электроустановках напряжением свыше 1 кВ в исходную расчетную схему индивидуально должны быть введены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если между электродвигателями и точкой КЗ отсутствуют токоограничивающие реакторы или силовые трансформаторы. В автономных электрических системах следует учитывать и электродвигатели меньшей мощности, если сумма их номинальных токов составляет не менее 1 % от тока в месте КЗ, определенного без учета этих электродвигателей.

Для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ аналитическим методом по принятой исходной расчетной схеме предварительно следует составить эквивалентную схему замещения, в которой синхронные и асинхронные машины должны быть представлены предварительно приведенными к базисной ступени напряжения или выраженными в относительных единицах при выбранных базисных условиях сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС. Исходные значения сверхпереходных ЭДС следует принимать численно равными их значениям в момент, предшествующий КЗ.

Для синхронных генераторов и электродвигателей сверхпереходную ЭДС в предшествующем режиме следует определять по формуле

$$E'' = \sqrt{(U_{(0)} \pm I_{(0)} \cdot X''_d \cdot \sin \varphi_{(0)})^2 + (I_{(0)} \cdot X''_d \cdot \cos \varphi_{(0)})^2}, \quad (2.48)$$

где $U_{(0)}$, $I_{(0)}$, $\sin \varphi_{(0)}$ – соответственно напряжение на зажимах машины, ток и угол сдвига между векторами напряжения и тока КЗ.

Для синхронных компенсаторов по формуле

$$E'' = U_{(0)} \pm I_{(0)} \cdot X''_d. \quad (2.49)$$

В формулах знак «+» относится к синхронным машинам, которые к моменту КЗ работали в режиме перевозбуждения, а знак «-» - к работавшим с недо возбуждением.

Сверхпереходную ЭДС асинхронных электродвигателей в момент, предшествующий КЗ, следует определять по формуле

$$E'' = \sqrt{(U_{(0)} - I_{(0)} \cdot X''_{AD} \cdot \sin \varphi_{(0)})^2 + (I_{(0)} \cdot X''_{AD} \cdot \cos \varphi_{(0)})^2}, \quad (2.50)$$

где X''_{AD} – сверхпереходное индуктивное сопротивление электродвигателя.

Для обобщенной нагрузки сверхпереходную ЭДС, отнесенную к среднему номинальному напряжению той ступени, на которой эта нагрузка подключена, принимают равной $E''_{*n(ном)} = 0,85$, а сверхпереходное сопротивление, отнесенное к тому же напряжению и суммарной полной мощности (МВ·А) нагрузки, равным $x''_{*n(ном)} = 0,35$.

Таблица 2.4

Средние относительные значения X''_{*d} и E''_{*} при номинальных условиях эксплуатации СЭС

Наименование элемента СЭС	X''_{*d}	E''_{*}
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
Турбогенератор мощностью 100—500 МВт	0,2	1,13
Гидрогенератор с успокоительными обмотками	0,2	1,13
Гидрогенератор без успокоительных обмоток	0,27	1,18
Синхронный компенсатор	0,2	1,2
Синхронный двигатель	0,2	1,1
Асинхронный двигатель	0,2	0,9
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Далее все элементы расчетной схемы приводят к предварительно выбранным базисным условиям (при расчете в относительных единицах) или к одной ступени напряжения (при расчете в именованных единицах). Полученную схему замещения путем соответствующих преобразований приводят к простейшему виду и определяют результирующую ЭДС E .

Если эквивалентная ЭДС $E''_{эkv}$ и результирующее сопротивление выражены в именованных единицах, то начальное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I'' = I_{п0} = \frac{E''_{эkv}}{\sqrt{3} \cdot X_{рез.б}}, \quad (2.51)$$

а если в относительных единицах, то

$$I_{п0} = \frac{E''_{*эkv}}{X''_{*рез.б}} \cdot I_b, \quad (2.52)$$

где I_6 - базисный ток, соответствующий напряжению той ступени трансформации, на которой произошло КЗ.

Для приближенных расчетов можно воспользоваться средними относительными значениями X''_{*d} и E''_* , указанными в таблице 2.4.

В электроустановках напряжением до 1 кВ учет активного сопротивления ветви КЗ при расчете $I_{п0}$ является обязательным.

2.12. Способы определения ударного коэффициента и ударного тока короткого замыкания

Способ расчета ударного тока КЗ зависит от требуемой точности расчета и конфигурации исходной схемы.

При расчете ударного тока КЗ с целью проверки проводников и электрических аппаратов по условиям КЗ допустимо считать, что амплитуда периодической составляющей тока КЗ в момент наступления ударного тока равна амплитуде этой составляющей в начальный момент КЗ.

В практических расчетах ударный ток находят при наибольшей апериодической составляющей. Наибольшее начальное значение апериодической составляющей при холостом ходе в предшествующем режиме и когда вектор напряжения проходит через нуль.

С учетом этих условий выражение для ударного тока КЗ можно записать

$$i_{уд} = I_{п.мах} + I_{п.мах} \cdot e^{-\frac{0,01}{T_a}} = K_{уд} \cdot I_{п.мах} = \sqrt{2} \cdot I_{п0} \cdot K_{уд}, \quad (2.53)$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент, характеризующий превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей тока КЗ, зависит от T_a (рис. 2.26).

Ударный коэффициент рекомендуется определять по формуле:

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}. \quad (2.54)$$

Ударный коэффициент зависит от постоянной времени затухания апериодической составляющей $T_a = \frac{x_K}{314 \cdot r_K}$. При $\frac{x_K}{r_K} \rightarrow 0$ $K_{уд} \rightarrow 1$, а при

$\frac{x_K}{r_K} \rightarrow \infty$ $K_{уд} \rightarrow 2$, т.е. значение ударного коэффициента изменяется в пределах $1 < K_{уд} < 2$.

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент, зависящий от T_a (рис. 2.26).

Значение отношения x/r элементов систем электроснабжения и постоянных времени типичных радиальных ветвей даны в таблицах 2.5 и 2.6.

Таблица 2.5

Средние значения отношения x''/r для элементов системы электроснабжения

<i>Элемент</i>	x''/r
Подстанция энергосистемы, с которой ГПП связана, на напряжение: 35 кВ 110 – 150 кВ 220 – 330 кВ	6,3 6,3 – 10 10 – 13
Электростанция, состоящая из блоков турбогенератор - трансформатор, при мощности генератора: 100 – 200 МВт: 300 МВт 500 МВт	80 100 110
Заводская ТЭЦ, связанная с предприятием на генераторном напряжении, с турбогенераторами мощностью 12 – 60 МВт	50 – 80
Воздушные линии электропередачи напряжением: 35 кВ 110 кВ 150 кВ 220 кВ 330 кВ	0,6 – 1 1,3 – 2,6 3 – 3,5 3,6 – 4 4 – 4,5
Кабельные линии электропередачи напряжением 1/6 – 10/35 кВ, выполняемые трехжильным кабелем сечением алюминиевой жилы: 25 мм ² 35 мм ² 50 мм ² 70 мм ² 95 мм ² 120 мм ² 150 мм ² 185 мм ²	0,06/0,06/0,1 0,08/0,09/0,13 0,11/0,13/0,20 0,16/0,18/0,27 0,21/0,24/0,36 0,27/0,31/0,46 0,35/0,40/0,60 0,44/0,50/0,75
Силовые трансформаторы двухобмоточные 6 – 10/0,4 – 0,69 кВ номинальной мощностью 25 – 2500 кВ·А	2,8/5
Силовые трансформаторы двухобмоточные с высшим напряжением 35 кВ номинальной мощностью 1000 – 10000 кВ·А	5,4-11,5
Силовые трансформаторы двухобмоточные с высшим напряжением 110 кВ номинальной мощностью 10000 кВ·А: 16000 кВ·А	17,5 18,5
Силовые трансформаторы двухобмоточные с высшим напряжением 110 кВ: с расщепленной обмоткой НН, номинальной мощностью 25000 – 80000 кВ·А при параллельном соединении обмоток НН	40 – 65 26 – 45
Токоограничивающий реактор при номинальном токе до 630 А 1000 А и выше	15 – 70 40 – 80

Таблица 2.6

Средние значения отношения x_{PE3}/r_{PE3} и постоянной времени T_A ударного коэффициента $K_{уд}$ для характерных радиальных ветвей системы электроснабжения напряжением выше 1 кВ

Схема	Точка КЗ	Ветвь	x_{PE3}/r_{PE3}	T_A	$K_{уд}$
	K1	Энергосистема	10	0,03	1,72
	K2	Энергосистема и ВЛ 110-220 кВ	15	0,05	1,8
	K3	Энергосистема, ВЛ и трансформатор ГПП 25-80 МВ·А	35-50	0,12-0,16	1,92-1,94
	K4	Линейный реактор $I_{ном} \geq 1 \text{ кА}$ $I_{ном} \leq 0,63 \text{ кА}$	72 35	0,23 0,11	1,96 1,91
	K5	Трансформатор 10 (6) / 0,4 - 0,69 кВ	6-10	0,02-0,03	1,6-1,7
	K6	Кабельная линия 10 (6) кВ длиной 200 – 300м	3	0,01	1,4
	Асинхронный электродвигатель	13	0,04	1,6	
	Синхронный электродвигатель мощностью, МВт:				
	до 1,6	16	0,05	1,8	
	2 - 4	22	0,07	1,9	
	выше 4	32	0,10	1,9	

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, но все источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ общим сопротивлением, то при приближенных расчетах ударного тока КЗ рекомендуется использовать формулу (2.53) $i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{п0} \cdot K_{уд}$, а ударный коэффициент определить по формуле:

$$K_{уд} = 1 + e^{\frac{0,01}{T_{a.эк}}},$$

где $T_{a.эк}$ – эквивалентная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ рассчитывается по формуле:

$$T_{a.эк} = \frac{X_{PE3(R=0)}}{\omega \cdot R_{PE3(X=0)}}, \quad (2.55)$$

где $X_{PE3(R=0)}$ – результирующее индуктивное сопротивление схемы, найденное при отсутствии всех активных сопротивлений ($R_{PE3} = 0$);

$R_{рез(X=0)}$ - результирующее активное сопротивление схемы при отсутствии всех индуктивных сопротивлений ($X_{рез} = 0$), найденных относительно точки КЗ.

В тех случаях, когда исходная расчетная схема является многоконтурной, но точка КЗ делит ее на несколько независимых частей, то ударный ток допустимо принимать равным сумме ударных токов от соответствующих частей схемы, т.е.

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^n I_{п0i} \cdot K_{уди}, \quad (2.56)$$

где $I_{п0i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от i – й части схемы;

$K_{уди}$ – ударный коэффициент тока КЗ от от i – й части схемы.

В приближенных расчетах эквивалентную постоянную времени не определяют, а принимают усредненные значения ударного коэффициента для ветви с гидрогенераторами – $K_{уд.г} = 1,9$; для ветви с турбогенераторами – $K_{уд.т} = 1,8$; для ветви с системой – $K_{уд.с} = 1,4$.

Ударный ток КЗ для сложной схемы определяют по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot (I_{п0.г} \cdot K_{уд.г} + I_{п0.т} \cdot K_{уд.т} + I_{пс} \cdot K_{уд.с}). \quad (2.57)$$

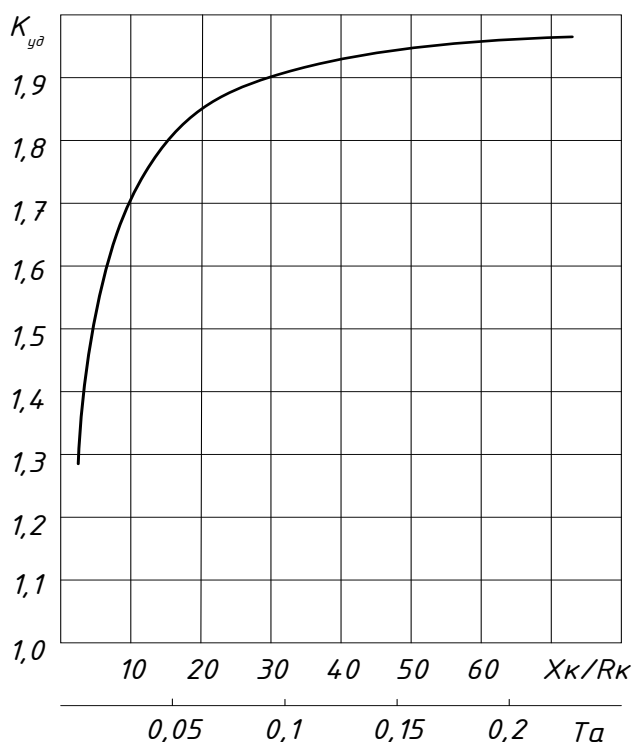


Рис. 2.26. Зависимость $K_{уд}$ от постоянной времени T_A

(или от отношения $\frac{x_K}{r_K}$) при $I_{nt}=I_{n0}$

2.13. Определение тока короткого замыкания в произвольный момент времени по расчетным кривым

Если источники питания находятся в резко отличающихся условиях по отношению к точке КЗ, то рекомендуется определять периодическую составляющую тока КЗ с учетом индивидуального затухания отдельных источников или групп источников. Это происходит:

- при разной электрической удаленности генераторов до точки КЗ;
- при разнотипности генераторов;
- при наличии в схеме источника бесконечной мощности.

Периодическая составляющая тока КЗ в любой момент времени после появления КЗ может быть рассчитана с использованием специально построенных кривых. Последние являются графическим отображением функциональных зависимостей между периодической составляющей тока КЗ, временем переходного процесса и электрической удаленностью точки КЗ от источника питания.

Кривые обеспечивают быстрое и простое выполнение практических расчетов тока КЗ, охватывают широкий диапазон мощностей источников питания, генераторы различаются только по типу и наличию средств АРВ. Эти особенности кривых получены за счет усреднения параметров реальных генераторов и приближенного учета влияния нагрузки в СЭС на ток КЗ, что сопряжено с определенной неточностью расчетов. Недостатком их является узкая область применения - вычисление тока лишь в точке КЗ и невозможность определения тока КЗ в ветвях схемы.

Построенные кривые делятся на расчетные и типовые.

Расчетные кривые - это графическое отображение зависимостей

$$I^{(3)*_{пт}} = f(X_{*РАСЧ}) \text{ при } t = var.$$

Данный метод основан на применении специальных кривых, которые дают для произвольного момента времени действующее значение периодической составляющей тока КЗ в относительных единицах в месте короткого замыкания $I^{(3)*_{пт}}$. Эта величина находится по расчетной реактивности ветви $X_{*РАСЧ}$, связывающей источник питания с местом КЗ. Построение таких кривых произведено применительно к простейшей схеме рис. 2.27 при следующих расчетных условиях:

- все однотипные источники питания имеют одинаковую электрическую удаленность относительно точки КЗ и СЭС заменяются расчетной схемой с типовым генератором (рис. 2.27, а);

- типовой генератор до и в течение КЗ работает с номинальной нагрузкой $z_{*Н} = 0,8 + j0,6$, которая условно относится к его зажимам;

- номинальная нагрузка генератора позволяет исключить обобщенную нагрузку из схемы замещения цепи КЗ и не вводить ее в $X_{РАСЧ}$ (рис. 2.27, б), считая, что $X_{*РАСЧ} = X''_{*d} + X_{*к}$;

- параметры типового генератора и результирующее сопротивление цепи КЗ представляются в относительных единицах, т. е.

$$I^{(3)*Пт} = \frac{I_{П.д}^{(3)}}{I_{Г.НОМ}}; \quad (2.58)$$

$$X^*_{РАСЧ} = X^*_{РЕЗ.Б} \cdot \frac{S_{Г.НОМ}}{S_B}, \quad (2.59)$$

где $X^*_{РЕЗ.Б}$ - результирующее сопротивление, приведенное к базисным условиям;

- сопротивление типового генератора по продольной и поперечной осям одинаковое, т. е. $X_d = X_q$.

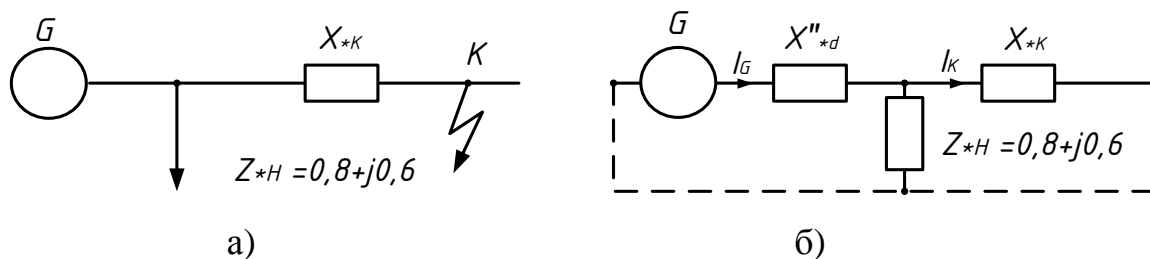


Рис. 2.27. Исходная схема (а) и схема замещения (б) рассматриваемой СЭС

Расчетные кривые для типовых турбо- и гидрогенераторов с АРВ показаны соответственно на рис. 2.28 и 2.29.

Особенности этих кривых заключаются в следующем:

- используются они для вычисления периодической составляющей тока КЗ при электрической удаленности точки КЗ $X^*_{РАСЧ} \leq 3$, а при $X^*_{РАСЧ} > 3$ ее можно считать неизменной в течение КЗ и рассчитывать по формуле $I_{Кт}^{(3)} = \frac{I_B}{X^*_{РЕЗ.Б}}$;

- при $X^*_{РАСЧ} > 1$ расчетные кривые для турбо- и гидрогенераторов практически совпадают;

- для гидрогенераторов с успокоительными обмотками $X^*_{РАСЧ}$ должно быть увеличено на 0,07, при этом для $t \leq 0,1$ с следует пользоваться штрихпунктирными кривыми, а для $t > 0,1$ с – сплошными.

Метод расчетных кривых прост и широко используется в практических расчетах при $X^*_{РАСЧ} \leq 3$

При расчете параметров переходного процесса на основе расчетных кривых (рис. 2.28, 2.29) применяют следующую последовательность:

1) составляют схему замещения, в которую генераторы вводятся сверхпереходными реактивностями, нагрузки отсутствуют за исключением крупных двигателей и синхронных компенсаторов, расположенных вблизи места короткого замыкания, которые учитываются как генераторы равновеликой мощности;

2) для принятых S_b и U_b определяют параметры элементов эквивалентной электрической схемы замещения;

3) путём последовательных преобразований (таблица 2.2) приводят схему замещения к виду многолучевой звезды относительно точки КЗ (рис. 2.30). Число выделяемых ветвей равно числу источников питания в исходной схеме,

влияние которых на результирующий ток в месте КЗ должно быть учтено индивидуально. Основными факторами, определяющими индивидуальность источника питания, являются: тип генератора, наличие системы АРВ, мощность генераторов и их электрическая удаленность от точки КЗ. Источник неограниченной мощности (система) обязательно выделяется в самостоятельную ветвь. Это обусловлено тем, что ток от источников конечной мощности (генераторов) определяется одним методом - методом расчетных кривых, а от системы - другим, то есть аналитическим методом. Чтобы для разных источников одной и той же схемы иметь возможность применять различные расчетные методы, необходимо привести схему к независимому (лучевому) виду относительно указанных источников;

4) для каждой из выделенных ветвей определяют величины расчетных сопротивлений по (2.55)

$$X_{*РАСЧ.Г} = X_{*РЕЗ.Г} \frac{S_{НОМ.Г}}{S_{\delta}}; \quad X_{*РАСЧ.Т} = X_{*РЕЗ.Т} \frac{S_{НОМ.Т}}{S_{\delta}}; \quad X_{*РАСЧ.С} = X_{*РЕЗ.С} \frac{S_C}{S_{\delta}},$$

которые представляют сопротивления ветвей, выраженных в относительных единицах, приведенных к суммарной номинальной мощности гидрогенератора $S_{НОМ.Г}$, турбогенератора $S_{НОМ.Т}$ и системы S_C ;

5) по соответствующим расчетным кривым (рис. 2.28, 2.29) для заданных моментов времени t по $X_{*РАСЧ}$ определяют относительные значения токов в ветвях $I_{*Пт}$.

Если $X_{*РАСЧ} > 3$, то величину $I_{*Пт}$ для любого момента можно считать постоянной и определять аналитическим методом:

$$I_{*Пт} = \frac{I}{X_{*РАСЧ}}; \quad (2.60)$$

б) находят искомую величину периодической составляющей тока короткого замыкания для каждого момента времени в именованных единицах:

$$I_{Пт} = I_{ПтГ} + I_{ПтТ} + I_{ПтС} \quad \text{или} \quad I_{Пт} = \sum_{i=1}^n I_{*Птi} \cdot I_{НОМ.Эi} + I_{ПтС}, \quad (2.61)$$

где $I_{НОМ.Эi} = \frac{S_{НОМ.Эi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}$ - суммарный номинальный ток генераторов ветви i ,

приведенный к напряжению $U_{\delta} = U_{ср}$ той ступени, где рассматривается КЗ;

$$I_{ПтС} = \frac{E_{*С}}{X_{*РАСЧ.С}} I_B = \frac{I_B}{X_{*РАСЧ.С}} \quad \text{- периодическая составляющая тока КЗ от}$$

системы.

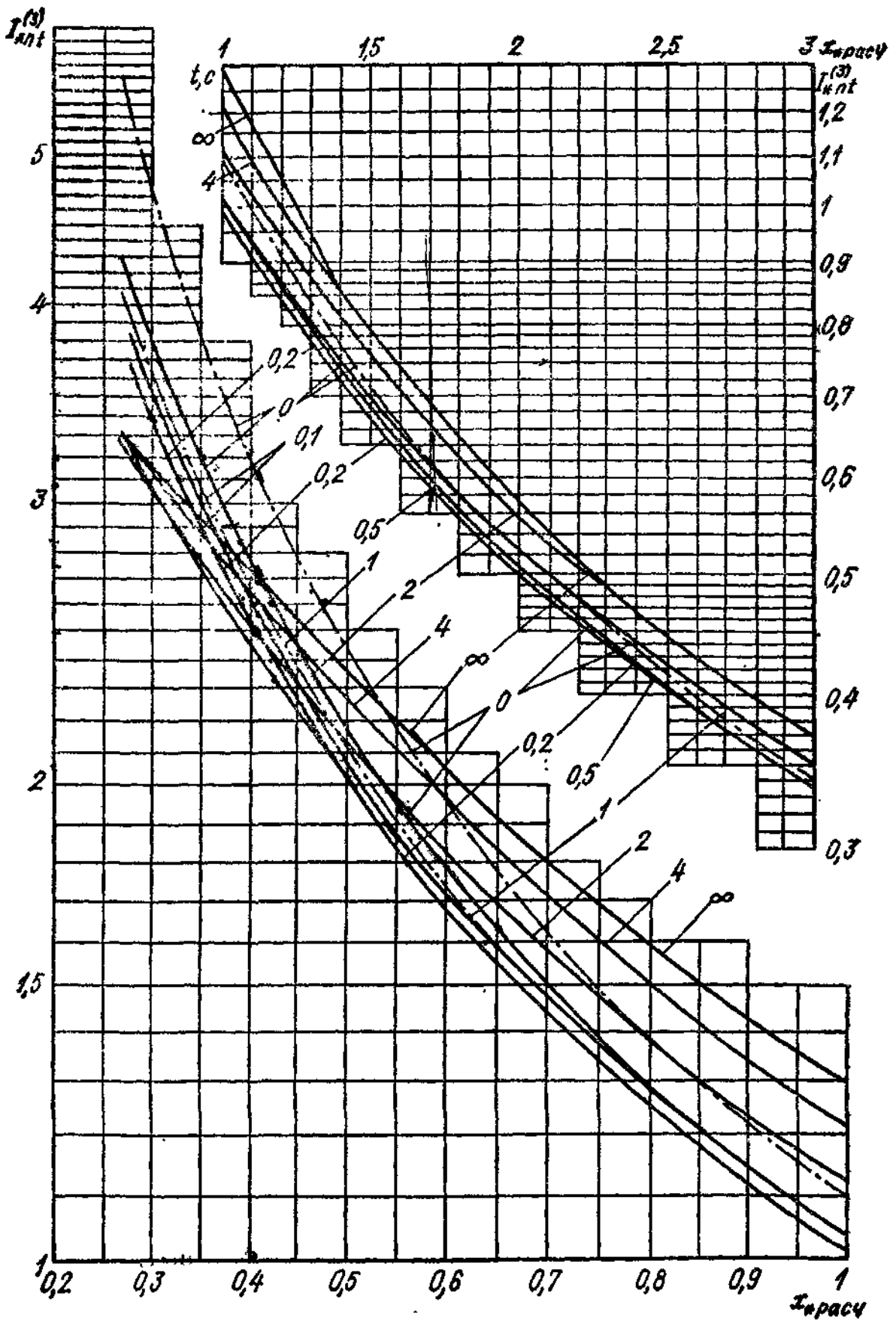


Рис. 2.28. Расчетные кривые для типового гидрогенератора с АРВ

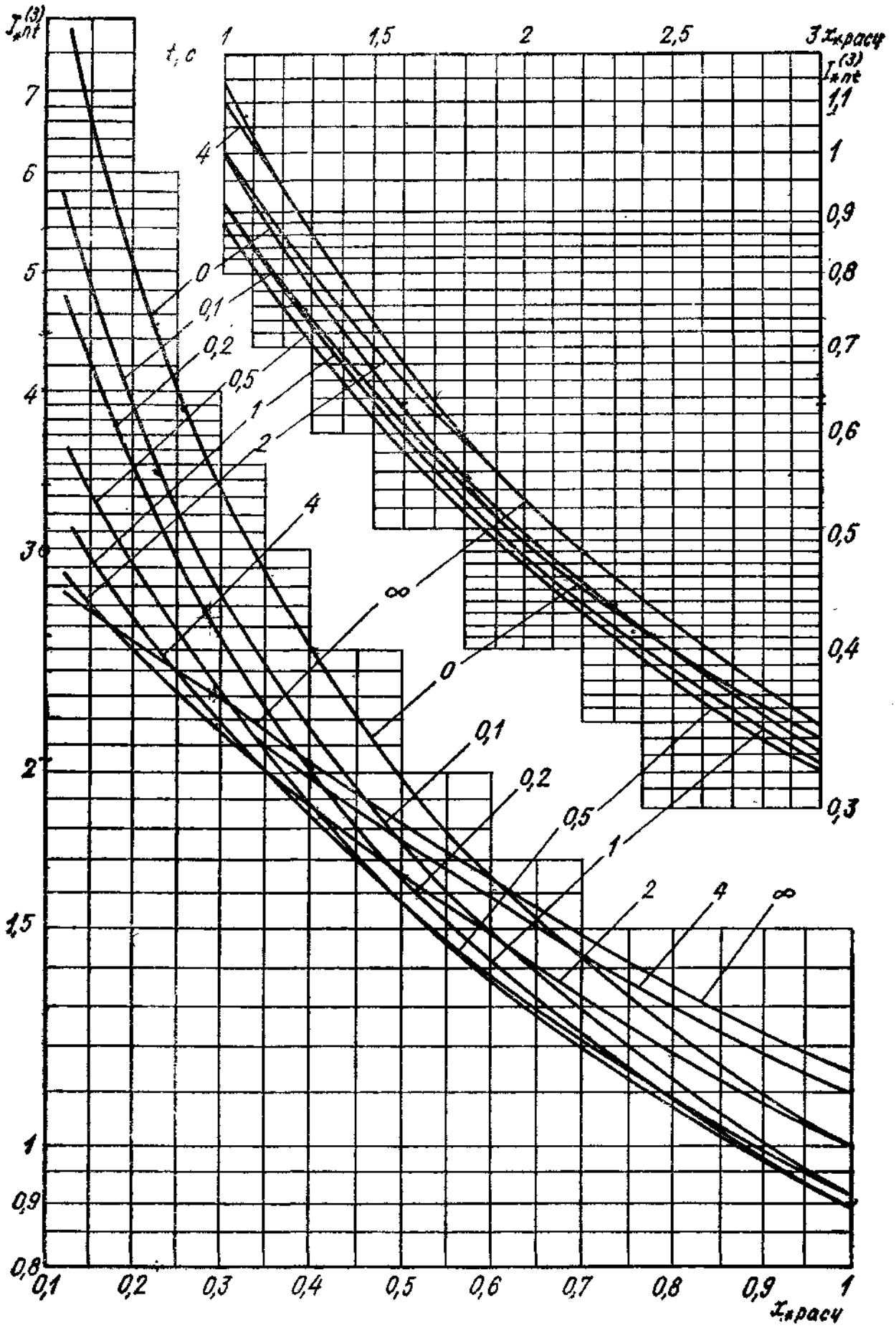


Рис. 2.29. Расчетные кривые для типового турбогенератора с АРВ

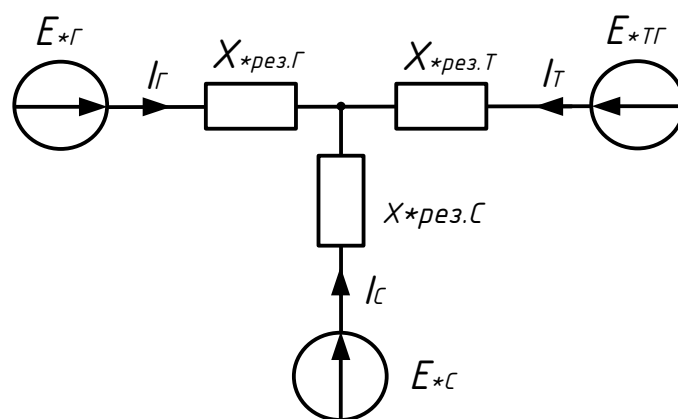


Рис. 2.30. Схема замещения для определения токов КЗ методом расчетных кривых

2.14. Расчет тока короткого замыкания по его общему и индивидуальному изменениям

Если в расчетной схеме СЭС точка КЗ питается от нескольких источников, то следует оценить возможность уменьшения их количества, располагая сведениями об их типе, мощности и электрической удаленности относительно точки КЗ. Различают расчет периодической составляющей тока КЗ по его общему изменению, если количество источников сократить удастся, и индивидуальному изменению, если необходимо вычислять составляющие тока КЗ от каждого или эквивалентных (объединенных однотипных) генераторов.

Расчет по общему изменению тока КЗ заключается в замене однотипных и одинаково электрически удаленных генераторов эквивалентными с последующим определением периодической составляющей тока КЗ для каждого из этих эквивалентных генераторов. Его выполняют в следующем порядке:

1) составляют схему замещения СЭС для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ;

2) находят результирующие сопротивления и сверхпереходные ЭДС генерирующих ветвей;

3) оценивают электрическую удаленность точки КЗ от каждого источника для независимых генерирующих ветвей, не связанных с точкой КЗ общим сопротивлением;

4) выбирают метод определения тока КЗ:

- если по исходным данным это ветвь питания от энергетической системы или эквивалентный источник относится к источникам неограниченной мощности, то расчет выполняют по формуле $I_{\text{П}}^{(3)} = \frac{I_{\text{Б}}}{X_{*PE3,Б}}$;

- при большой электрической удаленности точки КЗ от источника питания ($X_{*PACЧ} \geq 3$ или $I_{\text{П}}^{(3)} / I_{\text{Г.НОМ}} \leq 1$) ток, создаваемый эквивалентным генератором, вычисляют по формуле

$$I'' = I_{П0} = \frac{E''_{рез}}{\sqrt{3} \cdot X_{РЕЗ.Б}}, \text{ или } I_{П0} = \frac{E^*_{рез}}{X^*_{РЕЗ.Б}} \cdot I_B;$$

- для электрически неудаленных точек КЗ в зависимости от характеристик эквивалентного генератора используются расчетные или типовые кривые.

Расчет по индивидуальному изменению тока КЗ состоит в определении токов КЗ, создаваемых разнотипными генераторами или электростанциями с разной удаленностью их от точки КЗ. Периодические составляющие токов КЗ отдельных генераторов или электростанций изменяются во времени неодинаково. Если вычислять токи КЗ, создаваемые разнотипными генераторами или электростанциями с разной удаленностью от точки КЗ, через общее результирующее сопротивление, то расчет может иметь большую погрешность. Предельное отклонение результатов расчета по общему изменению периодической составляющей тока КЗ характеризуется отношением начального сверхпереходного тока к периодической составляющей тока источника в момент времени t при КЗ на зажимах генератора. Для турбогенераторов даже при малых промежутках времени (до 2 с) расчет приводит к существенным погрешностям. Для гидрогенератора предельные ошибки такого расчета гораздо меньше. При отсутствии АРВ погрешность расчета возрастает.

Если характеристики источников таковы, что для определения тока КЗ можно использовать расчетные кривые, то расчет выполняют в следующем порядке. Предварительно приводят действительную схему замещения СЭС к условной радиальной, каждая ветвь которой соответствует выделяемому источнику или группе однотипных источников и связана сточкой КЗ. Источники, непосредственно связанные с точкой КЗ, а также источники неограниченной мощности следует рассматривать отдельно от остальных источников питания. Токи, создаваемые источниками, находят отдельно для каждой ветви. В случае независимых генерирующих ветвей связи с точкой КЗ составляющие тока КЗ рассчитывают аналогично расчету по общему изменению тока КЗ.

2.15. Учет электродвигателей при расчете токов короткого замыкания

Точка КЗ в СЭС может питаться не только от ЭЭС или отдельных электростанций, но и от электродвигателей, которые при внезапном КЗ в СЭС продолжают по инерции вращаться, переходят в генераторный режим и генерируют ток к месту повреждения. В переходном процессе этот ток у синхронного двигателя спадает до установившегося значения (определяется током возбуждения), у асинхронного двигателя - до нуля. Увеличение тока в месте КЗ из-за перехода двигателей в генераторный режим может быть весьма существенным, если мощный двигатель или группа двигателей подключены вблизи точки КЗ, что характерно для сетей и электроустановок напряжением 6 - 10 кВ с двигателями мощностью 1000 кВт и более.

При расчете токов КЗ обычно учитывают только те двигатели, которые связаны с местом КЗ непосредственно через КЛ или токопроводы, линейные

реакторы или двухобмоточный трансформатор. Не учитывают токи, генерируемые двигателями, подключенными к секции промышленной подстанции, которая связана с другой секцией, где имеется КЗ, через трансформатор с расщепленной обмоткой или через сдвоенный реактор. В этом случае надо учитывать токи только тех двигателей, которые присоединены ко второй секции.

Ток, генерируемый двигателями, учитывают при проверке аппаратов и проводников РУ 6 - 10 кВ по условиям КЗ, а также при расчете релейной защиты электроустановок. С этой целью определяют сверхпереходный ток двигателя $I''_{дв}$, ударный ток $i_{уд.дв}$, а также периодическую $I_{двt}$, $I_{двт}$ и аperiodическую $i_{A.двт}$, $i_{A.двт\tau}$ составляющие тока в любой момент t переходного процесса и в момент τ отключения КЗ. При определении токов, генерируемых двигателями в случае КЗ, за базисные величины принимают номинальные напряжения и мощность (ток) двигателей.

Методика расчета токов КЗ с учетом электродвигателей зависит от места их размещения в расчетной схеме. Расчетные схемы могут быть двух видов:

- 1) радиальные, в которых каждый двигатель связан с точкой КЗ индивидуальным внешним сопротивлением $z_{ВНi}$ (рис. 2.31, а);
- 2) сложные, в которых точка КЗ находится за общим сопротивлением группы двигателей (рис. 2.31, б) или за общим сопротивлением группы двигателей и системы (рис. 2.31, в).

При включении по радиальной схеме разнотипных двигателей их следует учитывать индивидуально. Остальная часть схемы должна быть преобразована относительно точки КЗ для определения ее результирующего сопротивления и расчета соответствующего тока КЗ $I^{(3)}_{Кт}$.

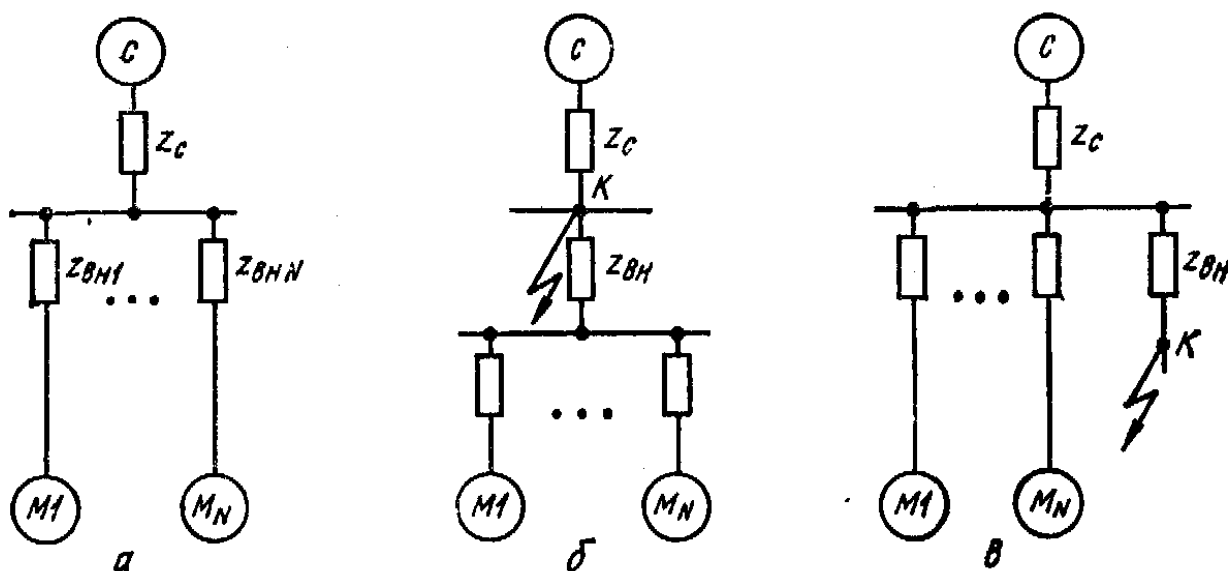


Рис. 2.31. Расчетные схемы с электродвигателями

В случае асинхронного двигателя начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом внешнего сопротивления, через

которое двигатель подключен к сборным шинам подстанции, определяется выражением

$$I''_{ДВ} = \frac{E''_* \cdot I_{НОМ}}{\sqrt{(X''_* + X_{*ВН})^2 + R_{*ВН}^2}}, \quad (2.62)$$

где E''_* - сверхпереходная ЭДС двигателя, определяемая по формуле (2.47);

X''_* - сверхпереходное сопротивление двигателя, определяемое по формуле

$$X''_* \approx \frac{1}{I_{*ПУСК}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{M_{*ПУСК}}{I_{*ПУСК}} \right)^2}.$$

При отсутствии исходных данных приближенно считают, что $E''_* = 0,9$.

Полное внешнее сопротивление можно не учитывать при $z_{*ВН} \leq (0,1-0,2) \cdot X''_*$ (сопротивление кабелей длиной не более 200 - 300 м и сечением не менее 50 - 70 мм²). В этом случае при расчетах сверхпереходный ток находят по формулам:

для асинхронных двигателей (кроме серий ВДД и ДВДА)

$$I''_{ДВ} = I_{*ПУСК} \cdot I_{НОМ}; \quad (2.63)$$

для двигателей серий ВДД и ДВДА

$$I''_{ДВ} = 1,2 \cdot I_{*ПУСК} \cdot I_{НОМ}. \quad (2.64)$$

Если внешнее сопротивление $z_{*ВН} > (0,1-0,2) \cdot X''_*$, то его необходимо учитывать в расчете. При этом сверхпереходный ток определяют по формулам:

- для асинхронных двигателей (кроме серий ВДД и ДВДА)

$$I''_{ДВ} = \frac{I_{*ПУСК} \cdot I_{НОМ}}{(1 + z_{*ВН} / X_*)}. \quad (2.65)$$

- для таких же двигателей серий ВДД и ДВДА

$$I''_{ДВ} = \frac{1,2 \cdot I_{*ПУСК} \cdot I_{НОМ}}{(1 + z_{*ВН} / X_*)}. \quad (2.66)$$

В случае синхронного двигателя начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом внешнего сопротивления вычисляют по формуле (2.62, 2.64, 2.66). ЭДС E''_* при этом находят по формуле (2.67), считается, что до КЗ двигатель работал в номинальном режиме с перевозбуждением.

$$E''_{(0)} = \sqrt{(U_{(0)} \cdot \cos \varphi_{(0)})^2 + (U_{(0)} \cdot \sin \varphi_{(0)} \pm I_{(0)} \cdot X''_d)^2}, \quad (2.67)$$

где $U_{(0)}$, $I_{(0)}$, $\varphi_{(0)}$ – соответственно напряжение на зажимах машины, ток и угол сдвига фаз в исходном режиме.

При отсутствии исходных данных приближенно принимают $E''_* = 1,1$.

Ударный ток КЗ, создаваемый асинхронным и синхронным двигателями, определяется выражением

$$i_{уд.ДВ} = K_{уд.ДВ} \sqrt{2} \cdot I''_{ДВ},$$

где $K_{уд.ДВ}$ – ударный коэффициент с учетом внешнего сопротивления, который рассчитывают по формулам:

для асинхронного двигателя

$$K_{уд.ДВ} = \exp(-0,01 / T'_{РАСЧ}) + \exp(-0,01 / T'_a), \quad (2.68)$$

для синхронного двигателя

$$K_{уд.дв} = 1 + \exp(-0,01 / T_a). \quad (2.69)$$

Если внешнее сопротивление не учитывают, то $K_{уд.дв}$ определяют по таблице 2.7.

Таблица 2.7

Значения постоянных времени и ударных коэффициентов

Параметр	Двигатель серии						
	А	АО	ДАЗО	АТД	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМСО
$T'_{дв.расч}, с$	0,04	0,04	0,09	0,6	0,075	0,06	0,044
$T'_{дв.расч}, с$	0,04	0,03	0,02	0,058	0,043	0,05	0,035
$K_{уд.дв}$	1,56	1,49	1,5	-	1,67	1,66	1,55

При расчете сложных схем короткозамкнутой цепи, в которых электродвигатели соединены с точкой КЗ через общее сопротивление (рис.2.31, б), асинхронные и синхронные двигатели заменяют эквивалентными электродвигателями и определяют начальное значение периодической составляющей суммарного тока группы двигателей по формуле:

$$I''_{дв.Σ} = I''_{А.дв.Σ} + I''_{С.дв.Σ}.$$

Для эквивалентного двигателя рассчитывают:

- суммарный номинальный ток

$$I_{ЭК.НОМ} = I_{А.дв.НОМΣ} + 1,2 I_{С.дв.НОМΣ}; \quad (2.70)$$

- кратность пускового тока

$$I_{*ЭК.ПУСК} = I''_{двΣ} / I_{ЭК.НОМ}; \quad (2.71)$$

- начальное значение периодической составляющей

$$I''_{ЭК} \approx I_{*ЭК.ПУСК} \cdot I_{ЭК.НОМ} / (1 + z_{*вн} / z''_{*ЭК}). \quad (2.72)$$

Ударный ток КЗ, создаваемый эквивалентным двигателем, определяется выражением

$$i_{уд.ЭК} = K_{уд.ЭК} \sqrt{2} \cdot I''_{ЭК},$$

$$\text{где } K_{уд.ЭК} = \exp(-0,01 / T') + \exp(-0,01 / T_a).$$

2.16. Расчеты токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В

Электроустановки напряжением до 1 кВ характеризуются большой электрической удаленностью относительно источников питания, как правило, значительной мощности. Обычно мощность подстанций примерно в 25 раз превышает мощность трансформаторов 6 - 10/0,4 кВ. Поэтому амплитуду периодической составляющей аварийного тока при КЗ на стороне НН трансформатора, через который от электрической системы питаются электроустановки напряжением до 1 кВ, можно считать неизменной. При

расчетах токов КЗ в сетях напряжением до 1000 В следует учитывать активные и индуктивные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи, а именно: силовых трансформаторов, участков сборных шин, магистральных и распределительных шинопроводов; кабельных и воздушных линий, первичных обмоток трансформаторов тока, токовых катушек автоматических выключателей; различных контактных соединений (разъемных контактов аппаратов, вторичных контактов комплектных распределительных устройств, переходных контактов аппаратов); дуги в месте КЗ. Расчет токов КЗ в сетях и установках до 1000 В удобней вести в именованных величинах, пользуясь шкалой средних номинальных напряжений. Рекомендуется в качестве основной выбирать ступень пониженного напряжения.

Достоверность расчета токов КЗ зависит от того, насколько правильно оценены и полно учтены все сопротивления цепи КЗ. В электроустановках напряжением до 1000 В существенное влияние на значение токов КЗ оказывают активные сопротивления цепи КЗ. Их значения соизмеримы, а иногда и превышают значения индуктивных сопротивлений.

При определении индуктивного сопротивления внешней питающей сети напряжением выше 1000 В или сопротивления связи трансформатора б - 10/0,4 кВ с системой можно в практических расчетах возможны следующие случаи:

- известен ток КЗ на выводах обмотки высшего напряжения понижающего трансформатора $I_{кз.ВН}$

$$X_{с.НН} = \frac{U_{ср.ВН}}{\sqrt{3} \cdot I_{кз.ВН}} \cdot \left(\frac{U_{ср.НН}}{U_{ср.ВН}} \right)^2; \quad (2.73)$$

- известен номинальный ток отключения выключателя, установленного в сети высшего напряжения понижающего трансформатора $I_{ном.отк}$

$$X_{с.НН} = \frac{U_{ср.ВН}}{\sqrt{3} \cdot I_{ном.отк}} \cdot \left(\frac{U_{ср.НН}}{U_{ср.ВН}} \right)^2, \quad (2.74)$$

где $U_{ср.ВН}$, $U_{ср.НН}$ - среднее номинальное напряжение на сторонах обмотки высшего и низшего напряжений трансформатора.

Если трансформатор связан с электрической системой посредством КЛ или ВЛ через реактор, то сопротивление X_c можно считать равным суммарному сопротивлению реактора и КЛ или сопротивлению ВЛ.

Рассмотрим в отдельности, как определяются сопротивления силовых элементов короткозамкнутой цепи.

Силовые трансформаторы. Полное, активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора, приведенные к ступени НН, в миллиомах рассчитывают по формулам

$$Z_{TP} = \frac{u_k \cdot U^2_{ном.н} \cdot 10^4}{S_{TP}}; \quad (2.75)$$

$$R_{TP} = \frac{P_k \cdot U^2_{ном.н} \cdot 10^6}{S^2_{TP}}; \quad (2.76)$$

$$X_{TP} = \frac{u_{K,P} \cdot U_{НОМ.Н}^2 \cdot 10^4}{S_{TP}} = \frac{\sqrt{u_K^2 - (P_K / 10 \cdot S_{TP})^2} \cdot U_{НОМ.Н}^2 \cdot 10^2}{S_{TP}}, \quad (2.77)$$

где S_{TP} - номинальная мощность трансформатора, кВ·А;

$U_{НОМ.Н}$ - номинальное линейное напряжение обмотки НН трансформатора, кВ;

P_K - потери КЗ в трансформаторе, кВт;

$u_{K,P}$ - реактивная составляющая напряжения КЗ, %;

u_K - напряжение КЗ трансформатора, %.

Шины и шинопроводы. Их сопротивления определяются на основании значений активного и индуктивного сопротивлений, отнесенных к единице длины шины.

Воздушные и кабельные линии. Значения активного и индуктивного сопротивлений ЛЭП также вычисляют через табличные данные. Приближенно индуктивное сопротивление ВЛ равно $0,4$ мОм/м, а КЛ - $0,08$ мОм/м.

Коммутационные аппараты (автоматические выключатели, рубильники, контакторы и т.д.), реле и трансформаторы тока. Их индуктивные сопротивления зависят от номинального тока. Для токовых катушек расцепителей автоматических выключателей указаны в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Номинальный ток катушки расцепителя, $I_{НОМ}, А$	100	140	200	400	600	1000	1600	2500	4000
Сопротивление катушки расцепителя, $X_{АВТ}, мОм$	0,86	0,55	0,28	0,1	0,094	0,08	0,06	0,05	0,03

Примечание. Приведенные значения сопротивлений включают в себя сопротивления токовых катушек расцепителей и переходные сопротивления подвижных контактов.

Активное сопротивление элементов аппаратуры и устройств, контактов, дуги в месте КЗ определяют в составе результирующего переходного сопротивления

$$R_{ПЕР} = R_K + R_B + R_{ТА} + R_D, \quad (2.78)$$

где R_K - переходное сопротивление контактного соединения токоведущих шин;

R_B - активное сопротивление автоматического выключателя, состоящее из активного сопротивления токовых катушек расцепителя и переходного сопротивления контактов;

$R_{ТА}$ - активное сопротивление первичной обмотки трансформатора тока;

R_D - активное сопротивление дуги в месте КЗ.

Результирующее активное переходное сопротивление зависит от мощности понижающего трансформатора комплектной трансформаторной подстанции (КТП), места КЗ по ступеням распределения электрической

энергии (ступень КЗ) и минимального расстояния между фазами в месте КЗ. Ниже приведены его значения при КЗ на вторичной стороне КТП:

Таблица 2.9

Мощность трансформатора, кВ·А	400	630	1000	1600	2500
Переходное сопротивление, мОм	9,21	8,02	8,41	5,51	5,12

С учетом указанных факторов получена результирующее активное переходное сопротивление для точки КЗ в сети, находящейся за КТП:

$$R_{\text{ПЕР}} = \frac{2,5 \cdot \sqrt{S_{\text{ТР}}} \cdot K_{\text{СТ}}^3 + 320a}{S_{\text{ТР}}}; \quad (2.79)$$

где $K_{\text{СТ}}$ — коэффициент ступени КЗ, определяемый в соответствии с типовой расчетной схемой сети по таблице 2.11;

a - расстояние между фазами проводов сети в месте КЗ, от которого зависит сопротивление дуги в месте КЗ. Его значения в миллиметрах для разных элементов сети указаны в таблице 2.10.

Таблица 2.10

<i>КТП с трансформаторами мощностью, кВ·А</i>	<i>a, мм</i>
400	60
630	60
1000	70
1600	120
2500	180
Шинопроводы	
ШМА	10
ШРА	45
Кабель сечением, мм ²	
2,5 - 10	1,6
16 - 35	2,4
50 - 95	28
120 - 150	4
240	4,8

Сопротивления рассмотренных элементов цепи КЗ напряжением до 1000 В приводятся к базисным условиям на основании выражений:

при сопротивлении элемента, выраженном в миллиомах,

$$X_B = \frac{X \cdot U_B^2}{U_{CP}^2}; \quad (2.80)$$

$$X_B = \frac{X_{*H} \cdot U_B^2 \cdot 10^6}{S_{НОМ}}, \quad (2.81)$$

где U_B - напряжение ступени, на которой находится точка КЗ, кВ;

U_{CP} - среднее номинальное напряжение ступени, где включен соответствующий элемент;

$S_{НОМ}$ — номинальная мощность элемента, кВ·А.

Индуктивное сопротивление внешней системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени НН

$$X_{с.б} = X''_c \cdot \frac{U_B^2}{U_{CP.Б}^2}, \quad (2.82)$$

где $U_{CP.Б}$ - среднее номинальное напряжение ступени соответствующей обмотки ВН трансформатора.

Результирующие сопротивления $R_{PE3.Б}$, $X_{PE3.Б}$ цепи КЗ находят путем преобразования схемы замещения с учетом активного переходного сопротивления. По найденным значениям активного и реактивного результирующих сопротивлений определяют (в килоамперах):

- начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ

$$I''^{(3)} = \frac{U_B \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{PE3.Б}^2 + X_{PE3.Б}^2}}; \quad (2.83)$$

- ударный ток трехфазного КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ.

$$i_{уд} = K_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I''^{(3)}, \quad (2.84)$$

$$\text{где } K_{уд} = 1 + \exp(-0,01/T_A), \text{ а } T_A = \frac{X_{PE3.Б}}{\omega \cdot R_{PE3.Б}};$$

- действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, необходимое для выбора защиты от замыканий на землю,

$$I^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_B \cdot 10^3}{\sqrt{(2 \cdot R_{1PE3.Б} + R_{0PE3.Б})^2 + (2 \cdot X_{1PE3.Б} + X_{0PE3.Б})^2}}, \quad (2.85)$$

где $R_{1PE3.Б}$, $X_{1PE3.Б}$ - результирующие активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности, мОм;

- $R_{0PE3.Б}$, $X_{0PE3.Б}$ - результирующие активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности, мОм;

- начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, создаваемого местными асинхронными двигателями,

$$I''_{ДВ} = \frac{E''_{(0)ДВ} \cdot 10^3}{\sqrt{(X''_{ДВ} + X_{ВН})^2 + (R_{ДВ} + R_{ВН})^2}}, \quad (2.86)$$

где $E''_{(0)ДВ}$ - фазная сверхпереходная ЭДС двигателя, кВ;

- $X''_{ДВ}$, $R_{ДВ}$ - сверхпереходные индуктивное и активное сопротивления двигателя, мОм;

$X_{ВН}$, $R_{ВН}$ - внешние сопротивления кабеля, мОм.

Значения коэффициента ступени КЗ

Расчетная схема сети	Ступень КЗ	
	РУ на станциях и подстанциях	Значение переходного сопротивления для точки К1 определяется по приведенным выше данным
	Первичные цеховые распределительные пункты; зажимы аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций или главных магистралей	2
	Вторичные цеховые распределительные пункты; зажимы аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов	3
	Аппаратура, установленная непосредственно у электроприемников, питающихся от вторичных распределительных пунктов	4

Кроме того, рассчитывают:

- сверхпереходную ЭДС (в вольтах)

$$E''_{(0)ДВ} = \sqrt{(U_{(0)\Phi} \cdot \cos \varphi_{(0)} - I_{(0)} \cdot R_{ДВ})^2 + (U_{(0)\Phi} \cdot \sin \varphi_{(0)} - I_{(0)} \cdot X''_{ДВ})^2}, \quad (2.87)$$

где $U_{(0)\Phi}$, $I_{(0)}$, $\varphi_{(0)}$ - соответственно фазное напряжение, ток статора и угол между векторами напряжения и тока статора в режиме, предшествующем КЗ.

Обычно принимают $U_{(0)\Phi} = U_{НОМ}$, $I_{(0)} = I_{НОМ}$, $\varphi_{(0)} = \varphi_{НОМ}$ либо полагают $E''_{(0)ДВ} = 0,9 \cdot U$;

- суммарное активное сопротивление асинхронного двигателя в момент КЗ (в миллиомах)

$$R_0 = R_1 + R_2 / C_2, \quad (2.88)$$

где R_1 - активное сопротивление статора, мОм;

- C_2 - коэффициент, характеризующий соотношение сопротивлений рассеяния обмотки ротора и намагничивания двигателя;

- R_2 - активное сопротивление ротора, приведенное к статору (мОм) и определяемое выражением

$$R_2 = \frac{M_{*ПУСК} (P_{НОМ} + \Delta P_{МЕХ}) \cdot C_2 \cdot 10^3}{3 \cdot I_{*ПУСК}^2 \cdot I_{НОМ}^2 (1 - s_{НОМ})}, \quad (2.89)$$

где $M_{*ПУСК}$ - кратность пускового момента двигателя по отношению к его номинальному моменту;

- $P_{НОМ}$ и $I_{НОМ}$ - номинальные значения мощности (кВт) и тока (А) двигателя;

$\Delta P_{МЕХ}$ - механические потери двигателя, включая добавочные потери (кВт), причем $\Delta P_{МЕХ} = 0,001 P_{НОМ}$;

- $I_{*ПУСК}$ - кратность пускового тока;

$S_{НОМ}$ - номинальное скольжение двигателя;

- активное сопротивление статора (в миллиомах), если оно не задано заводом-изготовителем, по формулам:

для двигателей с фазным ротором и с простой «беличьей» обмоткой на роторе

$$R_1 = \frac{C_1 \cdot M_{*ПУСК} (1/s_{КР} + s_{КР} - 2 \cdot M_{*МАХ} / M_{*ПУСК})}{2 \cdot s_{КР} \cdot M_{МАХ}}, \quad (2.90)$$

где $C_1 = 1,04$ - коэффициент, характеризующий соотношение сопротивлений рассеяния статора и намагничивания двигателя;

$s_{КР}$ - критическое скольжение двигателя;

для двигателей с глубоким пазом или двумя обмотками на роторе

$$R_1 = \frac{K_M \cdot P_{НОМ} (1 - \eta_{НОМ}) \cdot 10^6}{3 \cdot I_{НОМ}^2 \cdot \eta_{НОМ}}, \quad (2.91)$$

где $K_M = 0,3 - 0,35$ - отношение потерь в меди статора к суммарным потерям мощности в двигателе при его работе в номинальном режиме;

$\eta_{НОМ}$ - номинальный КПД двигателя;

сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя (в миллиомах).

$$X''_{ДВ} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Phi,НОМ} \cdot 10^3}{I_{*ПУСК} \cdot I_{НОМ}}\right)^2 - R_{ДВ}^2}, \quad (2.92)$$

где $U_{\Phi,НОМ}$ - номинальное фазное напряжение двигателя, В.

Ударный ток КЗ (в килоамперах), создаваемый асинхронным двигателем,

$$I_{УД} = K_{УД,ДВ} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{ДВ},$$

где $K_{УД,ДВ}$ - ударный коэффициент для цепи двигателя, определяемый выражением

$$K_{УД,ДВ} = \exp(-0,01/T_P) + \exp(-0,01/T_A).$$

Здесь T_P - расчетная постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора, причем

$$T_P \approx \frac{X''_{ДВ} + X_{ВН}}{\omega \cdot R_2}; \quad (2.93)$$

постоянную времени затухания аperiodической составляющей тока статора

$$T_A \approx \frac{X''_{ДВ} + X_{ВН}}{\omega \cdot (R_1 + R_{ВН})}. \quad (2.94)$$

Глава 3. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Несимметричные режимы возникают вследствие несимметричных КЗ или обрыва одной - двух фаз линии. В первом случае в электрической сети появляется поперечная несимметрия, во втором – продольная. Строгий математический анализ переходных процессов при несимметрии затруднен тем, что в электрических машинах возникает пульсирующее магнитное поле ротора, которое образует полный спектр высших гармонических составляющих тока. Поэтому в большинстве практических расчетов учитывается лишь основная гармоника токов или напряжений. Только при таком ограничении возможно использование метода симметричных составляющих, который наиболее часто применяется для анализа несимметричных КЗ.

3.1. Метод симметричных составляющих

Для выбора и проверки релейной защиты и автоматики в системах электроснабжения промышленных предприятий наряду с токами трехфазных КЗ необходимо знать токи несимметричных КЗ (двухфазного на землю, однофазного, двухфазного). Сравнительно просто несимметричные КЗ, как и другие несимметричные режимы в электрических сетях (обрывы проводов, сложные виды повреждений, работа по системе «два провода — земля» и т.п.), можно рассчитывать с использованием метода симметричных составляющих.

В основу расчета несимметричных КЗ положен метод симметричных составляющих, согласно которому любую несимметричную систему векторов (тока, напряжения) можно заменить тремя условными симметричными составляющими: прямой, обратной и нулевой последовательностей, а затем вести расчет для каждой из них в отдельности. Предполагается, что эти составляющие одновременно циркулируют в рассматриваемой сети в несимметричном режиме. В дальнейшем прямую последовательность будем обозначать с индексом *1*, обратную последовательность будем обозначать с индексом *2* и нулевую – с индексом *0*.

При расчете несимметричных КЗ, как и симметричных КЗ, предполагают, что сопротивления всех трех фаз одинаковы, а насыщение магнитных систем не учитывается.

Векторы системы прямой последовательности равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на 120° в направлении прямого чередования фаз *A – B - C*.

Векторы системы обратной последовательности имеют равные величины и сдвинуты на 120° в направлении обратного чередования фаз *A – C - B*. Соотношения между фазными значениями устанавливаются с помощью оператора

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}.$$

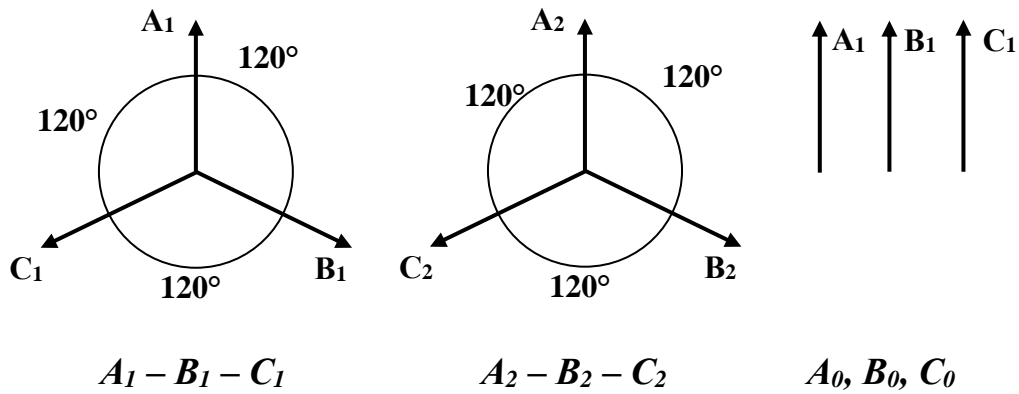


Рис. 3.1. Симметричные системы векторов прямой (а), обратной (б) и нулевой последовательностей

Умножение вектора на оператор a означает поворот вектора на 120° против часовой стрелки:

$$a = e^{j120^\circ}, \quad a^2 = e^{j240^\circ}, \quad a^3 = e^{j360^\circ} \quad a^2 + a = -1.$$

Векторы системы нулевой последовательности совпадают по направлению и одинаковы по величине.

Системы векторов прямой и обратной последовательностей являются уравновешенными. Система нулевой последовательности симметричная, но не уравновешенная.

По методу симметричных составляющих для каждой фазы можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0; \\ \dot{C} &= \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0. \end{aligned} \tag{3.1}$$

Пользуясь методом комплексных чисел, можно, приняв одну из фаз *особой* (основной), остальные симметричные составляющие выразить через векторы этой фазы. *Особой* называется фаза, которая находится в условиях, отличающихся от условий для двух других фаз.

Система прямой последовательности	система обратной последовательности	система нулевой последовательности
\dot{A}_1 - особая фаза	\dot{A}_2	$\dot{A}_0 = \dot{B}_0 = \dot{C}_0$
$\dot{B}_1 = a^2 \cdot \dot{A}_1$	$\dot{B}_2 = a \cdot \dot{A}_2$	
$\dot{C}_1 = a \cdot \dot{A}_1$	$\dot{C}_2 = a^2 \cdot \dot{A}_2$	

При использовании метода симметричных составляющих достаточно вычислить значение одной фазы, все остальные можно определить через оператор.

Например, для фазы A :

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= a^2 \cdot \dot{A}_1 + a \cdot \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{C} &= a \cdot \dot{A}_1 + a^2 \cdot \dot{A}_2 + \dot{A}_0. \end{aligned} \tag{3.2}$$

Уравнения (3.2) позволяют выделить из несимметричной системы симметричные составляющие.

Например, чтобы выделить составляющую прямой последовательности, достаточно все три уравнения (3.2) соответственно умножить на коэффициенты $1, a, a^2$, т.е. уравнивать коэффициенты при искомой составляющей, а затем сложить.

$$\begin{array}{lll} \dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0 & 1 & \dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0 \\ \dot{B} = a^2 \cdot \dot{A}_1 + a \cdot \dot{A}_2 + \dot{A}_0 & a & a \cdot \dot{B} = a^3 \cdot \dot{A}_1 + a^2 \cdot \dot{A}_2 + a \cdot \dot{A}_0 \\ \dot{C} = a \cdot \dot{A}_1 + a^2 \cdot \dot{A}_2 + \dot{A}_0 & a^2 & a^2 \cdot \dot{C} = a^3 \cdot \dot{A}_1 + a \cdot \dot{A}_2 + a^2 \cdot \dot{A}_0 \\ \dot{A} + a \cdot \dot{B} + a^2 \cdot \dot{C} = 3 \cdot \dot{A}_1 & & \end{array}$$

После сложения составляющие $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_0$ будут выражены через векторы фазных величин $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ следующим образом:

$$\begin{array}{l} \dot{A}_1 = \frac{1}{3} (\dot{A} + a \cdot \dot{B} + a^2 \cdot \dot{C}); \\ \dot{A}_2 = \frac{1}{3} (\dot{A} + a^2 \cdot \dot{B} + a \cdot \dot{C}); \\ \dot{A}_0 = \frac{1}{3} (\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}). \end{array} \quad (3.3)$$

3.2. Основные соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений

При несимметричных переходных процессах образуется пульсирующее магнитное поле ротора, который имеет полный спектр высших гармоник, поэтому токи прямой и обратной последовательностей разных частот оказываются взаимосвязаны. При расчетах несимметричных процессов допускается, что:

- в симметричных цепях токи и напряжения различных последовательностей не взаимодействуют друг с другом;
- каждый элемент цепи оказывает свое специфическое сопротивление прохождению токов различных последовательностей.

Считается также, что симметричные составляющие токов связаны с симметричными составляющими напряжений только одноименной последовательности. Иными словами, если какой-либо элемент цепи симметричен и обладает по отношению к симметричным составляющим токов прямой \dot{I}_{A1} , обратной \dot{I}_{A2} и нулевой \dot{I}_{A0} последовательностей соответственно сопротивлениями $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0$, то симметричные составляющие падения напряжения в этом элементе:

$$\begin{array}{l} \Delta \dot{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \dot{I}_1; \\ \Delta \dot{U}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \dot{I}_2; \\ \Delta \dot{U}_0 = \underline{Z}_0 \cdot \dot{I}_0. \end{array} \quad (3.4)$$

Сопротивления $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0$ для сокращения обычно называют сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При двухфазном КЗ токи и напряжения имеют составляющие прямой и обратной последовательности. При однофазном и двухфазном КЗ на землю существуют все три последовательности.

Отдельные составляющие независимо действуют друг от друга (что позволяет составить три схемы: прямой, обратной, нулевой последовательностей).

При симметричном режиме источник питания образует основную ЭДС симметричной системы векторов, которая может вызвать в контуре только токи прямой последовательности, так как напряжения или ЭДС других последовательностей нет.

При нарушении симметрии возникают несимметричные системы токов, которые образуют в генераторе соответствующие магнитные потоки, вызывающие в его обмотках соответствующие ЭДС. Вводить эти ЭДС в расчет нецелесообразно, так как они пропорциональны токам и зависят от внешних условий.

ЭДС можно учитывать падением напряжения в реактивном сопротивлении генератора той или иной последовательности. Поэтому можно считать, что при любом режиме генератор вырабатывает ЭДС только прямой последовательности, а ЭДС обратной и нулевой последовательностей генератора равны нулю. Поэтому в схемах замещения указывается ЭДС прямой последовательности и симметричные составляющие падения напряжения.

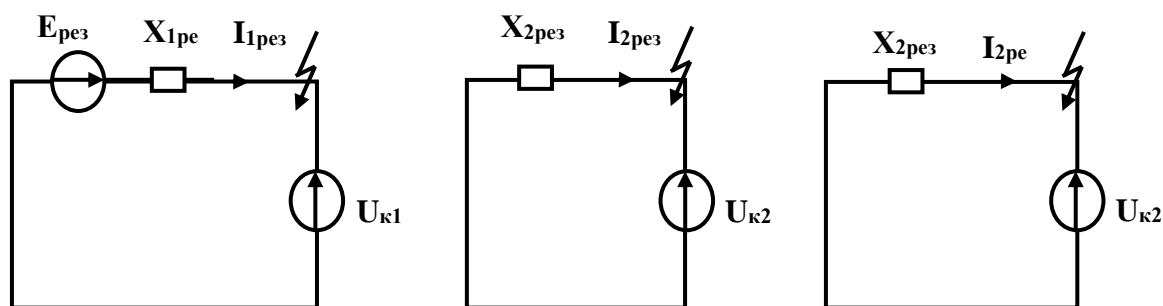


Рис. 3.2. Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

Основные уравнения в соответствии со вторым законом Кирхгофа для любого КЗ каждой последовательности можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{K1} &= \dot{E}_{PE3} - X_{1PE3} \cdot \dot{I}_{K1}; \\ \dot{U}_{K2} &= 0 - X_{2PE3} \cdot \dot{I}_{K2}; \\ \dot{U}_{K0} &= 0 - X_{0PE3} \cdot \dot{I}_{K0}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где \dot{U}_{K1} , \dot{U}_{K2} , \dot{U}_{K0} , \dot{I}_{K1} , \dot{I}_{K2} , \dot{I}_{K0} - симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ;

\dot{E}_{PE3} - результирующая ЭДС прямой последовательности;

X_{1PE3} , X_{2PE3} , X_{0PE3} - результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

Поскольку для генератора трехфазная симметричная система ЭДС статора является системой прямой последовательности, в схемах обратной и нулевой последовательностей ЭДС источников отсутствуют.

Создаваемые в схемах симметричных составляющих ЭДС индукции от прохождения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей учитываются в виде падения напряжения с обратным знаком в сопротивлениях X_{1PE3} , X_{2PE3} , X_{0PE3} .

Анализ переходного процесса при несимметричных нарушениях режима производится на основе метода симметричных составляющих. Благодаря тому, что элементы энергосистем по своему конструктивному исполнению являются физически симметричными, для электрических систем справедлив принцип независимости действия симметричных составляющих, т.е. каждая последовательность (прямая, обратная, нулевая) может рассматриваться независимо от двух других.

3.3. Сопротивления элементов токам отдельных последовательностей

Каждый элемент электрической системы характеризуется параметрами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, а также в симметричном переходном процессе, являются сопротивлениями прямой последовательности.

Для элемента, магнитосвязанные цепи которого неподвижны друг относительно друга, сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как от перемены порядка чередования фаз системы токов взаимная индукция между фазами элемента не меняется.

Для трансформаторов, автотрансформаторов, воздушных и кабельных линий, реакторов - $X_1 = X_2$, $R_2 = R_1$, $Z_2 = Z_1$.

Реактивное сопротивление обратной последовательности элементов с вращающимися полями (синхронные генераторы, компенсаторы, двигатели) зависит от конструкции машины (симметричности ротора). Если воздушный зазор между статором и ротором по всей окружности машины одинаков и ротор симметричен, то сопротивление обратной последовательности мало отличается от сопротивления прямой. Для турбогенераторов, машин с продольно-поперечными успокоительными обмотками и асинхронных двигателей в приближенных расчетах принимают $X_2 \approx X_1 = X''_d$.

При различном сопротивлении по продольной и поперечной оси реактивное сопротивление обратной последовательности равно:

- для машин с успокоительными обмотками - $X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$;

- для явнополюсных машин без успокоительных обмоток - $X_2 = \sqrt{X'_d \cdot X'_q}$.

Значения реактивного сопротивления обратной последовательности приводятся в каталогах и справочниках как параметры машин. При отсутствии этих данных можно принять:

- для машин с успокоительными обмотками $X_2 = 1,22 X''_d$;

-для явнополусных машин без успокоительных обмоток $X_2 = 1,45 X'_d$.

Реактивное сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электроэнергии. Основная часть обобщенной нагрузки состоит из асинхронных двигателей, поэтому $X_{*2H} = X_{*1H}$, $X''_H = 0,35$.

Сопротивление нулевой последовательности элемента резко отличается от сопротивлений прямой и обратной последовательностей, поскольку взаимоиנדукция при этом сказывается иначе. Кроме того, реактивное сопротивление нулевой последовательности зависит от схемы соединения фаз (Y, Y_0, Δ) рассматриваемого элемента и схемы заземления нейтрали. Если пути для прохождения токов нулевой последовательности нет, то это значит, что сопротивление в цепи равно бесконечности ($X = \infty$).

Токи нулевой последовательности представляют собой однофазный ток КЗ (I_0), протекающий в каждой фазе. Возвращение токов $3I_0$ происходит через землю, а если линия защищена тросом, то по тросу и земле.

Таким образом, контур токов нулевой последовательности имеет значительно большие геометрические размеры, чем контуры токов прямой и обратной последовательностей. В соответствии с этим и сопротивление нулевой последовательности значительно больше, чем сопротивления прямой или обратной последовательностей.

Если нейтраль синхронной машины (генератора) изолированная, то $X_0 = \infty$, так как токи нулевой последовательности в нем не протекают и в схему замещения нулевой последовательности такой генератор не вводится.

Если имеется заземленная нейтраль у генератора, то сопротивление нулевой последовательности зависит от типа обмоток

$$X_0 = (0,15 - 0,6) X''_d.$$

Нагруженные ответвления, как правило, работают с изолированной нейтралью (6-35 кВ), поэтому $X_{0H} = \infty$.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности реактора равно сопротивлению прямой последовательности ($X_0 = X_1$), так как взаимоиנדукция играет меньшую роль в создании общего реактивного сопротивления реактора из-за большого расстояния между катушками.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности линии зависит от конструктивного исполнения линии (одноцепная, двухцепная) и наличия заземляющих тросов.

Воздушные линии имеют X_0 значительно большее, чем сопротивление прямой (или обратной) последовательности. В практических расчетах принимают:

- одноцепная линия без тросов $X_0 = 3,5 \cdot X_1$;

- одноцепная линия со стальными тросами $X_0 = 3,0 \cdot X_1$;

- двухцепная линия без тросов при согласном течении тока в линиях $X_0 = 5,5 \cdot X_1$;

- двухцепная линия со стальными тросами при согласном течении токов в линиях $X_0 = 4,7 \cdot X_1$.

Сопrotивление нулевой последовательности кабельной линии зависит от типа кабеля, способа прокладки, его оболочки, заземления. В зависимости от пути возвращения токов (только по оболочке или оболочке и земле) для высоковольтных кабелей сопротивление можно принять:

- для одножильных кабелей $X_0 \approx (0,8 - 1)X_1$;
- для трехжильных кабелей $X_0 \approx (3,5 - 4,6)X_1$, $R_0 = 10 \cdot R_1$.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора определяется их конструкцией (однофазный, трехфазный трехстержневой, трехфазный четырехстержневой, трехфазный пятистержневой и т.д.) и схемой соединения обмоток трансформатора (треугольник Δ , звезда с заземленной нулевой точкой Y_0 , звезда с незаземленной нулевой точкой Y).

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду с незаземленной нулевой точкой, равно бесконечности $X_0 = \infty$.

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нулевой точкой, зависит от схемы соединения других обмоток и наличия в их цепях контуров для прохождения токов нулевой последовательности.

При соединении обмоток по схеме Y_0/Δ ЭДС нулевой последовательности трансформатора целиком расходуется на прохождение тока той же последовательности через реактивное сопротивление рассеяния обмотки, соединенной треугольником, так как этот ток не выходит за пределы данной обмотки. В схеме замещения это отражается закорачиванием ветви со стороны Δ . Потенциал, равный нулю, на конце ветви соответствует условию, что данная ветвь схемы замещения трансформатора заканчивает путь циркуляции токов нулевой последовательности. Таким образом, сопротивление X_0 при соединении обмоток Y_0/Δ равняется сопротивлению прямой последовательности X_1 .

При соединении обмоток по схеме Y_0/Y_0 и предполагается, что со стороны нагрузки путь для тока нулевой последовательности обеспечен, т.е. в цепи имеется еще одна заземленная нейтраль ($X_0 = X_1$). Если заземленной нейтрали нет, то схема замещения будет такой же, как и при соединении Y_0/Y , что соответствует режиму холостого хода трансформатора, при котором $X_0 = \infty$.

У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток, как правило, соединяется в Δ , поэтому для этой обмотки можно считать $X_{\mu 0} = \infty$. Основные варианты соединения обмоток трансформатора и соответствующие им X_0 представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Сопротивление нулевой последовательности силовых трансформаторов

<i>Тип трансформатора и соединение его обмоток</i>	<i>Сопротивление нулевой последовательности</i>
1	2
Трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0/Δ	$X_0 = X_1$

1	2
Три однофазных трансформатора, трехфазный четырех- или пятистержневой трансформатор с соединением обмоток:	
Y_0/Y	$X_0 = \infty$
Y_0/Y_0	$X_0 = X_I$
Трехобмоточный трансформатор с соединением обмоток: $Y_0/\Delta/Y$	$X_0 = X_{BH} + X_{CH}$
$Y_0/\Delta/Y$	По схеме соединения обмоток трансформатора
$Y_0/\Delta/\Delta$	$X_0 = X_{BH} + \frac{X_{CH} \cdot X_{HH}}{X_{CH} + X_{HH}}$

3.4. Правила составления схем замещения отдельных последовательностей

При расчете любого несимметричного режима или процесса методом симметричных составляющих одной из первоочередных задач является составление схем замещения для всех трех последовательностей. Схемы замещения отдельных последовательностей включают в себя все элементы сети, по которым при данном виде несимметрии протекают токи соответствующих последовательностей. Параметры элементов схем замещения выражают в именованных или относительных единицах, приведя их соответственно к выбранной за основную ступени напряжения или к выбранным базисным условиям. Преобразуя эти схемы, находят результирующие сопротивления всех последовательностей, из схемы прямой последовательности определяют результирующую ЭДС.

Схема прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют для расчета трехфазного КЗ. В зависимости от применяемого метода расчета и момента времени генераторы и нагрузки вводятся в нее соответствующими реактивностями и ЭДС.

Началом схемы прямой последовательности является объединенная точка нулевого потенциала, а ее концом - точка КЗ.

Схема обратной последовательности по своей конфигурации является полной копией схемы прямой последовательности, ЭДС всех генерирующих элементов в ней равны нулю, а генераторы, двигатели и обобщенная нагрузка (при необходимости ее учета) входят в нее реактивностями обратной последовательности, отличными от реактивностей прямой последовательности. Все остальные элементы входят теми же реактивностями, что и в схему прямой последовательности.

Начало и конец схемы обратной последовательности совпадают соответственно с началом и концом схемы прямой последовательности.

В приближенных расчетах принимают для генераторов и входящих в схему нагрузок $X_2 = X_1$. Это освобождает от составления схемы замещения обратной последовательности и позволяет принимать $X_{2PE3}=X_{0PE3}$.

Схема нулевой последовательности по своей конфигурации значительно отличается от схемы прямой последовательности в силу того, что токи нулевой последовательности по существу являются однофазными и пути циркуляции этих токов резко отличаются от путей протекания токов прямой и обратной последовательностей. Конфигурация схемы нулевой последовательности в значительной степени определяется соединением обмоток, участвующих в ней трансформаторов и автотрансформаторов.

Составление схемы замещения следует начинать от точки КЗ, считая, что все фазы в этой точке замкнуты накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности. В цепях, электрически связанных с точкой КЗ, токи нулевой последовательности потекут лишь в сторону элементов, соединенных в Y_0 . В схему замещения войдут лишь те элементы схемы, через которые протекают токи нулевой последовательности. Чтобы избежать ошибок на первых этапах до приобретения практических навыков, необходимо в схему замещения нулевой последовательности вводить трансформаторы и автотрансформаторы их полной Т-образной схемой с учетом ветви намагничивания $X_{\mu 0}$. В практических расчетах для любых конструкций трансформаторов принимают $X_{\mu 0}=\infty$. Поэтому, разорвав ветвь с $X_{\mu 0}$, получаем схему нулевой последовательности, соответствующую сделанному допущению, при этом трансформатор имеет $X_0 = X_1$, либо $X_0=\infty$ и в схему не входит.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора или генераторов, должно быть введено утроенной величиной последовательно с сопротивлением той обмотки, в нейтраль которой оно включено.

Началом схемы нулевой последовательности считают точку, в которой объединены ветви с нулевым потенциалом, а ее концом - точку несимметрии.

3.5. Токи и напряжения в месте несимметричного короткого замыкания

Для расчетов несимметричных коротких замыканий предварительно должны быть определены результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно точки КЗ (X_{1PE3} , X_{2PE3} , X_{0PE3}), а также результирующая ЭДС источников питания. **Для упрощения место повреждения относится на холостое ответвление, поэтому токи в фазах этого ответвления можно считать токами КЗ.** За положительное направление токов принимается их направление к точке КЗ.

3.5.1. Двухфазное короткое замыкание

Двухфазное короткое замыкание между фазами В и С можно записать граничными условиями:

$\dot{I}_{\kappa A}^{(2)} = 0$ - так как КЗ отнесено на холостое ответвление;

$\dot{I}_{\kappa B}^{(2)} = -\dot{I}_{\kappa C}^{(2)}$ - поскольку система токов уравновешенная $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ и $\dot{I}_{\kappa A} = 0$.

$\dot{U}_{\kappa B}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa C}^{(2)}$ - так как линия имеет общую точку КЗ.

При таком виде повреждения токи нулевой последовательности отсутствуют $\dot{I}_{\kappa 0}^{(2)} = 0$; $\dot{U}_{\kappa 0}^{(2)} = 0$.

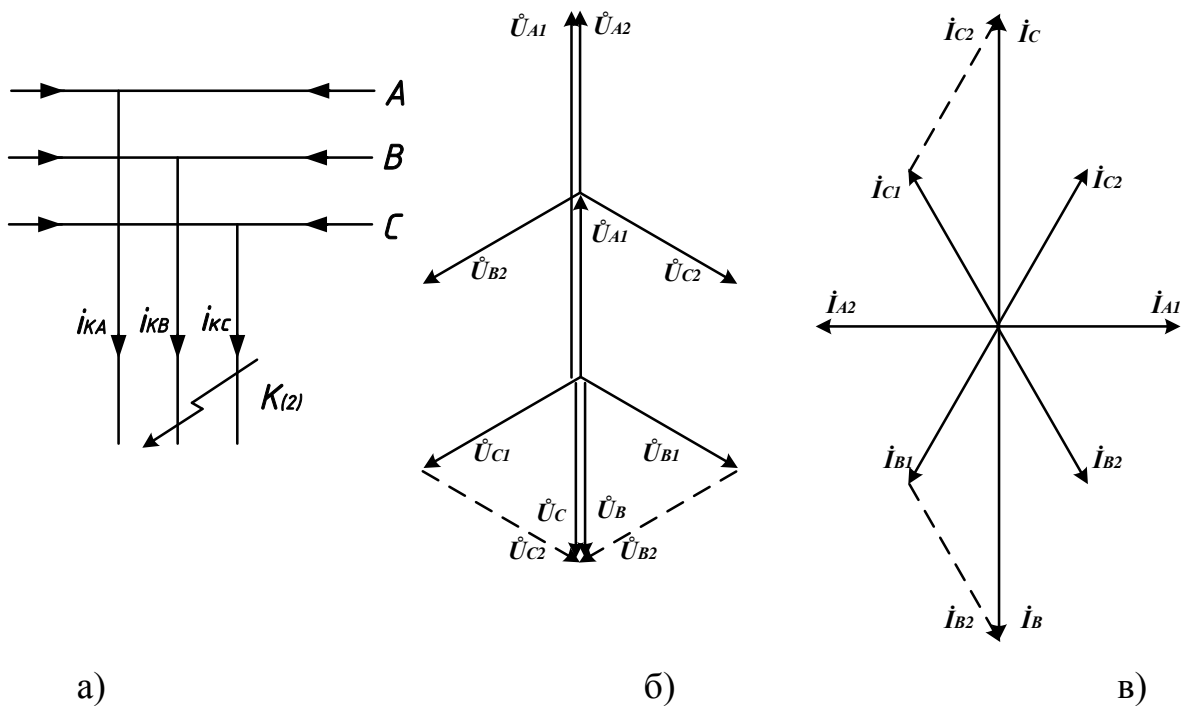


Рис. 3.3. Схема ответвления (а), векторные диаграммы напряжений (б) и токов (в) в месте двухфазного КЗ

Если фазу A принять за особую (расчетную), то при использовании формул симметричных составляющих достаточно вычислить значение одной фазы - все остальные можно определить через оператор.

Согласно уравнению действительный ток в фазе A равен сумме токов отдельных последовательностей:

$$\dot{I}_A^{(2)} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0},$$

$$\dot{I}_{\kappa A}^{(2)} = \dot{I}_{\kappa A1} + \dot{I}_{\kappa A2} = 0, \text{ отсюда } \dot{I}_{\kappa A1} = -\dot{I}_{\kappa A2}.$$

Выразим $\dot{U}_{\kappa B}$ и $\dot{U}_{\kappa C}$ через симметричные составляющие напряжения фазы A с помощью оператора:

$$\dot{U}_{\kappa B} = a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + a \cdot \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0};$$

$$\dot{U}_{\kappa C} = a \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0}.$$

$$\text{Так как } \dot{U}_{\kappa B} = \dot{U}_{\kappa C}, \text{ то } \dot{U}_{\kappa B} - \dot{U}_{\kappa C} = 0.$$

$$a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + a \cdot \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} - a \cdot \dot{U}_{\kappa A1} - a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A2} - \dot{U}_{\kappa A0} = 0;$$

$$(a^2 - a) \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + (a - a^2) \cdot \dot{U}_{\kappa A2} = 0;$$

$$(a^2 - a) \cdot (\dot{U}_{\kappa A1} - \dot{U}_{\kappa A2}) = 0.$$

Выражение $(a^2 - a) = -j \cdot \sqrt{3}$ не может равняться нулю, значит, $\dot{U}_{\kappa A1} - \dot{U}_{\kappa A2} = 0$.

$$\dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)}.$$

На основании основных уравнений ЭДС и напряжений

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \dot{E}_A - \dot{I}_{\kappa A1} \cdot j \cdot x_{1\text{рез}};$$

$$\dot{U}_{\kappa A2} = 0 - \dot{I}_{\kappa A2} \cdot j \cdot x_{2\text{рез}};$$

$$\dot{U}_{\kappa A0} = 0 - \dot{I}_{\kappa A0} \cdot j \cdot x_{0\text{рез}},$$

и в соответствии с равенством напряжений прямой и обратной последовательностей неповрежденной фазы А

$$\dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)}.$$

$$\dot{E}_A - \dot{I}_{\kappa A1} \cdot j \cdot x_{1\text{рез}} = -\dot{I}_{\kappa A2} \cdot j \cdot x_{2\text{рез}}, \text{ так как } \dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{A2}.$$

$$\dot{I}_{\kappa A1} = \frac{\dot{E}_{A\text{рез}}}{j \cdot (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}})}.$$

Токи в поврежденных фазах выражаем через ток прямой последовательности фазы А \dot{I}_{A1} :

$$\dot{I}_{\kappa B}^{(2)} = a^2 \cdot \dot{I}_{\kappa A1} + a \cdot \dot{I}_{\kappa A2} = a^2 \cdot \dot{I}_{\kappa A1} - a \cdot \dot{I}_{\kappa A1} = (a^2 - a) \cdot \dot{I}_{\kappa A1};$$

$$\text{так как } (a^2 - a) = -j \cdot \sqrt{3}.$$

$$\dot{I}_{\kappa B}^{(2)} = -j \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)};$$

$$\dot{I}_{\kappa C}^{(2)} = j \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)}, \text{ так как } \dot{I}_{\kappa B} = -\dot{I}_{\kappa C} \text{ из граничных условий.}$$

Абсолютное значение полного тока при двухфазном КЗ

$$\dot{I}_{\kappa}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{\kappa A1} = \frac{\sqrt{3} \cdot \dot{E}_{A\text{рез}}}{x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}}}.$$

При питании от электроэнергетической системы

$$\dot{I}_{\kappa}^{(2)} = \frac{\underline{U}_{\text{ср}}}{x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}}}.$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей фазы А в месте КЗ

$$\dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} = j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot x_{2\text{рез}}.$$

Фазные напряжения в месте КЗ составляют:

$$\dot{U}_{\kappa A}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa A1} + \dot{U}_{\kappa A2} = 2\dot{U}_{\kappa A1} = 2 \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot j x_{2\text{рез}};$$

$$\dot{U}_{\kappa B}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa C}^{(2)} = a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + a \cdot \dot{U}_{\kappa A2} = (a^2 + a)\dot{U}_{\kappa A1} = -\dot{U}_{\kappa A1} = -\dot{I}_{\kappa A1} \cdot j \cdot x_{2\text{рез}} = \frac{-\dot{U}_{\kappa A}^{(2)}}{2}.$$

Используя полученные соотношения, можно построить векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ. При построении векторных диаграмм следует помнить, что токи короткого замыкания индуктивные, так как активные сопротивления приняты равными нулю.

3.5.2. Однофазное короткое замыкание

При коротком замыкании на землю фазы А граничные условия следующие:

$$\dot{U}_{\kappa A}^{(1)} = 0, \quad \dot{I}_{\kappa B}^{(1)} = 0, \quad \dot{I}_{\kappa C}^{(1)} = 0.$$

Токи в неповрежденных фазах:

$$\dot{I}_{\kappa B} = a^2 \cdot \dot{I}_{\kappa A1} + a \cdot \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0};$$

$$\dot{I}_{\kappa C} = a \cdot \dot{I}_{\kappa A1} + a^2 \cdot \dot{I}_{\kappa A2} + \dot{I}_{\kappa A0},$$

по разности уравнений имеем

$$\dot{I}_{\kappa B} - \dot{I}_{\kappa C} = (a^2 - a) \cdot \dot{I}_{\kappa A1} + (a - a^2) \cdot \dot{I}_{\kappa A2} = 0,$$

поэтому $(a^2 - a) \cdot \dot{I}_{\kappa A1} = -(a - a^2) \cdot \dot{I}_{\kappa A2}$.

$$\dot{I}_{\kappa A1} = \dot{I}_{\kappa A2}.$$

По сумме уравнений

$$\dot{I}_{\kappa B} + \dot{I}_{\kappa C} = (a^2 + a) \cdot \dot{I}_{\kappa A1} + (a + a^2) \cdot \dot{I}_{\kappa A2} + 2 \cdot \dot{I}_{\kappa A0}.$$

Так как $\dot{I}_{\kappa B} + \dot{I}_{\kappa C} = 0$, то $2 \cdot (a^2 + a) \cdot \dot{I}_{\kappa A1} = -2 \cdot \dot{I}_{\kappa A0}$.

$$\dot{I}_{\kappa A1} = \dot{I}_{\kappa A2} = \dot{I}_{\kappa A0} = \frac{1}{3} \dot{I}_{\kappa A}^{(1)}.$$

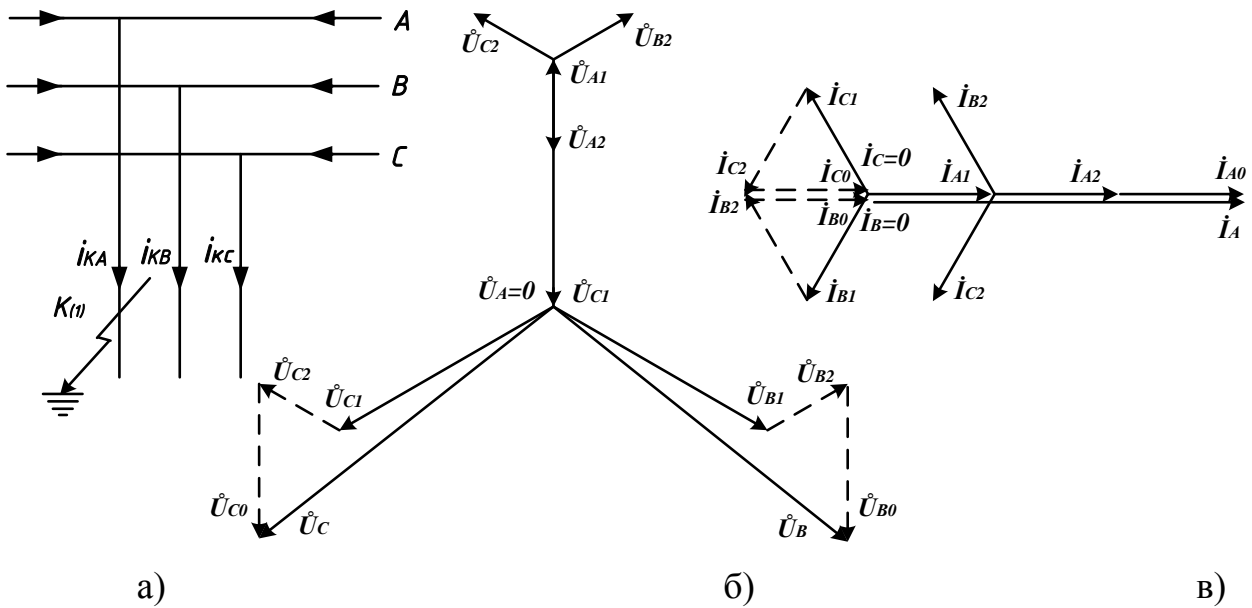


Рис. 3.4. Схема отщвления (а), векторные диаграммы напряжений (б) и токов (в) в месте однофазного КЗ

Для заземленной фазы А в соответствии с $\dot{U}_{\kappa A}^{(1)} = 0$.

$$\dot{U}_{\kappa A}^{(1)} = \dot{U}_{\kappa A1} + \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} = 0.$$

Уравнение ЭДС и напряжений для соответствующих последовательностей:

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \dot{E}_A - \dot{I}_{\kappa A1} \cdot j \cdot x_{1\text{рез}};$$

$$\dot{U}_{\kappa A2} = 0 - \dot{I}_{\kappa A2} \cdot j \cdot x_{2\text{рез}};$$

$$\dot{U}_{\kappa A0} = 0 - \dot{I}_{\kappa A0} \cdot j \cdot x_{0\text{рез}}.$$

При суммировании этих уравнений имеем

$$0 = \dot{E}_A - \dot{I}_{\kappa A1} \cdot j \cdot (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}}).$$

Ток прямой последовательности фазы А:

$$\dot{I}_{\kappa A1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{A\text{рез}}}{j \cdot (x_{1\text{рез}} + x_{2\text{рез}} + x_{0\text{рез}})}.$$

Ток КЗ в поврежденной фазе $\dot{i}_{\kappa A}^{(1)} = 3\dot{i}_{\kappa A1}^{(1)}$.

$$\dot{i}_{\kappa A}^{(1)} = \frac{3 \cdot \dot{E}_{A_{\text{рез}}}}{j \cdot (x_{1_{\text{рез}}} + x_{2_{\text{рез}}} + x_{0_{\text{рез}}})}.$$

Этот же ток является током замыкания на землю.

Симметричные составляющие напряжений в месте короткого замыкания:

$$\dot{U}_{\kappa A0} = -j \cdot \dot{I}_{\kappa A0} \cdot x_{0_{\text{рез}}} = -j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot x_{0_{\text{рез}}};$$

$$\dot{U}_{\kappa A2} = -j \cdot \dot{I}_{\kappa A2} \cdot x_{2_{\text{рез}}} = -j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot x_{2_{\text{рез}}}.$$

$$\text{Из уравнений } \dot{U}_{\kappa A1} + \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} = 0$$

$$\text{получим } \dot{U}_{\kappa A1} = -(\dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0}) = j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot (x_{2_{\text{рез}}} + x_{0_{\text{рез}}}).$$

Фазные напряжения в месте КЗ:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa B}^{(1)} &= a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + a \cdot \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} = a^2 \cdot j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot (x_{2_{\text{рез}}} + x_{0_{\text{рез}}}) - a \cdot j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot x_{2_{\text{рез}}} - j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot x_{0_{\text{рез}}} = \\ &= j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot [(a^2 - a) \cdot x_{2_{\text{рез}}} + (a^2 - 1) \cdot x_{0_{\text{рез}}}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\kappa C}^{(1)} &= a \cdot j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot (x_{2_{\text{рез}}} + x_{0_{\text{рез}}}) - a^2 \cdot j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot x_{2_{\text{рез}}} - j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot x_{0_{\text{рез}}} = \\ &= j \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot [(a - a^2) \cdot x_{2_{\text{рез}}} + (a - 1) \cdot x_{0_{\text{рез}}}] \end{aligned}$$

Из векторной диаграммы напряжений при однофазном КЗ получаем угол Θ между напряжениями неповрежденных фаз, зависит от соотношений между $x_{2_{\text{рез}}}$ и $x_{0_{\text{рез}}}$. Он изменяется от 60° до 180° . Нижний предел соответствует условию $x_{0_{\text{рез}}} \rightarrow \infty$, верхний предел при $x_{0_{\text{рез}}} \rightarrow 0$.

При $x_{0_{\text{рез}}} = x_{2_{\text{рез}}}$ угол $\Theta = 120^\circ$.

3.5.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное короткое замыкание на землю можно характеризовать следующими граничными условиями:

$$\dot{i}_{\kappa A}^{(1,1)} = 0, \quad \dot{U}_{\kappa B}^{(1,1)} = 0, \quad \dot{U}_{\kappa C}^{(1,1)} = 0.$$

Учитывая граничные условия, получаем

$$\dot{i}_{\kappa A}^{(1,1)} = \dot{i}_{\kappa A1} + \dot{i}_{\kappa A2} + \dot{i}_{\kappa A0} = 0,$$

откуда ток прямой последовательности

$$\dot{i}_{\kappa A1} = -(\dot{i}_{\kappa A2} + \dot{i}_{\kappa A0}).$$

Из граничных условий и разности уравнений системы имеем:

$$\dot{U}_{\kappa B} = a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + a \cdot \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0};$$

$$\dot{U}_{\kappa C} = a \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + a^2 \cdot \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0}.$$

$$\dot{U}_{\kappa B} - \dot{U}_{\kappa C} = (a^2 - a) \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + (a - a^2) \cdot \dot{U}_{\kappa A2} = 0;$$

$$(a^2 - a) \cdot \dot{U}_{\kappa A1} = (a^2 - a) \cdot \dot{U}_{\kappa A2};$$

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \dot{U}_{\kappa A2}.$$

По тем же условиям и сумме уравнений находим

$$0 = (a^2 + a) \cdot \dot{U}_{\kappa A1} + (a + a^2) \cdot \dot{U}_{\kappa A2} + 2 \cdot \dot{U}_{\kappa A0};$$

$$2 \cdot \dot{U}_{\kappa A1} = 2 \cdot \dot{U}_{\kappa A0} ;$$

$$\dot{U}_{\kappa A1} = \dot{U}_{\kappa A2} = \dot{U}_{\kappa A0} .$$

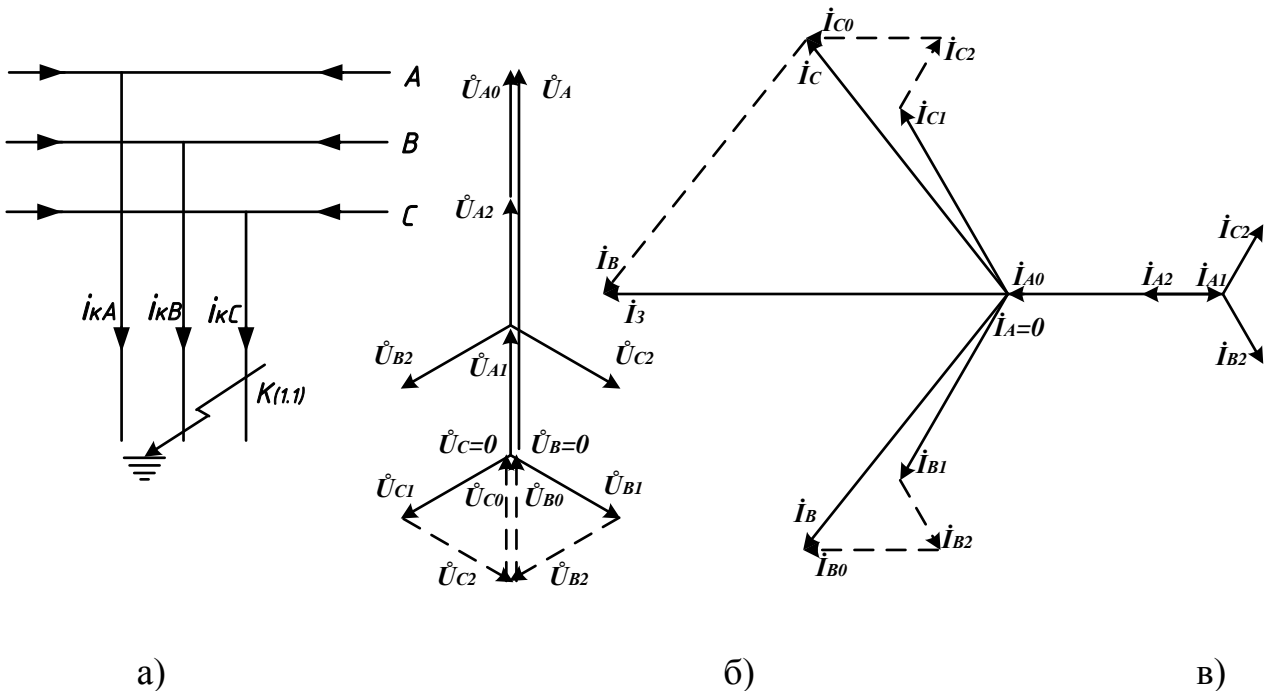


Рис. 3.5. Схема отщвления (а), векторные диаграммы напряжений (б) и токов (в) в месте двухфазного КЗ на землю

Используя данное равенство и основные уравнения, получаем

$$\dot{U}_{\kappa A2} = -j \cdot \dot{I}_{\kappa A2} \cdot x_{2 \text{pez}} ;$$

$$\dot{U}_{\kappa A0} = -j \cdot \dot{I}_{\kappa A0} \cdot x_{0 \text{pez}} ;$$

$$\dot{I}_{\kappa A0} = -\frac{\dot{U}_{\kappa A1}}{j \cdot x_{0 \text{pez}}}, \quad \dot{I}_{\kappa A2} = -\frac{\dot{U}_{\kappa A1}}{j \cdot x_{2 \text{pez}}} .$$

Эти значения подставляем в уравнение тока прямой последовательности:

$$\dot{I}_{\kappa A1} = \frac{\dot{U}_{\kappa A1}}{j \cdot x_{0 \text{pez}}} + \frac{\dot{U}_{\kappa A1}}{j \cdot x_{2 \text{pez}}},$$

$$\text{откуда } \dot{U}_{\kappa A1} = \frac{\dot{I}_{\kappa A1} \cdot j \cdot (x_{0 \text{pez}} + x_{2 \text{pez}})}{x_{0 \text{pez}} + x_{2 \text{pez}}},$$

а так как

$$\dot{U}_{\kappa A1}^{(1.1)} = \dot{E} - \dot{I}_{\kappa A1} \cdot j \cdot x_{1 \text{pez}} ;$$

$$\dot{I}_{\kappa A1}^{(1.1)} = \frac{\dot{E}_{A \text{pez}}}{j \cdot x_{1 \text{pez}} + j \cdot \left(\frac{x_{2 \text{pez}} \cdot x_{0 \text{pez}}}{x_{2 \text{pez}} + x_{0 \text{pez}}} \right)} .$$

Выразим токи обратной и нулевой последовательности через ток прямой последовательности, для этого напряжения \$\dot{U}_{\kappa A1}\$ подставим в \$\dot{I}_{\kappa A0}\$, \$\dot{I}_{\kappa A2}\$.

$$\dot{I}_{\kappa A0} = -\dot{I}_{\kappa A1} \frac{x_{2 \text{ пез}}}{x_{0 \text{ пез}} + x_{2 \text{ пез}}};$$

$$\dot{I}_{\kappa A2} = -\dot{I}_{\kappa A1} \frac{x_{0 \text{ пез}}}{x_{0 \text{ пез}} + x_{2 \text{ пез}}},$$

а токи в поврежденных фазах с учетом $\dot{I}_{\kappa A0} = 0$.

$$\dot{I}_{\kappa B}^{(1,1)} = \dot{I}_{\kappa A1} \cdot \left(a^2 - \frac{x_{2 \text{ пез}} + a \cdot x_{0 \text{ пез}}}{x_{0 \text{ пез}} + x_{2 \text{ пез}}} \right);$$

$$\dot{I}_{\kappa C}^{(1,1)} = \dot{I}_{\kappa A1} \cdot \left(a - \frac{x_{2 \text{ пез}} + a^2 \cdot x_{0 \text{ пез}}}{x_{0 \text{ пез}} + x_{2 \text{ пез}}} \right).$$

Ток в земле $\dot{I}_3^{(1,1)} = \dot{I}_{\kappa B} + \dot{I}_{\kappa C} = 3 \cdot \dot{I}_{\kappa O}^{(1,1)}$.

Значение токов в аварийных фазах

$$\dot{I}_{\kappa B}^{(1,1)} = \dot{I}_{\kappa C}^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{\kappa A1} \cdot \frac{\sqrt{x_{2 \text{ пез}}^2 + x_{2 \text{ пез}} \cdot x_{0 \text{ пез}} + x_{0 \text{ пез}}^2}}{x_{0 \text{ пез}} + x_{2 \text{ пез}}}.$$

Действительные напряжения в месте КЗ:

$$\dot{U}_{\kappa B}^{(1,1)} = \dot{U}_{\kappa C}^{(1,1)} = 0,$$

$$\dot{U}_{\kappa A}^{(1,1)} = \dot{U}_{\kappa A1} + \dot{U}_{\kappa A2} + \dot{U}_{\kappa A0} = 3 \cdot \dot{U}_{\kappa A1}.$$

3.6. Правило эквивалентности прямой последовательности

Обращаясь к полученным выше выражениям симметричных составляющих токов и напряжений в месте несимметричного КЗ (п. 3.1), видим, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ. Следовательно, задача расчета любого несимметричного КЗ прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

В общем виде можно записать ток прямой последовательности фазы *A* при любом несимметричном КЗ через параметры цепи

$$I_{\kappa A1}^{(n)} = \frac{E_{\text{пез}A}}{j(X_{1 \text{ пез}} + \Delta X^{(n)})},$$

где *n*- обозначает вид КЗ;

$\Delta X^{(n)}$ -дополнительное сопротивление в зависимости от вида КЗ;

Модуль фазного тока в месте несимметричного КЗ в общем виде определяется выражением:

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{\kappa A1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент, зависящий от вида КЗ, который можно найти по данным таблицы 3.2.

Правило эквивалентности прямой последовательности: *ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определён как ток при трёхфазном КЗ в точке, удалённой от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$.*

Это сопротивление не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида КЗ вычисляется по результирующим сопротивлениям обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки схемы.

Для напряжения прямой последовательности:

$$U_{KI}^{(n)} = j \cdot \Delta X^{(n)} \cdot I_{KI}^{(n)}.$$

Фаза *A* принята в качестве особой, т.е. находящейся в условиях, отличных от условий для двух других фаз.

Определение тока в какой-либо ветви расчётной схемы производится в соответствии с токораспределением в схемах соответствующих последовательностей, считая, что токи прямой последовательности в месте несимметричного КЗ связаны между собой зависимостями, приведёнными ниже в таблице 3.2

Таблица 3.2

Выражения симметричных составляющих токов и напряжений различных КЗ

Наименование и обозначение	Двухфазное КЗ $K^{(2)}$	Двухфазное КЗ на землю $K^{(1,1)}$	Однофазное КЗ $K^{(1)}$
1	2	3	4
Дополнительное $\Delta X^{(n)}$ сопротивление	X_{pez2}	$\frac{X_{pez0} \cdot X_{pez2}}{X_{pez0} + X_{pez2}}$	$X_{pez0} + X_{pez2}$
Коэффициент $m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{pez0} \cdot X_{pez2}}{(X_{pez0} + X_{pez2})^2}}$	3
Ток прямой последовательности $\underline{i}_{\kappa A1}^{(n)}$	$\frac{\dot{E}_{pez}}{j(X_{pez1} + X_{pez2})}$	$\frac{\dot{E}_{pez}}{j(X_{pez1} + \frac{X_{pez0} X_{pez2}}{X_{pez0} + X_{pez2}})}$	$\frac{\dot{E}_{pez}}{j(X_{pez1} + X_{pez2} + X_{pez0})}$
Ток обратной последовательности $\underline{i}_{\kappa A2}^{(n)}$	$-\dot{i}_{\kappa A1}$	$-\dot{i}_{\kappa A1} \frac{X_{pez0}}{X_{pez0} + X_{pez2}}$	$\dot{i}_{\kappa A1}$
Ток нулевой последовательности $\underline{i}_{\kappa A0}^{(n)}$	0	$-\dot{i}_{\kappa A1} \cdot \frac{X_{pez2}}{X_{pez0} + X_{pez2}}$	$\dot{i}_{\kappa A1}$
Ток в фазе А $\dot{i}_{\kappa A}$	0	0	$3\dot{i}_{\kappa A1}$
Ток в фазе В $\dot{i}_{\kappa B}$	$a^2 \dot{i}_{\kappa A1} - a \dot{i}_{\kappa A1}$	$\dot{i}_{\kappa A1} (a^2 - \frac{aX_{pez0} + X_{pez2}}{X_{pez0} + X_{pez2}})$	0
Ток в фазе С $\dot{i}_{\kappa C}$	$a \dot{i}_{\kappa A1} - a^2 \dot{i}_{\kappa A1}$	$\dot{i}_{\kappa A1} (a - \frac{a^2 X_{pez0} + X_{pez2}}{X_{pez0} + X_{pez2}})$	0
Напряжение прямой последовательности $\dot{U}_{\kappa A1}$	$\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{pez2}$	$\dot{i}_{\kappa A1} (j \frac{X_{pez2} \cdot X_{pez0}}{X_{pez2} + X_{pez0}})$	$j \cdot (X_{pez2} + X_{pez0}) \cdot \dot{i}_{\kappa A1}$

1	2	3	4
Напряжение обратной последовательности $\dot{U}_{\kappa A2}$	$\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{\text{рез}2}$	$\dot{i}_{\kappa A1} \left(j \frac{X_{\text{рез}2} \cdot X_{\text{рез}0}}{X_{\text{рез}2} + X_{\text{рез}0}} \right)$	$-j \cdot X_{\text{рез}2} \cdot \dot{i}_{\kappa A1}$
Напряжение нулевой последовательности $\dot{U}_{\kappa A0}$	0	$\dot{i}_{\kappa A1} \left(j \frac{X_{\text{рез}2} \cdot X_{\text{рез}0}}{X_{\text{рез}2} + X_{\text{рез}0}} \right)$	$-j \cdot X_{\text{рез}0} \cdot \dot{i}_{\kappa A1}$
Напряжение фазы А $\dot{U}_{\kappa A}$	$2\dot{i}_{\kappa A1} \cdot j \cdot X_{\text{рез}2}$	$3\dot{i}_{\kappa A1} \left(j \frac{X_{\text{рез}0} X_{\text{рез}2}}{X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2}} \right)$	0
Напряжение фазы В $\dot{U}_{\kappa B}$	$-\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{\text{рез}2}$	0	$\dot{i}_{\kappa A1} j [X_{\text{рез}2} (a^2 - a) + X_{\text{рез}0} (a^2 - 1)]$
Напряжение фазы С $\dot{U}_{\kappa C}$	$-\dot{i}_{\kappa A1} j \cdot X_{\text{рез}2}$	0	$\dot{i}_{\kappa A1} j [X_{\text{рез}2} (a - a^2) + X_{\text{рез}0} (a - 1)]$
Ток в земле \dot{I}_3	0	$-3\dot{i}_{\kappa A1} \cdot \frac{X_{\text{рез}2}}{X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2}}$	$3\dot{i}_{\kappa A1}$

3.7. Применение метода расчетных кривых для расчета несимметричных КЗ

Все рассмотренные выше практические методы расчета переходного процесса при трехфазном КЗ согласно правилу эквивалентности прямой последовательности могут быть применены для расчета переходного процесса при любом несимметричном КЗ.

Порядок пользования расчетными кривыми для определения токов несимметричного КЗ вытекает из основного правила: *несимметричное КЗ рассчитывается как симметричное трехфазное с отнесением места КЗ к дополнительному сопротивлению $\Delta X^{(n)}$ для данного вида КЗ.*

Для расчёта несимметричных КЗ вначале составляют схемы замещения с учетом всех последовательностей (прямой, обратной и нулевой). Определяют параметры входящих в схемы элементов и указывают их значения на схемах замещения. Затем составляют эквивалентные схемы замещения и находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей $X_{\text{рез}1}$, $X_{\text{рез}2}$, $X_{\text{рез}0}$ относительно точки КЗ, а также результирующую ЭДС прямой последовательности $E_{\text{рез}}$ относительно той же точки. По значениям $X_{\text{рез}1}$, $X_{\text{рез}2}$, $X_{\text{рез}0}$ вычисляют эквивалентное сопротивление для данного вида несимметричного КЗ.

$$X^{(n)}_{\text{рез}} = X_{\text{рез}1} + \Delta X^{(n)};$$

$$\Delta X^{(3)} = 0;$$

$$\Delta X^{(1,1)} = \frac{X_{\text{рез}0} \cdot X_{\text{рез}2}}{X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2}};$$

$$\Delta X^{(1)} = X_{\text{рез}0} + X_{\text{рез}2};$$

$$\Delta X^{(2)} = X_{\text{рез}2}.$$

Чтобы воспользоваться расчетными кривыми для приближенного определения тока прямой последовательности в произвольный момент переходного процесса, необходимо найти расчетное реактивное сопротивление $X_{*расч}^{(n)}$ для данного вида КЗ. С учетом индивидуального изменения токов расчетное сопротивление выделяемой генерирующей j ветви при любом несимметричном КЗ определяется по формуле:

$$X_{*расч}^{(n)} = \frac{X_{рез}^{(n)} \cdot S_{ном.j}}{U_{\delta}^2} \quad \text{или} \quad X_{*расч}^{(n)} = \frac{X_{рез}^{(n)} \cdot S_{ном.j}}{S_{\delta}}.$$

При расчете по общему изменению $S_{ном.j}$ следует понимать суммарную номинальную мощность всех генераторов в схеме.

Имея в виду приближенность данного метода расчета, можно для упрощения принять $X_{2рез} \approx X_{1рез}$, т.е. считать результирующее сопротивление обратной последовательности равным результирующему сопротивлению, определяемому для трехфазного КЗ в той же точке.

По найденному $X_{*расч}$, используя соответствующие кривые, находят для заданного момента времени t относительное значение тока прямой последовательности $I_{*К1t}^{(n)}$, а затем по формулам, приведенным в таблице 3.2, определяют токи обратной и нулевой последовательностей, а также напряжения всех последовательностей в месте КЗ.

Значение периодической составляющей тока в месте КЗ вычисляют по формуле:

$$I_{Кt}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{*К1t}^{(n)} \cdot I_{ном\Sigma},$$

а при расчёте с учётом индивидуального изменения

$$I_{Кt}^{(n)} = m^{(n)} \cdot [I_{*К1I}^{(n)} \cdot I_{номI} + I_{*К1II}^{(n)} \cdot I_{номII} + \dots +],$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида КЗ.

$$m^{(2)} = \sqrt{3};$$

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{рез0} \cdot X_{рез2}}{(X_{рез0} + X_{рез2})^2}};$$

$$m^{(1)} = 3;$$

$I_{ном\Sigma}$ – суммарный номинальный ток генераторов, приведённый к напряжению той ступени, где рассматривается КЗ;

$I_{*К1I}^{(n)}$, $I_{*К1II}^{(n)}$ – относительные значения токов прямой последовательности, найденные по расчетным кривым для выделенных ветвей I , II и т.д.;

$I_{номI}$, $I_{номII}$ – номинальные токи тех же ветвей, приведенные к напряжению ступени, где рассматривается КЗ.

Система при расчёте несимметричного КЗ учитывается так же, как и при расчёте трёхфазного КЗ.

$$X_{*с} = X_{*рез1} + \Delta X_{*с}^{(n)}.$$

Ток прямой последовательности, создаваемый таким источником, рассчитывают по формуле, если сопротивление $X_{*с}$ источника выражено в относительных единицах

$$I_c = \frac{I_{\delta}}{X_{*c}},$$

если это сопротивление задано в именованных единицах:

$$I_c = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot X_c}.$$

При введении дополнительного реактивного сопротивления $\Delta X^{(n)}$ у условия работы отдельных генераторов (или станций) при несимметричных КЗ отличаются меньше, чем при трехфазном КЗ в той же точке. Поэтому при расчете несимметричных КЗ индивидуальное затухание периодической составляющей тока КЗ зачастую можно не учитывать или учитывать для меньшего числа выделяемых ветвей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
2. Переходные процессы в системах электроснабжения: Учебник /В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др.; Под ред. В.Н. Винославского. –К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989.
3. Переходные процессы в электроэнергетических системах: [текст]Учеб. пособие/ Ред. И.П. Крючков. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. - 416 с. (5 экз)
4. Пилипенко, В.Т. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие / В.Т. Пилипенко. - Оренбург: ОГУ, 2014. - 124 с.
5. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др.; Под ред. И.П. Крючкова и В.А. Старшинова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.
6. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. - М.: Энергия, 1970.

Татарникова Анна Николаевна
Парфенова Наталья Алексеевна

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
Часть 1
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Учебное пособие для студентов направления подготовки
«Электроэнергетика и электротехника»

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 05.07.2016. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 4,69. Тираж 120 экз. Заказ 161557. Рег. № 10.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/б.