

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ХАКАССКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ –
ФИЛИАЛ ФГАОУ ВО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Коловский

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие

Абакан
ХТИ – филиал СФУ
2020

УДК 621.311(075)
ББК 31.279-04я73
К61

Рецензенты:

А. С. Дулесов, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий и систем, ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова»;

М. В. Сузгаев, канд. техн. наук, главный инженер – технический директор, ООО «ЭнергоСтройНаладка».

Автор: Коловский Алексей Владимирович

К61 Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие / А. В. Коловский ; Сибирский федеральный университет, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан : ХТИ – филиал СФУ, 2020. – 1 файл (2,48 МБ). – Текст : электронный.
ISBN 978-5-4288-0084-5

Содержит краткий теоретический материал по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах». Приведены основные физические закономерности протекания переходных процессов, а также методы их расчета и анализа. Рассмотрены примеры решения задач.

Предназначено для обучающихся очной и заочной форм обучения по программе бакалавриата направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.311(075)
ББК 31.279-04я73

Учебное электронное издание

Минимальные системные требования: Intel Pentium 1,6 GHz и более; 256 Мб (RAM); 200 Мб дискового пространства; Microsoft Windows XP и выше; Firefox (3.0 и выше) или IE (7 и выше) или Opera (10.00 и выше), Flash Player, Adobe Reader

Редактор Н. Я. Бодягина

Техническая подготовка материалов Н. Я. Бодягина

Подписано к использованию 30.12.2020 г.

Хакасский технический институт –

филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

655017, Абакан, ул. Щетинкина, 27, тел. (3902)22-53-55, e-mail ris_khti@mail.ru

ISBN 978-5-4288-0084-5

© ХТИ – филиал СФУ, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
ЧАСТЬ I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ	10
Глава 1. Основные сведения о переходных процессах в ЭЭС и схемы замещения	10
1.2. Виды, причины и последствия КЗ	12
1.3. Назначения расчетов и основные допущения при расчете токов КЗ	14
1.4. Составление схем замещения	15
1.5. Преобразование схем замещения	16
Пример решения задачи.....	19
Контрольные вопросы.....	22
Глава 2. Расчет и приведение параметров схем замещения. Расчет начального значения тока КЗ.....	23
2.1. Система именованных единиц	23
2.2. Система относительных единиц	25
2.3. Расчет параметров элементов схем замещения	29
2.4. Расчет начального значения тока КЗ.....	32
Пример решения задачи.....	33
Контрольные вопросы.....	38
Глава 3. Переходные процессы при трехфазном КЗ	40
3.1. Электромагнитные переходные процессы в простейшей цепи при питании ее от источника бесконечной мощности	40
3.2. КЗ в цепи, питающейся от генератора ограниченной мощности.....	47
3.3. Короткое замыкание в удаленных точках СЭС	53
Контрольные вопросы.....	54
Глава 4. Учет электродвигателей и обобщенной нагрузки при расчетах начального значения тока КЗ.....	55

4.1. Переходные процессы в синхронном двигателе и СК	55
4.2. Переходные процессы в асинхронных двигателях.....	56
4.3. Расчеты токов КЗ с учетом электрических двигателей.....	59
Пример решения задачи.....	61
Контрольные вопросы.....	63
Глава 5. Расчет тока короткого замыкания в заданный момент времени.....	65
5.1. Общие положения метода типовых кривых	65
5.2. Схема с одним синхронным генератором (компенсатором)	67
5.3. Схема с несколькими однотипными синхронными генераторами (компенсаторами), находящимися в одинаковых условиях по отношению к точке короткого замыкания.....	69
5.4. Сложная схема.....	69
Пример решения задачи.....	72
Контрольные вопросы.....	78
Глава 6. Метод симметричных составляющих. Схемы замещения различных последовательностей.....	80
6.1. Метод симметричных составляющих	80
6.2. Схемы замещения отдельных последовательностей.....	83
6.3. Сопротивления элементов токам отдельных последовательностей	86
Контрольные вопросы.....	89
Глава 7. Несимметричные КЗ.....	90
7.1. Основные допущения и положения	90
7.2. Однофазное короткое замыкание	91
7.3. Двухфазное короткое замыкание.....	93
7.4. Двухфазное короткое замыкание на землю.....	96

7.5. Правило эквивалентности прямой последовательности	99
Пример решения задачи.....	100
Контрольные вопросы.....	109
Глава 8. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью. однократная Продольная несимметрия	110
8.1. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью	110
8.2. Однократная продольная несимметрия	112
8.2.1. Общие замечания	112
8.2.2. Разрыв одной фазы.....	113
8.2.3. Разрыв двух фаз	116
Контрольные вопросы.....	118
Глава 9. КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ НИЖЕ 1 кВ	119
9.1. Основные положения.....	119
9.2. Расчет сопротивлений элементов схемы замещения	121
9.3. Расчет тока короткого замыкания	125
Контрольные вопросы.....	126
ЧАСТЬ II. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	128
Глава 10. Понятие статической устойчивости. Статическая устойчивость простейшей системы	128
10.1. Основные понятия.....	128
10.2. Уравнение движения ротора генератора	129
10.3. Характеристика мощности генератора	132
Контрольные вопросы.....	136
Глава 11. Угловые характеристики регулируемого генератора. Характеристики мощности при сложной связи генератора с энергосистемой	138

11.1. Угловые характеристики регулируемого генератора.....	138
11.2. Упрощенные математические модели регулируемого генератора	141
11.3. Характеристика мощности при сложной связи генератора с приемной системой	142
Контрольные вопросы.....	146
Глава 12. Понятие о динамической устойчивости и правило площадей	147
Контрольные вопросы.....	152
Глава 13. Динамическая устойчивость при коротком замыкании на линии и Предельный угол отключения	154
13.1. Динамическая устойчивость при несимметричных коротких замыканиях.....	154
13.2. Предельный угол отключения короткого замыкания	158
13.3. Анализ трехфазного короткого замыкания графическим методом	159
Пример решения задачи.....	161
Контрольные вопросы.....	166
Глава 14. Мероприятия по повышению динамической устойчивости	168
14.1. Автоматическое повторное включение	168
14.2. Отключение части генераторов	169
14.3. Автоматическое регулирование возбуждения	170
14.4. Автоматическая разгрузка по частоте (АЧР)	171
14.5. Аварийная разгрузка турбин генераторов	172
Контрольные вопросы.....	173
Глава 15. Статические характеристики нагрузки.....	174
5.1. Вводные замечания	174
15.2. Реактор и батарея статических конденсаторов	174

15.3. Синхронный компенсатор	175
15.4. Синхронный двигатель	177
15.5. Асинхронный двигатель	178
15.6. Коэффициенты крутизны и регулирующие эффекты нагрузки	180
Пример решения задачи.....	181
Контрольные вопросы.....	185
Глава 16. Статическая устойчивость узла нагрузки.....	186
16.1. Первичный критерий устойчивости	186
16.2. Вторичные критерии устойчивости нагрузки	188
Контрольные вопросы.....	191
Глава 17. Динамическая устойчивость двигателей нагрузки	193
17.1. Вводные замечания	193
17.2. Динамическая устойчивость асинхронного двигателя	194
17.3. Динамическая устойчивость синхронного двигателя	197
Контрольные вопросы.....	199
Глава 18. Пуск и самозапуск двигателей	200
18.1. Пуск двигателей	200
18.2. Самозапуск двигателей.....	205
Контрольные вопросы.....	208
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	209

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью современного развития электроэнергетики является рост мощности электрических машин, увеличение протяженности линий, усложнение структуры распределительных сетей, увеличение мощности коммутационных аппаратов, рост максимальных уровней токов короткого замыкания (КЗ).

Надежность работы энергосистемы во многом зависит от того, как полностью учтены возможные опасные проявления в них переходных процессов. Изучение переходных процессов не может являться самоцелью. Их исследование необходимо для предотвращения возникновения опасных переходных процессов или разработки мероприятий по облегчению их условий протекания и борьбы с последствиями. Следовательно, чем глубже знания о переходных процессах, тем больше возможность управлять ими.

Цель дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» – дать основные сведения о процессах, происходящих в электрических сетях при изменении их режима, а также о процессах, связанных с короткими замыканиями и анализом устойчивости. При изучении дисциплины обучающийся:

- приобретет знание методик расчета токов короткого замыкания в узлах энергетических систем;
- изучит соотношения токов и напряжений при различных видах короткого замыкания;
- изучит физические процессы, происходящие в системе при нарушении ее режима работы;
- приобретет знание об определении эффективности мероприятий, направленных на обеспечение устойчивой работы системы;
- научится определять значения токов в ветвях схемы и величины остаточных напряжений в узлах;
- оценивать устойчивость энергосистемы и определять допустимое время локализации аварии.

Полученные знания и навыки расчетов токов короткого замыкания необходимы будущему энергетiku:

- при выборе оборудования на проектируемых объектах и проверке его на динамическое и термическое действие токов КЗ;
- при определении уставок релейной защиты и проверке селективности работы защитных коммутационных аппаратов.

В пособии основное внимание уделяется физической сущности этих процессов, характеру их протекания и производству количественной оценки их параметров. Назначение пособия состоит также в том, чтобы дать необходимые теоретические основы для решения практических задач, связанных с повышением надежности работы электрических систем.

Пособие состоит из двух частей. В первой части рассматриваются электромагнитные переходные процессы и основное внимание уделяется изучению токов КЗ. Во второй – электромеханические переходные процессы; здесь разбираются вопросы устойчивости энергосистемы и узлов нагрузки.

ЧАСТЬ I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В ЭЭС И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

1.1. Основные понятия

Энергосистема (ЭС) – это совокупность электрических станций, линий электропередач, подстанций, тепловых сетей, вспомогательного оборудования и сооружений, связанных общностью режима и непрерывностью процесса генерации, преобразования, передачи и потребления электрической и тепловой энергии.

Электроэнергетическая система (ЭЭС) – условно выделенная часть энергосистемы, в которой генерируется, преобразуется, передается и потребляется электрическая энергия.

Режим электрической системы – состояние, характеризующее условия работы ЭЭС и процесс её функционирования в любой момент времени.

Количественными показателями режима (параметрами режима) являются мощности на выводах генераторов и у потребителей, напряжения в узловых точках, токи в различных элементах, частоты и другие величины, связанные функционально между собой через параметры элементов системы. К параметрам элементов системы относятся сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени и др. Например, согласно закону Ома, $I = \frac{U}{R}$, где I и U относят к параметрам режима, а R – к параметрам системы.

Режимы электрических систем подразделяются на виды:

1. *Нормальный установившийся* (для которого проектируется система и определяются технико-экономические показатели). Значения параметров

этого режима изменяются в пределах, соответствующих нормальной работе потребителей.

2. Нормальный переходный (когда система переходит от одного рабочего состояния к другому, т. е. обычные эксплуатационные изменения). Этот режим характеризуется быстрым и резким изменением параметров некоторых элементов ЭЭС при незначительном изменении параметров в узловых точках.

3. Аварийные установившиеся и переходные. Для них определяются технические характеристики, связанные с необходимостью ликвидации аварии и выяснения условий дальнейшей работы системы. Значения параметров всех элементов и узловых точек резко отличаются от номинальных.

4. Послеаварийные установившиеся – параметры оставшихся в работе элементов ЭЭС могут быть близки к параметрам нормального режима или значительно отличаться от них.

Переходные процессы – процессы, появляющиеся в электроэнергетической системе при переходе от одного режима к другому, отличающемуся от предыдущего амплитудой, фазой, формой или частотой действующего в цепи напряжения, значением параметров, структурой системы.

Электромагнитный переходной процесс – процесс изменения во времени электромагнитных параметров режима электроустановки без учета влияния на них изменения частоты вращения синхронных генераторов ЭЭС.

Электромеханический переходный процесс – переходный процесс, характеризуемый одновременным изменением значений электромагнитных и механических величин, определяющих состояние ЭЭС.

Замыкание – случайное или преднамеренное электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или с землей, не предусмотренное нормальным режимом работы.

Короткое замыкание (КЗ) – замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают и превышают наибольший длительно допустимый ток продолжительного режима.

1.2. Виды, причины и последствия КЗ

Замыкания в глухо или эффективно заземленных сетях через дугу либо непосредственные соединения электрической установки относят к коротким замыканиям ([табл. 1.1](#)).

Таблица 1.1

Виды коротких замыканий

Схема замыкания	Режим нейтрали			
	Глухо или эффективно заземленная нейтраль		Незаземленная или резонансная заземленная нейтраль	
	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
	Трехфазное КЗ	$K^{(3)}$	Трехфазное КЗ	$K^{(3)}$
	Трехфазное КЗ на землю	$K^{(1,1,1)}$	Трехфазное КЗ на землю (имеет контакт с землей)	$K^{(3,3)}$
	Двухфазное КЗ	$K^{(2)}$	Двухфазное КЗ	$K^{(2)}$
	Двухфазное КЗ на землю	$K^{(1,1)}$	Двухфазное КЗ (имеет контакт с землей)	$K^{(2,3)}$
	Однофазное КЗ	$K^{(1)}$	Однофазное замыкание на землю	$Z^{(1)}$
	Двойное КЗ на землю	$K^{(1+1)}$	Двойное замыкание на землю	$Z^{(1+1)}$

По усредненным данным, короткие замыкания различных видов в сетях распределяются следующим образом:

- трехфазные – 5 %,
- двухфазные – 10 %,
- двухфазные на землю и двойные – 20 %,
- однофазные – 65 %.

Причины коротких замыканий:

- 1) старение изоляции;
- 2) перенапряжение;
- 3) прямые удары молнии;
- 4) механические повреждения;
- 5) набросы и падение посторонних предметов на токоведущие части;
- 6) неудовлетворительный уход за электрическим оборудованием;
- 7) ошибочные действия персонала.

Последствия коротких замыканий:

- 1) нарушение термической стойкости (нагрев электрического оборудования или термические повреждения, возгорание электроустановок);
- 2) нарушение электродинамической стойкости (появление больших усилий между токоведущими частями, которые ведут к возникновению механических повреждений и разрушению);
- 3) снижение напряжения и искажение его симметрии, что отрицательно сказывается на работе потребителей (нарушения технологического цикла, брак продукции и т. д.);
- 4) наведение ЭДС, опасных для обслуживающего персонала и используемой аппаратуры в соседних линиях связи и сигнализации при несимметричных КЗ;
- 5) нарушение устойчивости отдельных элементов и режима ЭЭС в целом, приводящее к возникновению аварийных ситуаций с отключением большого количества потребителей электроэнергии.

1.3. Назначения расчетов и основные допущения при расчете токов КЗ

Расчеты токов короткого замыкания и переходных процессов необходимы:

- 1) для определения допустимости режимов возможных КЗ;
- 2) выбора электрических аппаратов и проводников по условиям электродинамической и термической стойкости;
- 3) проектирования и настройки релейной защиты и автоматики;
- 4) выбора наиболее рациональных схем электрических соединений;
- 5) проектирования заземляющих устройств;
- 6) определения влияния тока КЗ на линии связи;
- 7) выбора разрядников;
- 8) анализа аварий в электроустановках;
- 9) проведения различных испытаний в ЭЭС;
- 10) при оценке и определении параметров устройств гашения магнитного поля синхронных машин (СМ);
- 11) при оценке и выборе системы возбуждения СМ.

При расчетах токов короткого замыкания принимаются следующие *основные допущения*.

В сетях выше 1000 В:

1. Пренебрегают насыщением магнитных систем всех элементов цепи КЗ (генераторов, трансформаторов, двигателей).
2. Если отношение результирующих сопротивлений (активного и реактивного) от источника до точки КЗ о. е., то пренебрегают активным сопротивлением элементов схемы; активное сопротивление учитывают только в кабельных линиях и воздушных линиях со стальными проводами.
3. Пренебрегают различиями значений сверхпереходных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям синхронных машин.
4. Приблизительно учитывают нагрузки в схемах замещения.
5. Пренебрегают емкостными проводимостями воздушных линий до 220 кВ, при напряжениях свыше 220 кВ ими пренебрегать нельзя, так как они влияют на переходные процессы.

6. Система, в которой протекает переходной процесс, считается симметричной, все расчеты проводятся на одну фазу (обычно фазу А).

7. Пренебрегают токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов (исключение: случай включения трехстержневого трансформатора на напряжение нулевой последовательности).

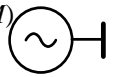
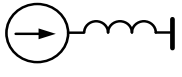
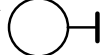

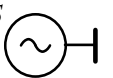

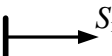
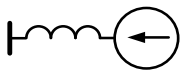
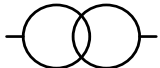

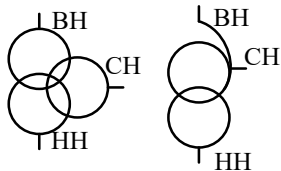
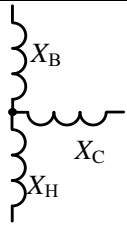
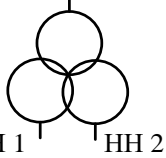
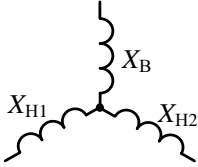
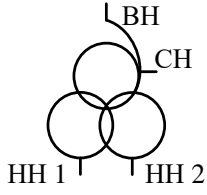
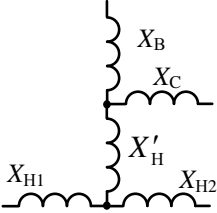



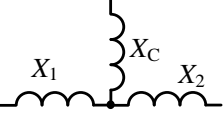
Расчеты тока КЗ в сетях до **1000 В** выполняют с такими же допущениями, но с учетом активных сопротивлений силовых элементов сети. В расчетную схему КЗ необходимо включать также сопротивление проводников, кабелей, шин длиной 10–15 м и более, токовых катушек расцепителей автоматических выключателей, первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока, переходных сопротивлений контактов, коммутационных аппаратов, переходных сопротивлений в месте КЗ, несимметрию сопротивлений фаз.

1.4. Составление схем замещения

На первом этапе расчета аварийных режимов КЗ на основе принципиальной схемы составляют расчетную схему (РС). Она составляется для начального момента переходного процесса или для его установившегося режима, и на ней в однолинейном изображении показывают: источники ЭЭС, точку КЗ и его вид и все силовые элементы, по которым возможно протекание тока КЗ или его составляющих.

Схема замещения составляется на основе расчетной схемы и представляет собой совокупность схем замещения отдельных элементов ([табл. 1.2](#)), соединенных между собой в той же последовательности, что и на расчетной схеме. Переход от расчетной схемы к схеме замещения сводится к замене расчетной схемы эквивалентной электрической цепью, включающей в себя источники ЭДС, неизменные сопротивления и точку КЗ. Для упрощения расчетов все магнитосвязанные цепи заменяют одной эквивалентной. Сопротивления элементов представляют в виде дроби: в числителе порядковый номер элемента, в знаменателе – значение его сопротивления.

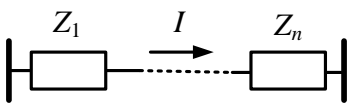
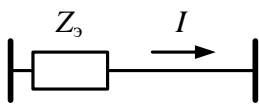
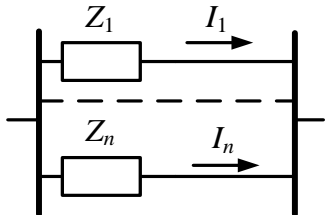
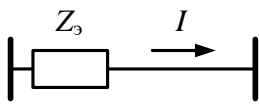
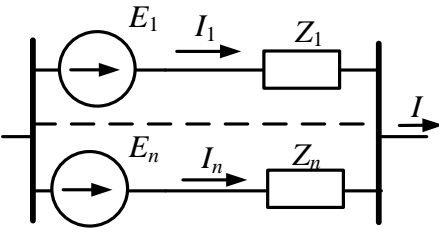
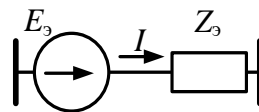
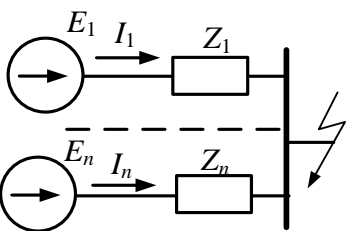
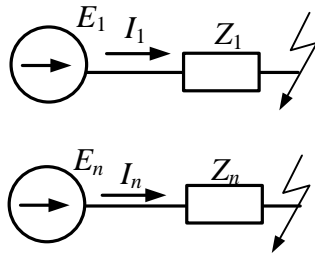
Схемы замещения элементов

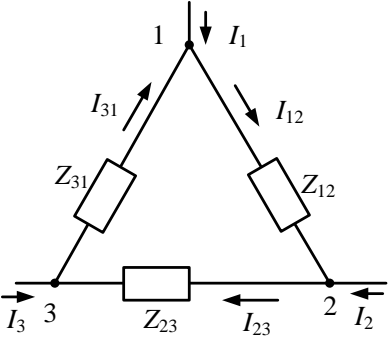
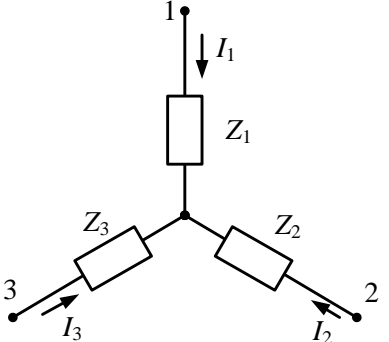
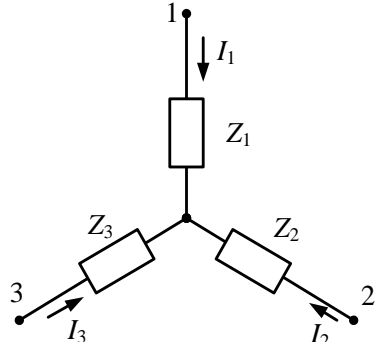
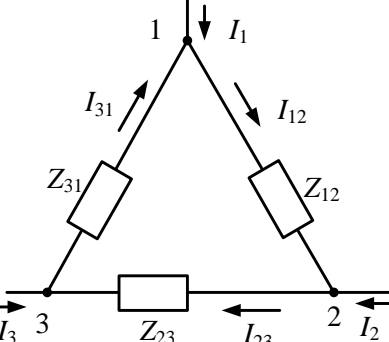
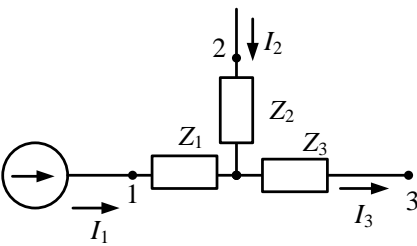
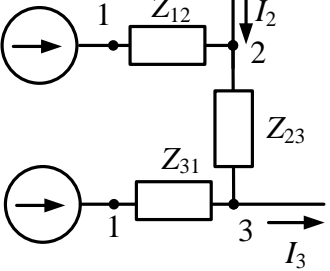
Элемент	Расчетная схема	Схема замещения
Синхронная машина (генератор, двигатель)	$G(M)$ 	
Асинхронный двигатель	M 	
Эквивалентный источник системы	GS 	
Обобщенная нагрузка		
Двухобмоточный трансформатор		
Трехобмоточный трансформатор / авто- трансформатор		
Трехфазный трансформатор с расщепленной обмоткой НН		
Автотрансформатор с расщепленной обмот- кой НН		
Реактор		
Сдвоенный реактор		

1.5. Преобразование схем замещения

Для определения результирующего сопротивления короткозамкнутой цепи схему замещения СЭС приводят к простейшему виду путем эквивалентных преобразований. При этом могут быть использованы способы преобразований и расчета, приведенные в [табл. 1.3](#).

Основные формулы преобразования схем замещения

Преобразование	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Параметры элементов после преобразования
Последовательное соединение			$Z_3 = \sum_{k=1}^n Z_k$
Параллельное соединение			$Z_3 = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k}}$
Замена нескольких источников эквивалентным			$E_3 = Z_3 \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{Z_k};$ $Z_3 = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k}}$
Разрезание узла трехфазного КЗ			-

Преобразование	Схема до преобразования	Схема после преобразования	Параметры элементов после преобразования
Преобразование треугольника в звезду			$Z_1 = \frac{Z_{12}Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}};$ $Z_2 = \frac{Z_{12}Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}};$ $Z_3 = \frac{Z_{23}Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}$
Преобразование звезды в треугольник			$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1Z_2}{Z_3};$ $Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2Z_3}{Z_1};$ $Z_{31} = Z_3 + Z_1 + \frac{Z_3Z_1}{Z_2}$
Преобразование трехлучевой звезды с ЭДС в разрезанный треугольник (возможно и обратное преобразование).			Те же, что и при преобразовании звезды в треугольник

Пример решения задачи

Задача

Привести схему на [рис. 1.1](#) к простейшему виду для точки К, используя эквивалентные преобразования.

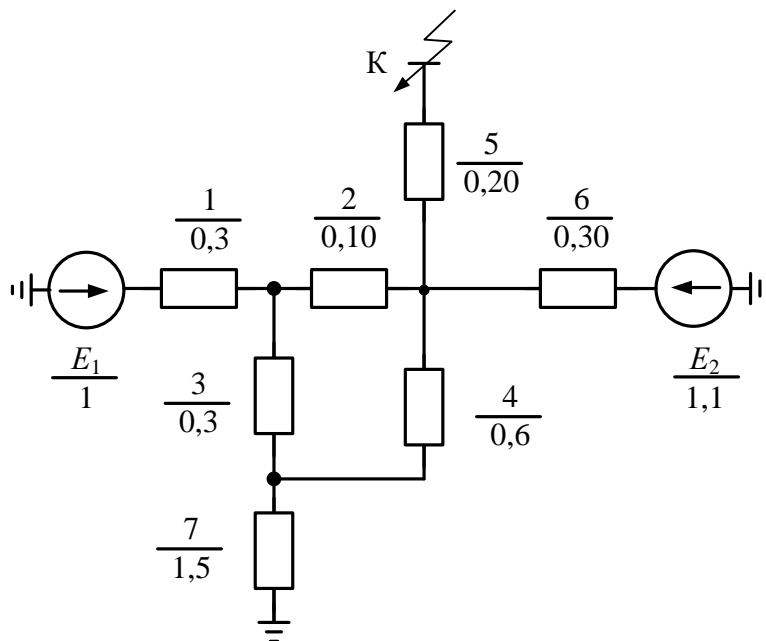


Рис. 1.1. Исходная схема замещения

Решение

Преобразуем треугольник Z_2, Z_3, Z_4 в звезду Z_8, Z_9, Z_{10} . Полученная схема изображена на [рис. 1.2](#).

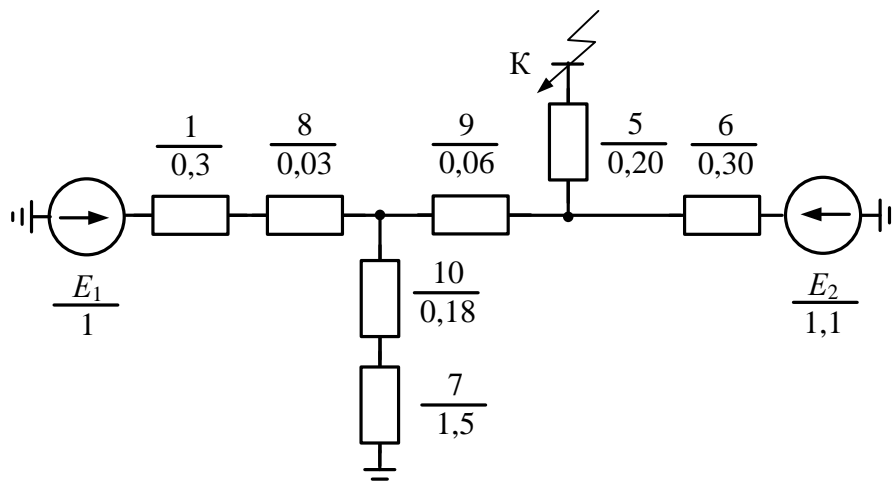


Рис. 1.2. Схема замещения после первого преобразования

$$Z_8 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3 + Z_4} = \frac{0,1 \cdot 0,3}{0,1 + 0,3 + 0,6} = 0,03 \text{ о. е.};$$

$$Z_9 = \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} = \frac{0,1 \cdot 0,6}{0,1 + 0,3 + 0,6} = 0,06 \text{ о. е.};$$

$$Z_{10} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} = \frac{0,3 \cdot 0,6}{0,1 + 0,3 + 0,6} = 0,18 \text{ о. е.}$$

Преобразуем последовательно соединенные сопротивления. Полученная схема изображена на [рис. 1.3](#).

$$Z_{11} = Z_1 + Z_8 = 0,3 + 0,03 = 0,33 \text{ о. е.};$$

$$Z_{12} = Z_{10} + Z_7 = 0,18 + 1,5 = 1,68 \text{ о. е.}$$

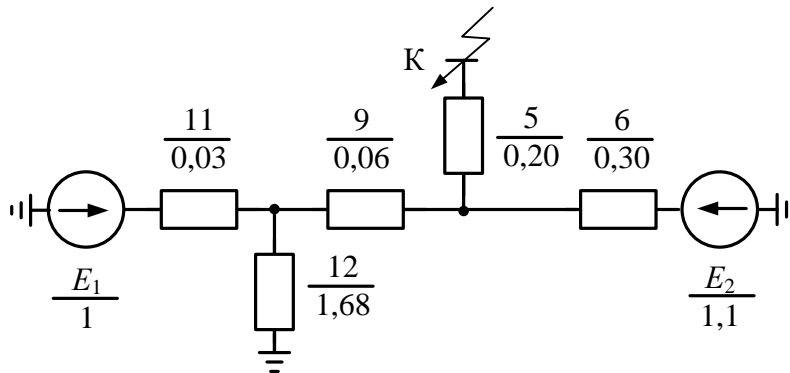


Рис. 1.3. Схема замещения после второго преобразования

Введем фиктивную ЭДС ($E_\phi = 0$) в ветвь с сопротивлением Z_{12} , как изображено на [рис. 1.4](#).

Заменим две параллельных ветви с источниками одним, а после объединим последовательные сопротивления. Полученная схема изображена на [рис. 1.5](#).

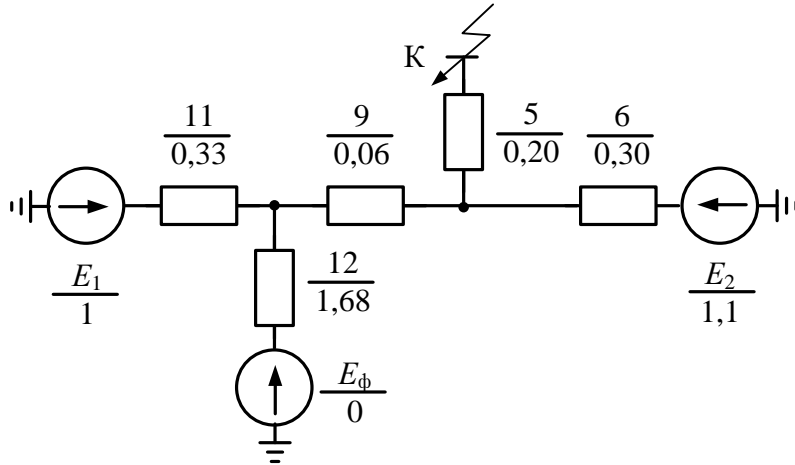


Рис. 1.4. Схема замещения при введении фиктивной ЭДС

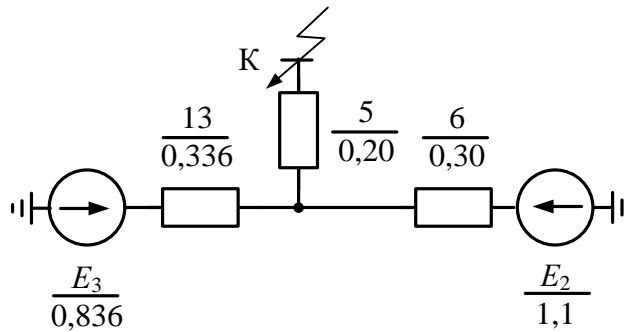


Рис. 1.5. Схема замещения после третьего преобразования

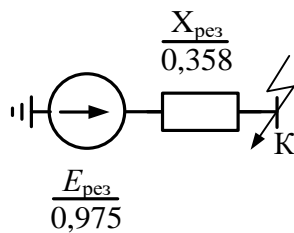


Рис. 1.6. Результирующая схема замещения

$$E_3 = \frac{E_1 Z_{12} + E_\phi Z_{11}}{Z_{12} + Z_{11}} = \frac{1 \cdot 1,68 + 0}{1,68 + 0,33} = 0,836 \text{ о. е.};$$

$$Z_{13} = \frac{Z_{12} Z_{11}}{Z_{12} + Z_{11}} + Z_9 = \frac{1,68 \cdot 0,33}{1,68 + 0,33} + 0,06 = 0,336 \text{ о. е.}$$

Заменим две параллельных ветви с источниками одним, а после объединим последовательные сопротивления. Полученная результирующая схема изображена на [рис. 1.6](#).

$$E_{\text{рез}} = \frac{E_3 Z_6 + E_2 Z_{13}}{Z_6 + Z_{13}} = \frac{0,836 \cdot 0,3 + 1,1 \cdot 0,336}{0,3 + 0,336} = 0,975 \text{ о. е.};$$

$$Z_{\text{рез}} = \frac{Z_6 Z_{13}}{Z_6 + Z_{13}} + Z_5 = \frac{0,336 \cdot 0,3}{0,336 + 0,3} + 0,2 = 0,358 \text{ о. е.}$$

Контрольные вопросы

1. Назовите основные понятия, относящиеся к электроэнергетическим системам.
2. Перечислите виды режимов электрических систем.
3. Дайте определение режима электрической системы.
4. Дайте определение короткого замыкания.
5. Какие виды коротких замыканий вы знаете?
6. Каковы наиболее тяжелые последствия коротких замыканий?
7. Назовите наиболее часто случающиеся виды коротких замыканий.
8. В чем разница между расчетной схемой и схемой замещения ЭЭС?
9. Для какой цели определяются токи короткого замыкания?
10. Назовите основные допущения при расчете токов КЗ выше 1 кВ.
11. В чем отличия в допущениях при расчете тока короткого замыкания в сетях до 1 кВ и выше 1 кВ?
12. В каком случае учитываются активные сопротивления элементов?

ГЛАВА 2. РАСЧЕТ И ПРИВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА КЗ

2.1. Система именованных единиц

Параметры режима (напряжение, ток, мощность и т. п.) и элементов схемы замещения могут быть выражены как в системе именованных, так и в системе относительных единиц, т. е. в долях некоторых значений этих же величин, принятых за единицу измерения.

При расчете в именованных единицах сопротивления всех элементов схемы замещения выражаются в омах, токи – в амперах, ЭДС и напряжения – в вольтах и должны быть приведены к одной ступени напряжения сети, выбранной за основную и называемую базисной (рис. 2.1). В качестве основной ступени обычно выбирают ступень напряжения, где произошло короткое замыкание.

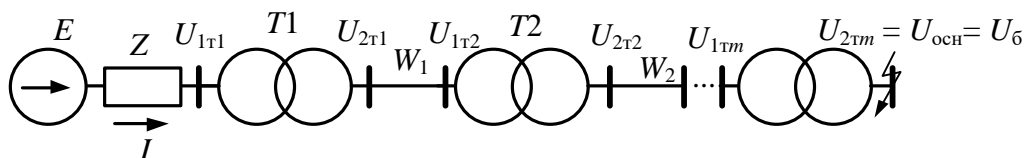


Рис. 2.1. Приведение ЭДС и сопротивлений к одной ступени напряжения

Приведение значений ЭДС – E , напряжений – U , токов – I и сопротивлений – Z к основной (базисной) ступени приводится по следующим соотношениям:

$$\overset{\circ}{E} = E n_1 n_2 \dots n_m ;$$

$$\overset{\circ}{U} = U n_1 n_2 \dots n_m ;$$

$$\overset{\circ}{I} = I \frac{1}{n_1 n_2 \dots n_m} ;$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z(n_1 n_2 \dots n_m)^2,$$

где $\overset{\circ}{E}$ – значение ЭДС, приведенное к основной ступени напряжения сети; n_1, n_2, \dots, n_m – коэффициенты трансформации; $\overset{\circ}{U}$ – значение напряжения, приведенное к основной ступени напряжения сети; $\overset{\circ}{I}$ – значение тока, приведенное к основной ступени напряжения сети; $\overset{\circ}{Z}$ – значение сопротивления, приведенное к основной ступени напряжения сети.

Под коэффициентом трансформации трансформатора понимается отношение линейного напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону базисной ступени напряжения, к напряжению холостого хода обмотки, обращенной в другую сторону ([рис. 2.1](#)):

$$n_i = \frac{U_{2т.і}}{U_{1т.і}},$$

где n_i – коэффициент трансформации i -го трансформатора; $U_{2т.і}$ – напряжение холостого хода обмотки i -го трансформатора, обращенной в сторону основной ступени, $U_{1т.і}$ – напряжение холостого хода обмотки i -го трансформатора, обращенной в сторону элемента с подлежащими приведению параметрами.

При проведении ориентировочных расчетов или отсутствии данных о фактических коэффициентах вместо фактических номинальных напряжений используют средние номинальные напряжения $U_{\text{ср.ном}}$ различных элементов и обмоток трансформаторов, выбираемые по **шкале средних номинальных напряжений** $U_{\text{ср.ном}}$: 1175; 770; 515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23; 0,127 кВ.

При приближенном приведении параметров различных элементов исходной расчетной схемы к основной (базисной) ступени параметры определяются по следующим соотношениям:

$$\overset{\circ}{E} = E \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.}i}}; \quad \overset{\circ}{U} = U \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.}i}}; \quad \overset{\circ}{I} = I \frac{U_{\text{ср.}i}}{U_{\text{ср.осн}}}; \quad \overset{\circ}{Z} = Z \left(\frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.}i}} \right)^2,$$

где $\overset{\circ}{E}$ – значение ЭДС, приведенное к основной ступени напряжения сети; $U_{\text{ср.осн}} = U_6$ – среднее номинальное напряжение основной ступени; $U_{\text{ср.}i}$ – среднее номинальное напряжение ступени, на которой находится элемент с приводимыми параметрами; $\overset{\circ}{U}$ – значение напряжения, приведенное к основной ступени напряжения сети; $\overset{\circ}{I}$ – значение тока, приведенное к основной ступени напряжения сети; $\overset{\circ}{Z}$ – значение сопротивления, приведенное к основной ступени напряжения сети.

2.2. Система относительных единиц

Относительное значение какой-либо величины – это отношение значения этой величины к другому значению одноименной величины, выбранной за единицу. Чтобы выразить параметры элементов схемы замещения в относительных единицах (о. е.), нужно выбрать величины, принимаемые за базисные.

За базисную мощность S_6 целесообразно принимать мощность, кратную 10 МВ·А или часто повторяющуюся в данной схеме номинальную (или кратную ей).

За базисное напряжение U_6 рекомендуется принимать номинальное (или среднее номинальное) значение напряжения ступени, на которой находится рассматриваемый элемент.

Базисный ток I_6 и базисное сопротивление Z_6 определяются по формулам:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}; \quad Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} = \frac{U_6^2}{\sqrt{3}S_6}.$$

В соответствии с выбранными базисными условиями значения отдельных величин в относительных единицах при базисных условиях обозначаются звездочкой под соответствующей буквой и определяются по следующим выражениям:

$$E_{*6} = \frac{E}{U_6}; \quad U_{*6} = \frac{U}{U_6}; \quad I_{*6} = \frac{I}{I_6}; \quad S_{*6} = \frac{S}{S_6};$$

$$Z_{*6} = \frac{Z}{Z_6} = Z \frac{\sqrt{3}I_6}{U_6} = Z \frac{S_6}{U_6^2},$$

где E_{*6} , U_{*6} , I_{*6} , S_{*6} , Z_{*6} – расчетные значения параметров в о. е. при базисных условиях.

Часто параметры элементов заданы в именованных или в относительных единицах при номинальных условиях. При расчетах в относительных единицах также используется точное и приближенное приведение параметров.

Приведение параметров элементов к требуемым расчетным условиям осуществляется по выражениям, представленным в [табл. 2.1](#).

Таблица 2.1

Приведение параметров схемы замещения

Система единиц исходных параметров	Формулы приведения			
	в именованные единицы		в относительные единицы	
	Точное	Приближенное	Точное	Приближенное
Система именованных единиц (E, U, I, Z)	$\overset{\circ}{E} = E n_1 n_2 \dots n_m;$ $\overset{\circ}{U} = U n_1 n_2 \dots n_m;$ $\overset{\circ}{I} = I \frac{1}{n_1 n_2 \dots n_m};$ $\overset{\circ}{Z} = Z (n_1 n_2 \dots n_m)^2$	$\overset{\circ}{E} = E \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.и}}};$ $\overset{\circ}{U} = U \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.и}}};$ $\overset{\circ}{I} = I \frac{U_{\text{ср.и}}}{U_{\text{ср.осн}}};$ $\overset{\circ}{Z} = Z \left(\frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.и}}} \right)^2$	$E_{*6} = \frac{E}{U_{6.i}};$ $U_{*6} = \frac{U}{U_{6.i}};$ $I_{*6} = \frac{I}{I_{6.i}};$ $Z_{*6} = Z \frac{S_6}{U_{6.i}^2},$ <p>где</p> $U_{6.i} = \frac{U_{6.осн}}{n_1 n_2 \dots n_m};$ $I_{6.i} = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_{6.i}}$	$E_{*6} = \frac{E}{U_{\text{ср.и}}};$ $U_{*6} = \frac{U}{U_{\text{ср.и}}};$ $I_{*6} = \frac{I}{I_{6.i}};$ $Z_{*6} = Z \frac{S_6}{U_{\text{ср.и}}^2},$ <p>где</p> $I_{6.i} = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_{\text{ср.и}}}$

Система единиц исходных параметров	Формулы приведения			
	в именованные единицы		в относительные единицы	
	Точное	Приближенное	Точное	Приближенное
Система относительных единиц при номинальных условиях ($E_{* \text{НОМ}}$, $U_{* \text{НОМ}}$, $I_{* \text{НОМ}}$, $Z_{* \text{НОМ}}$)	$\overset{\circ}{E} = E_{* \text{НОМ}} U_{\text{НОМ}} n_1 n_2 \dots n_m;$ $\overset{\circ}{U} = U_{* \text{НОМ}} U_{\text{НОМ}} n_1 n_2 \dots n_m;$ $\overset{\circ}{I} = I_{* \text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} \frac{1}{n_1 n_2 \dots n_m};$ $\overset{\circ}{Z} = Z_{* \text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} (n_1 n_2 \dots n_m)^2;$ $\overset{\circ}{Z} = Z_{* \text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} (n_1 n_2 \dots n_m)^2$	$\overset{\circ}{E} = E_{* \text{НОМ}} U_{\text{ср.осн}};$ $\overset{\circ}{U} = U_{* \text{НОМ}} U_{\text{ср.осн}};$ $\overset{\circ}{I} = I_{* \text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{ср.}i}}{U_{\text{ср.осн}}};$ $\overset{\circ}{Z} = Z_{* \text{НОМ}} \frac{U_{\text{ср.осн}}^2}{S_{\text{НОМ}}};$ $\overset{\circ}{Z} = Z_{* \text{НОМ}} \frac{U_{\text{ср.осн}}}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} \frac{U_{\text{ср.осн}}}{U_{\text{ср.}i}}$	$E_{* \text{б}} = \frac{E_{* \text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б.}i}};$ $U_{* \text{б}} = \frac{U_{* \text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{б.}i}};$ $I_{* \text{б}} = \frac{I_{* \text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{б.}i}};$ $Z_{* \text{б}} = Z_{* \text{НОМ}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{U_{\text{б.}i}^2}$	$E_{* \text{б}} = E_{* \text{НОМ}};$ $U_{* \text{б}} = U_{* \text{НОМ}};$ $I_{* \text{б}} = I_{* \text{НОМ}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}};$ $Z_{* \text{б}} = Z_{* \text{НОМ}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}$
<p>*Примечание: E, U, I, Z – исходные значения параметров элементов схемы замещения; $\overset{\circ}{E}, \overset{\circ}{U}, \overset{\circ}{I}, \overset{\circ}{Z}$ – значения параметров элементов схемы замещения, приведенные к основной ступени напряжения сети; $E_{* \text{НОМ}}, U_{* \text{НОМ}}, I_{* \text{НОМ}}, S_{* \text{НОМ}}, Z_{* \text{НОМ}}$ – значения параметров в о. е. при номинальных условиях; $E_{* \text{б}}, U_{* \text{б}}, I_{* \text{б}}, S_{* \text{б}}, Z_{* \text{б}}$ – расчетные значения параметров в о. е. при базисных условиях; n_1, n_2, \dots, n_m – коэффициенты трансформации m трансформаторов, включенных каскадно между основной и i-й ступенями напряжения; $U_{\text{б.}i} = \frac{U_{\text{б.осн}}}{n_1 n_2 \dots n_m}$ – базовое напряжение i-й ступени напряжения; $I_{\text{б.}i} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} U_{\text{б.}i}}$ – базовый ток для ветви с i-й ступени напряжения</p>				

2.3. Расчет параметров элементов схем замещения

Для расчета параметров отдельных элементов схемы замещения необходимо знать справочные данные, указанные в [табл. 2.2](#).

Таблица 2.2

Основные величины элементов ЭЭС

Элемент сети	Справочные данные
Синхронная машина (генератор, компенсатор, двигатель)	$S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность, МВ·А; $\cos \varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ; $X''_{*d}, X'_{*d}, X_{*d}$ – относительные сверхпереходное, переходное и синхронное сопротивления по продольной оси, о. е.; $X''_{*q}, X'_{*q}, X_{*q}$ – относительные сверхпереходное, переходное и синхронное сопротивления по поперечной оси, о. е.; η – КПД (для двигателей), о. е.
Электрическая система	$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ; $I_{\text{к.с}}$ – ток короткого замыкания на зажимах внешней энергосистемы [кА]; $S_{\text{к.с}} = \sqrt{3}U_{\text{ном}}I_{\text{к.с}}$ – полная мощность тока короткого замыкания на зажимах внешней энергосистемы, МВ·А
Двухобмоточный трансформатор	$S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность, МВ·А; $U_{\text{ном.В}}, U_{\text{ном.Н}}$ – номинальные напряжения обмоток ВН и НН, кВ; $u_{\text{к}\%}$ – напряжение короткого замыкания, %
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность, МВ·А; $U_{\text{ном.В}}, U_{\text{ном.С}}, U_{\text{ном.Н}}$ – номинальные напряжения обмоток ВН, СН и НН, кВ; $u_{\text{к.ВН}\%}, u_{\text{к.ВС}\%}, u_{\text{к.СН}\%}$ – напряжения короткого замыкания между соответствующими обмотками, %
Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения	$S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность, МВ·А; $U_{\text{ном.В}}, U_{\text{ном.Н1}} = U_{\text{ном.Н2}}$ – номинальные напряжения обмоток ВН и НН, кВ; $u_{\text{к.ВН}\%}, u_{\text{к.Н1Н2}\%}$ – напряжения короткого замыкания между соответствующими обмотками, %; $K_{\text{р}} = \frac{u_{\text{к.Н1Н2}}}{u_{\text{к.ВН}}}$ – коэффициент расщепления. Обычно принимают: у трехфазных $K_{\text{р}} = 3,5$, у однофазных $K_{\text{р}} = 4$

Элемент сети	Справочные данные
Цепь ЛЭП	$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ; $x_{\text{уд}}$ – удельное индуктивное сопротивление одной цепи, Ом/км; $r_{\text{уд}}$ – удельное активное сопротивление одной цепи, Ом/км; l – длина линии, км
Асинхронный двигатель	$P_{\text{ном}}$ – активная номинальная мощность, МВт; $\cos \varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ; $s_{\text{ном}}$ – номинальное скольжение; $I_{* \text{пуск}}$ – кратность пускового тока, о. е.; $M_{* \text{пуск}}$ – кратность пускового момента, о. е.; η – КПД, о. е.
Реактор	$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток, кА; $x_{LR\%}$ – номинальное индуктивное сопротивление, %, или x_{LR} – номинальное индуктивное сопротивление, Ом
Сдвоенный реактор	то же, что и у реактора $K_{\text{св}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ – коэффициент связи, учитывающий взаимную индукцию M между ветвями реактора, $K_{\text{св}} = 0,4-0,6$
Обобщенная нагрузка	$S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность, МВ·А; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ; $X_{* \text{нагр}}$ – относительное индуктивное сопротивление, о. е. $X_{* \text{нагр}} = 0,35$ о. е. – для начального момента КЗ ($t = 0$); $X_{* \text{нагр}} = 1,2$ о. е. – для установившегося режима КЗ ($t \rightarrow \infty$)

Сопротивления элементов схемы замещения при номинальных условиях рассчитываются исходя из выражений, представленных в [табл. 2.3](#).

Таблица 2.3

Расчетные выражения для определения сопротивлений

Элемент сети	Расчетная формула	
	в о. е.	в Ом
Синхронная машина (генератор, компенсатор, двигатель)	$X_{* \text{ном}} = X_{* d \text{ном}}$	$\overset{\circ}{X} = X_{* d \text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$

Элемент сети	Расчетная формула	
	в о. е.	в Ом
Электрическая система	$X_{* \text{ в}}^{\circ} = \frac{U_{\text{НОМ.с}}}{\sqrt{3}I_{\text{к.с}}} \frac{\sqrt{3}I_{\text{б}}}{U_{\text{НОМ.с}}} =$ $= \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{к.с}}} = \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{к.с}}}$	$\dot{X} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}I_{\text{к.с}}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}I_{\text{к.с}}};$ $\dot{X} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{к.с}}}$
Двухобмоточный трансформатор	$X_{* \text{ НОМ}} = \frac{u_{\text{к.}\%}}{100}$	$\dot{X} = \frac{u_{\text{к.}\%}}{100} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$X_{* \text{ НОМ.В}} = \frac{u_{\text{к.В}\%}}{100}$ $X_{* \text{ НОМ.С}} = \frac{u_{\text{к.С}\%}}{100}$ $X_{* \text{ НОМ.Н}} = \frac{u_{\text{к.Н}\%}}{100}$	$\dot{X}_{\text{В}} = \frac{u_{\text{к.В}\%}}{100} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ $\dot{X}_{\text{С}} = \frac{u_{\text{к.С}\%}}{100} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ $\dot{X}_{\text{Н}} = \frac{u_{\text{к.Н}\%}}{100} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$
	$u_{\text{к.В}\%} = 0,5(u_{\text{к.ВС}\%} + u_{\text{к.ВН}\%} - u_{\text{к.СН}\%})$ $u_{\text{к.С}\%} = 0,5(u_{\text{к.ВС}\%} + u_{\text{к.СН}\%} - u_{\text{к.ВН}\%})$ $u_{\text{к.Н}\%} = 0,5(u_{\text{к.ВН}\%} + u_{\text{к.СН}\%} - u_{\text{к.ВС}\%})$	
Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения	$X_{* \text{ НОМ.В}} = \frac{(1 - 0,25K_{\text{п}})u_{\text{к.ВН}\%}}{100};$ $X_{* \text{ НОМ.Н1}} = X_{* \text{ НОМ.Н2}} = \frac{0,5K_{\text{п}}u_{\text{к.ВН}\%}}{100}$	$\dot{X}_{\text{В}} = \frac{(1 - 0,25K_{\text{п}})u_{\text{к.ВН}\%}}{100} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}};$ $\dot{X}_{\text{Н1}} = \dot{X}_{\text{Н2}} = \frac{0,5K_{\text{п}}u_{\text{к.ВН}\%}}{100} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$
Цепь ЛЭП	$X_{* \text{ в}}^{\circ} = x_{\text{уд}} l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{НОМ}}^2};$ $R_{* \text{ в}}^{\circ} = r_{\text{уд}} l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{НОМ}}^2}$	$\dot{X} = x_{\text{уд}} l;$ $\dot{R} = r_{\text{уд}} l$
Асинхронный двигатель	$X_{* \text{ НОМ}} \approx \frac{1}{I_{* \text{ пуск}}}$	$\dot{X} = X_{* \text{ НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$
Реактор	$X_{* \text{ НОМ.LR}} = \frac{x_{\text{LR}\%}}{100};$ $X_{* \text{ НОМ.LR}} = x_{\text{LR}} \frac{\sqrt{3}I_{\text{LR.НОМ}}}{U_{\text{LR.НОМ}}}$	$\dot{X} = \frac{x_{\text{LR}\%}}{100} \frac{U_{\text{LR.НОМ}}}{\sqrt{3}I_{\text{LR.НОМ}}};$ $\dot{X} = x_{\text{LR}}$
Сдвоенный реактор	$X_{* \text{ НОМ.С}} = -K_{\text{св}} \frac{x_{\text{LR}\%}}{100};$ $X_{* \text{ НОМ.Н1}} = X_{* \text{ НОМ.Н2}} = (1 + K_{\text{св}}) \frac{x_{\text{LR}\%}}{100}$	$\dot{X}_{\text{С}} = -K_{\text{св}} x_{\text{LR}};$ $\dot{X}_{\text{Н1}} = \dot{X}_{\text{Н2}} = (1 + K_{\text{св}}) x_{\text{LR}}$
Обобщенная нагрузка	$X_{* \text{ НОМ}} = X_{* \text{ нагр}}$	$\dot{X} = X_{* \text{ нагр}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$

Для приведения полученных сопротивлений к базисным условиям или

к основной ступени напряжения необходимо воспользоваться выражениями из [табл. 2.1](#).

В практических расчетах сверхпереходных токов короткого замыкания ЭДС источников питания могут быть внесены в схему замещения своими усредненными значениями, которые представлены в [табл. 2.4](#). Там же указаны средние относительные значения сопротивлений элементов, которыми можно воспользоваться, если не представляется возможным рассчитать сопротивление элемента, используя исходные данные.

Таблица 2.4

Средние значения относительных значений сопротивлений и ЭДС

Наименование	X''_{*d}	E''_*
Электрическая система	зависит от мощности	1,00
Турбогенератор до 100 МВт	0,125	1,08
Турбогенератор 101–500 МВт	0,200	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,200	1,13
Гидрогенератор без демпферных обмоток	0,270	1,18
Синхронный компенсатор	0,200	1,20
Синхронный двигатель	0,200	1,10
Асинхронный двигатель	0,200	0,90
Обобщенная нагрузка	0,350	0,85

2.4. Расчет начального значения тока КЗ

Расчет начального (сверхпереходного) значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ определяется по следующему алгоритму:

- 1) составляется расчетная схема замещения;
- 2) рассчитываются параметры элементов схемы замещения. На схеме остаются только те ветви, по которым протекают токи КЗ;
- 3) с помощью преобразований расчетная схема приводится к простейшему виду, и находятся результирующие ЭДС и сопротивление;
- 4) начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ

при расчете в именованных единицах:

$$I'' = \frac{E_{\phi, \text{рез}}}{X_{\text{рез}}},$$

где I'' – сверхпереходное значение тока трехфазного КЗ [кА]; $E_{\phi, \text{рез}}$ – фазное значение результирующей ЭДС [кВ]; $X_{\text{рез}}$ – результирующее сопротивление [Ом].

При расчете в относительных единицах

$$I'' = \frac{E_{* \text{рез}}}{X_{* \text{рез}}} I_6,$$

где $E_{* \text{рез}}$ – результирующая ЭДС; $X_{* \text{рез}}$ – результирующее сопротивление;

$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}$ – базисный ток.

Пример решения задачи

Задача

Рассчитать начальное значение тока трехфазного КЗ системы ([рис. 2.2](#)) в точке К. Расчет произвести в относительных единицах, используя точное и приближенное приведение параметров, выбрав базисную мощность $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

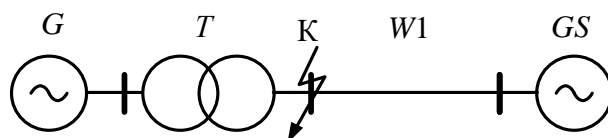


Рис. 2.2. Исходная расчетная схема

Исходные данные

Параметры генератора G :

$$P_{Г.НОМ} = 30 \text{ МВт}; \quad \cos(\varphi) = 0,8; \quad U_{Г.НОМ} = 10 \text{ кВ}; \quad X''_{* d.НОМ} = 0,15 \text{ о. е.};$$

$$E''_{* Г.НОМ} = 1,1 \text{ о. е.}$$

Параметры трансформатора T :

$$S_{Т.НОМ} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad u_k = 10 \%; \quad U_{Н.Н} = 10 \text{ кВ}; \quad U_{В.Н} = 115 \text{ кВ}.$$

Параметры линии $W1$:

$$x_{уд} = 0,4 \text{ Ом/км}; \quad l = 50 \text{ км}.$$

Параметры энергосистемы GS :

$$S_k = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad U_{НОМ} = 110 \text{ кВ}; \quad E''_{* С.НОМ} = 1 \text{ о. е.}$$

Решение

Вначале произведем расчет, используя *точное приведение параметров*.

За базисное напряжение примем напряжение основной ступени. В качестве основной примем ступень, на которой произошло КЗ: $U_{61} = 110 \text{ кВ}$.

Напряжения на другой ступени найдем через коэффициент трансформации:

$$U_{62} = U_{61} \frac{U_{Н.Н}}{U_{В.Н}} = 110 \cdot \frac{10}{115} = 9,57 \text{ кВ}.$$

Найдем базисный ток основной ступени:

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{61}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,525 \text{ кА}.$$

Рассчитаем ЭДС генератора и системы:

$$E''_{* G} = E''_{* Г.НОМ} \left(\frac{U_{Н.Н}}{U_{62}} \right) = 1,1 \left(\frac{10}{9,57} \right) = 1,15 \text{ о. е.};$$

$$E''_{*c} = E''_{*c.\text{НОМ}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{61}} \right) = 1 \cdot \left(\frac{110}{110} \right) = 1 \text{ о. е.}$$

Рассчитаем сопротивления в о. е.:

$$X_1 = X_G = X''_{*d} \frac{S_6}{S_{\Gamma.\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{62}} \right)^2 = X''_{*d} \frac{S_6 \cos(\varphi)}{P_{\Gamma.\text{НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{62}} \right)^2;$$

$$X_1 = 0,15 \frac{100 \cdot 0,8}{30} \left(\frac{10}{9,57} \right)^2 = 0,437 \text{ о. е.};$$

$$X_2 = X_T = \frac{u_k}{100} \frac{S_6}{S_{\text{T.НОМ}}} \left(\frac{U_{\text{Н.В.}}}{U_{61}} \right)^2 = \frac{10}{100} \frac{100}{40} \left(\frac{115}{110} \right)^2 = 0,273 \text{ о. е.};$$

$$X_3 = X_{W1} = x_{\text{уд}} l \frac{S_6}{U_{61}^2} = 0,4 \cdot 50 \frac{100}{110^2} = 0,165 \text{ о. е.};$$

$$X_4 = X_{GS} = \frac{S_6}{S_k} \left(\frac{U_{\text{Н.В.}}}{U_{61}} \right)^2 = \frac{100}{1000} \left(\frac{115}{110} \right)^2 = 0,109 \text{ о. е.}$$

Соединив схемы замещения отдельных элементов исходной схемы между собой в той же последовательности, получим схему замещения, изображенную на [рис. 2.3](#). Сопротивления элементов представлены в виде дроби: в числителе – порядковый номер элемента, в знаменателе – значение его сопротивления в относительных единицах.

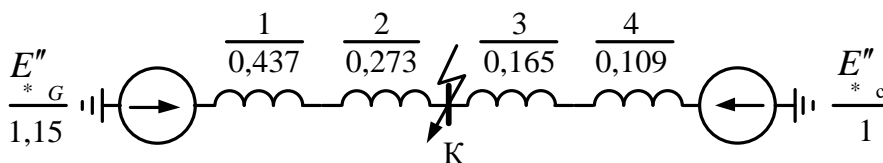


Рис. 2.3. Схема замещения

Преобразуем последовательно соединенные сопротивления ([рис. 2.4](#)):

$$X_5 = X_1 + X_2 = 0,437 + 0,273 = 0,71 \text{ о. е.};$$

$$X_6 = X_3 + X_4 = 0,165 + 0,109 = 0,274 \text{ о. е.}$$

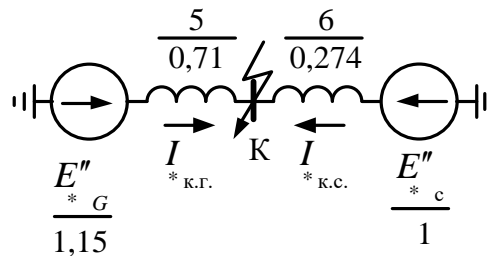


Рис. 2.4. Схема замещения после преобразования

Разрежем узел трехфазного КЗ и определим токи в каждой ветви:

$$I_{к.г} = \frac{E''_{*G}}{X_5} I_{61} = \frac{1,15}{0,71} \cdot 0,525 = 0,85 \text{ кА};$$

$$I_{к.с} = \frac{E''_{*c}}{X_6} I_{61} = \frac{1}{0,274} \cdot 0,525 = 1,916 \text{ кА}.$$

Ток в месте КЗ определяется как сумма токов в ветви генератора и в ветви системы:

$$I_k = I_{к.г} + I_{к.с} = 0,85 + 1,916 = 2,77 \text{ кА}.$$

Рассчитаем параметры схемы замещения, используя *приближенное приведение*.

При приближенном приведении базисные напряжения на каждой ступени будут равны их среднономинальным напряжениям:

$$U_{\delta 1} = U_{\text{ср.ном.1}} = 115 \text{ кВ}; U_{\delta 2} = U_{\text{ср.ном.2}} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Найдем базисный ток:

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном.1}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,502 \text{ кА}.$$

Расчет сопротивлений в о. е. относительно выбранных базовых условий выполним по формулам согласно [табл. 2.1](#) и [2.3](#).

$$X_1 = X_G = X_{*d}'' \frac{S_{\delta}}{S_{\Gamma.\text{ном}}} = X_{*d}'' \frac{S_{\delta} \cos(\varphi)}{P_{\Gamma.\text{ном}}} = 0,15 \frac{100 \cdot 0,8}{30} = 0,4 \text{ о. е.};$$

$$X_2 = X_T = \frac{u_k}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{T.ном}}} = \frac{10}{100} \frac{100}{40} = 0,25 \text{ о. е.};$$

$$X_3 = X_{W1} = x_{\text{уд}} l \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср.ном.1}}^2} = 0,4 \cdot 50 \frac{100}{115^2} = 0,151 \text{ о. е.};$$

$$X_4 = X_{GS} = \frac{S_{\delta}}{S_k} = \frac{100}{1000} = 0,1 \text{ о. е.}$$

Соединив схемы замещения отдельных элементов исходной схемы между собой в той же последовательности, получим схему замещения, изображенную на [рис. 2.5](#). Сопротивления элементов представлены в виде дроби: в числителе – порядковый номер элемента, в знаменателе – значение его сопротивления в относительных единицах.

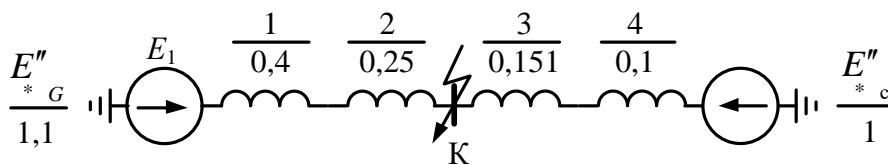


Рис. 2.5. Схема замещения

Преобразуя последовательно соединенные сопротивления, получим схему на [рис. 2.6](#).

$$X_5 = X_1 + X_2 = 0,4 + 0,25 = 0,65 \text{ о. е.};$$

$$X_6 = X_3 + X_4 = 0,151 + 0,1 = 0,251 \text{ о. е.}$$

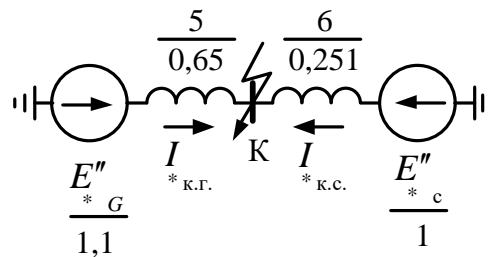


Рис. 2.6. Схема замещения после преобразования

Разрежем узел трехфазного КЗ и определим токи в каждой ветви:

$$I_{\text{к.г.}} = \frac{E''_{*Г}}{X_5} I_{61} = \frac{1,1}{0,65} \cdot 0,502 = 0,85 \text{ кА};$$

$$I_{\text{к.с.}} = \frac{E''_{*С}}{X_6} I_{61} = \frac{1}{0,251} \cdot 0,502 = 2 \text{ кА}.$$

Ток в месте КЗ определяется как сумма токов в ветви генератора и в ветви системы:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{к.г.}} + I_{\text{к.с.}} = 0,85 + 2 = 2,85 \text{ кА}.$$

Разница в расчетах составляет: $\frac{2,85 - 2,77}{2,77} \cdot 100 \% = 2,89 \%.$

Контрольные вопросы

1. Дайте определение относительного значения величины.
2. Зачем при расчете в именованных единицах параметры всех элементов схемы замещения приводят к одной ступени напряжений?

3. Как выбирают основную (базисную) ступень напряжения?
4. В чем разница между точным и приближенным приведением параметров схемы замещения?
5. Как приводятся напряжения и ЭДС к основной ступени?
6. Как приводятся токи к основной ступени?
7. Как сопротивления приводятся к одной ступени напряжения при расчете токов короткого замыкания в именованных единицах?
8. Влияет ли на результат расчета тока короткого замыкания выбор расчета в относительных единицах или в именованных единицах?
9. Что понимается под коэффициентом трансформации при приведении параметров схемы замещения?
10. Какие базисные электрические величины выбираются произвольно при расчете в относительных единицах?
11. По какой формуле вычисляется базисный ток?
12. Как определяется базисное сопротивление?
13. Как осуществляется перевод сопротивлений, выраженных в именованных единицах, в относительные единицы?
14. Почему нельзя складывать сопротивления последовательно соединенных элементов электрической сети, выраженных в относительных единицах, приведенных к номинальным условиям этих элементов?
15. Дайте определение коэффициента расщепления двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения.
16. Как определяется сопротивление трансформатора в именованных единицах?
17. Как определяются сопротивления сдвоенного реактора в именованных единицах?
18. Как находится сопротивление асинхронного двигателя в именованных единицах?

ГЛАВА 3. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КЗ

3.1. Электромагнитные переходные процессы в простейшей цепи при питании ее от источника бесконечной мощности

Простая трехфазная цепь – это симметричная трехфазная цепь с сосредоточенными активными и индуктивными сопротивлениями при отсутствии в ней трансформаторных связей (рис. 3.1).

Источник бесконечной мощности – источник, собственное сопротивление которого равно нулю, а его напряжение, изменяясь с постоянной частотой, имеет неизменную амплитуду:

$$u = U_m \sin(\omega t + \alpha),$$

где U_m – амплитуда напряжения; ω – угловая частота поля; α – фаза включения, отражает момент возникновения КЗ.

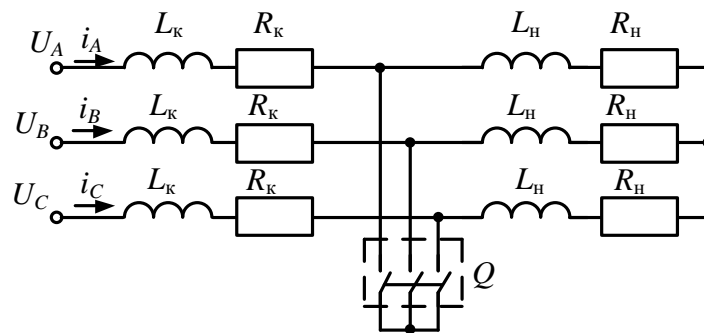


Рис. 3.1. Простейшая цепь

После включения выключателя Q цепь распадается на два участка. В *правой части* цепи после КЗ энергия, запасенная в индуктивности L_n , будет переходить в тепло, поглощаясь сопротивлением R_n , при этом в дифференциальном уравнении равновесие для каждой фазы участка можно записать так:

$$iR_{\text{H}} + L_{\text{H}} \frac{di}{dt} = 0.$$

Его можно решить относительно тока:

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{T_{a.\text{H}}}},$$

где $T_{a.\text{H}}$ – постоянная затухания, с.

Она определяется исходя из сопротивления:

$$T_{a.\text{H}} = \frac{L_{\text{H}}}{R_{\text{H}}} = \frac{X_{\text{H}}}{\omega R_{\text{H}}}.$$

В *левом* участке схемы будет продолжаться переходный процесс за счет имеющегося питания со стороны источника, т. е. в этом участке будет существовать принужденный ток. Он будет сдвинут на некоторый угол относительно предшествовавшего тока.

Дифференциальное уравнение относительно фазы A :

$$U_A = R_{\text{к}} i_A + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt}.$$

Учитывая, что $i_B + i_C = -i_A$, можно записать:

$$U_A = R_{\text{к}} i_A + L \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_A}{dt} = R_{\text{к}} i_A + (L - M) \frac{di_A}{dt} = R_{\text{к}} i_A + L_{\text{к}} \frac{di_A}{dt},$$

где $L_{\text{к}} = (L - M)$ – результирующая индуктивность фазы с учетом влияния других фаз.

В общем виде для любой фазы:

$$U = R_{\kappa} i + L_{\kappa} \frac{di}{dt}.$$

Решение этого уравнения:

$$i_{\kappa}(t) = \frac{U_m}{Z_{\kappa}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\kappa}) + i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (3.1)$$

где Z_{κ} – полное сопротивление цепи КЗ; φ_{κ} – угол сдвига тока в цепи КЗ относительно напряжения источника той же фазы; T_a – постоянная времени цепи КЗ:

$$T_a = \frac{L_{\kappa}}{R_{\kappa}} = \frac{X_{\kappa}}{\omega R_{\kappa}}.$$

В уравнении (3.1) ток $i_{\kappa}(t)$ – это сумма двух слагаемых:

- 1) принужденного тока, или периодической слагающей тока $i_{\text{п}}(t)$,
- 2) свободной составляющей, или аperiodической составляющей тока $i_{\text{а}}(t)$.

$$i_{\kappa}(t) = i_{\text{п}}(t) + i_{\text{а}}(t)$$

Начальное значение тока КЗ (при $t = 0$)

$$i_{\kappa(0)} = i_{\text{п}(0)} + i_{\text{а}(0)}, \quad (3.2)$$

где $i_{\kappa(0)}$ – начальное значение тока КЗ, равное току предшествующего режима в данной фазе к моменту $t = 0$; $i_{\text{п}(0)}$ – начальное значение периодической со-

ставляющей тока КЗ; $i_{a(0)}$ – начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ.

Из (3.1) и (3.2) выразим начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ с учетом невозможности изменения тока скачком в цепи, содержащей индуктивность:

$$i_{a(0)} = i_{k(0)} - i_{п(0)} = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi_{(0)}) - \frac{U_m}{Z_k} \sin(\alpha - \varphi_k);$$

$$i_{a(0)} = I_{m(0)} \sin(\alpha - \varphi_{(0)}) - I_{m.k} \sin(\alpha - \varphi_k),$$

где Z – полное сопротивление цепи до возникновения КЗ; $\varphi_{(0)}$ – угол φ цепи до возникновения КЗ; $I_{m(0)}$ – амплитуда тока до возникновения КЗ; $I_{m.k}$ (или $I_{п.m}$) – амплитуда периодической составляющей тока КЗ.

На векторной диаграмме (рис. 3.2) $i_{a(0)}$ является проекцией $(I_{m(0)} - I_{m.k})$ на ось времени. Для фазы A это отрезок $a'a$, для фазы B – отрезок $b'b$, для фазы C – $c'c$.

На векторной диаграмме (рис. 3.2) t – неподвижная ось времени; $U_A, U_B, U_C, I_{m(0)A}, I_{m(0)B}, I_{m(0)C}$ – характеризуют предшествующий режим; $\varphi_{(0)}$ – угол сдвига между U и I до возникновения КЗ; α – момент возникновения КЗ; $I_{m.k.A}, I_{m.k.B}, I_{m.k.C}$ – характеризуют установившийся после КЗ режим в цепи; φ_k – угол сдвига тока в цепи при КЗ.

В зависимости от фазы включения КЗ начальное значение $i_{a(0)}$ может меняться. Его значение будет максимальным, если в момент включения КЗ разность векторов $(I_{m(0)} - I_{m.k})$ будет параллельна оси t , т. е.:

- 1) при $\alpha = 0$ и отсутствии предшествовавшего тока в цепи;

2) при $X_k \gg R_k$ имеем $\varphi_k \approx 90^\circ$, в этом случае будет возникать наибольший апериодический ток и будет достигнут максимум мгновенного значения тока КЗ ([рис. 3.3](#)).

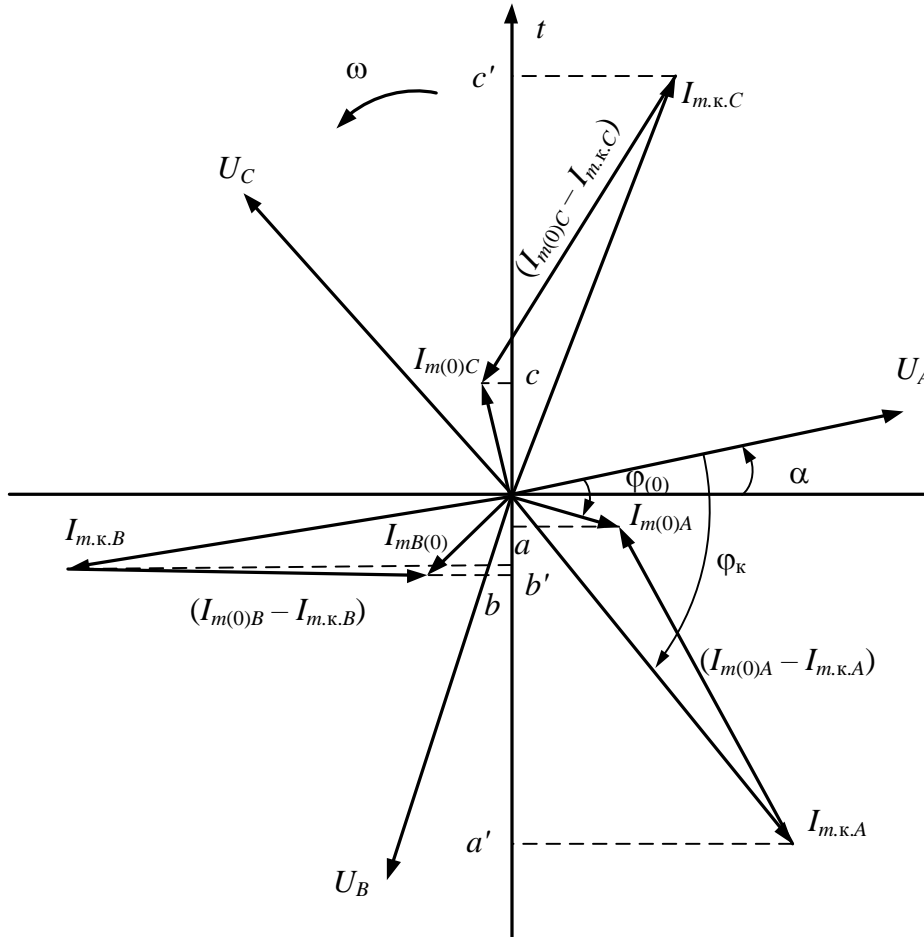


Рис. 3.2. Векторная диаграмма

Максимальное мгновенное значение тока КЗ называется *ударным током* i_y . Считают, что он наступает примерно через полпериода $\left(\frac{T}{2}\right)$. При частоте $f = 50$ Гц половина периода составит 0,01 с с момента возникновения КЗ.

С учетом вышеуказанных условий, т. е. $\varphi_k \approx 90^\circ$ и $\alpha = 0$:

$$i_y = I_{п.м} + I_{п.м} e^{-\frac{0,01}{T_a}} = K_y I_{п.м},$$

где $K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$ – ударный коэффициент, показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагающей тока КЗ.

$$1 < K_y < 2; \quad K_y = 1 \text{ при } T_a = 0 \quad (L_k = 0); \quad K_y = 2 \text{ при } T_a = \infty \quad (R_k = 0).$$

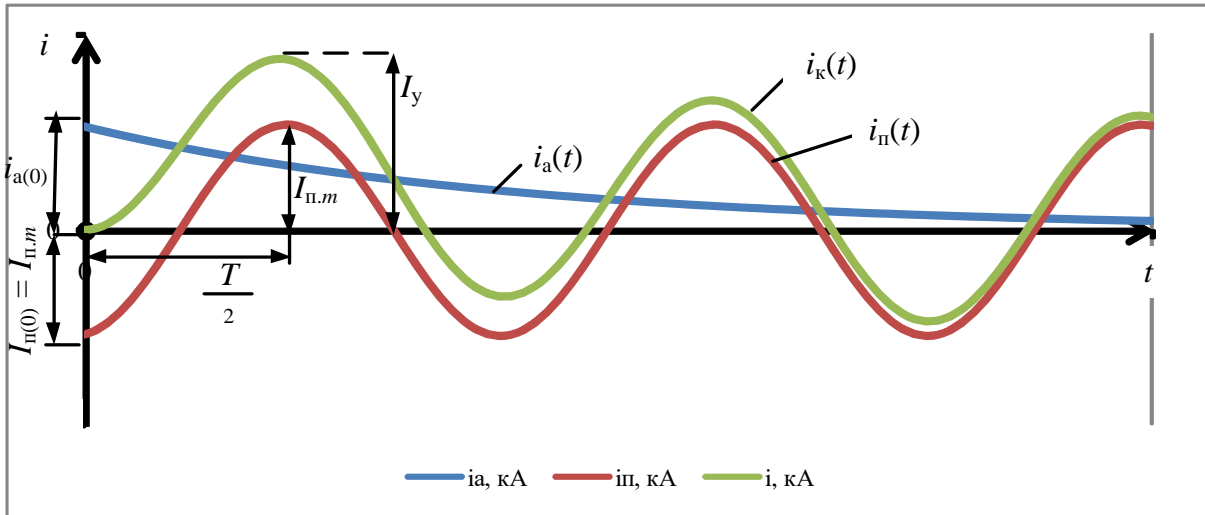


Рис. 3.3. Изменение полного тока и его составляющих

Чем меньше T_a , тем быстрее затухает i_a , следовательно, тем меньше K_y . Влияние i_a сказывается лишь в начальный момент переходного процесса, так как в сетях и установках ВН i_a затухает через 0,1–0,3 с, а в установках НН она практически незаметна.

Действующее значение полного тока в произвольный момент времени (среднеквадратичное значение тока за один период, в центре которого находится рассматриваемый момент времени):

$$I_{к.т} = \sqrt{I_{п.т}^2 + i_{a.т}^2},$$

где $I_{п.т} = \frac{I_{п.м}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение периодической слагающей тока за один период; $I_{п.м}$ – амплитуда огибающей периодической слагающей тока в момент

времени t (в общем случае $I_{п.м} \neq \text{const}$); $i_{a,t} \approx i_a(t)$ – действующее значение аperiodической составляющей за один период; $i_a(t)$ – мгновенное значение в момент, находящийся на середине этого периода.

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ (I_y) имеет место в первый период переходного процесса при условии, когда $i_{a(0)} = I_{п.м}$:

$$I_y = \sqrt{I_{п.т}^2 + (I_{п.т} (K_y - 1) \sqrt{2})^2} = I_{п.т} \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2}.$$

Определение T_a в сложной разветвленной цепи может быть различным в зависимости от вида и назначения расчета:

1. Точное определение: нахождение $i_{своб}$ в любой ветви достигается применением преобразований Лапласа, т. е. с использованием операторного метода. Такой общий и строгий путь решения даже для небольшой схемы требует большой вычислительной работы (достаточно вспомнить, что каждая параллельная ветвь с R и L увеличивает на один порядок степень характеристического уравнения). Поэтому для практических расчетов используют приближенное определение.

2. Приближенное определение:

$$i_{a,t} = i_{a(0)} e^{-\frac{t}{T_{a,э}}},$$

где $T_{a,э} = \frac{X_\Sigma}{\omega R_\Sigma}$ – эквивалентная постоянная времени; X_Σ , R_Σ – суммарные реактивное и активное сопротивления схемы.

3. Грубое определение T_a : при более грубых расчетах не прибегают к подсчету $T_{a,э}$, а определяют ее в соответствии с K_y согласно справочным

данным. Например, $K_y \geq 1,8$ соответствует $T_a = 0,045$ с, которая принимается одинаковой для всех ветвей схемы.

3.2. КЗ в цепи, питающейся от генератора ограниченной мощности

Рассмотрим КЗ на выводах генератора, то есть в этом случае сопротивление цепи КЗ равно нулю или одного порядка с X_r ([рис. 3.4](#)).

При малой электрической удаленности места повреждения от источника существенное влияние на переходной процесс оказывает автоматическая регулировка возбуждения (АРВ) генератора.

Генератор с отключенной АРВ. В такой машине ток возбуждения i_f остается постоянным и обеспечивает неизменный магнитный поток возбуждения $\Phi_f = \text{const}$.

Особенность данного случая: параметры генератора и их изменение существенно влияют на ход процесса КЗ.

Кривая изменения полного тока КЗ и его отдельных составляющих изображены на [рис. 3.5](#). При этом момент возникновения КЗ соответствует случаю, когда апериодическая составляющая тока и полный ток достигают максимального значения.

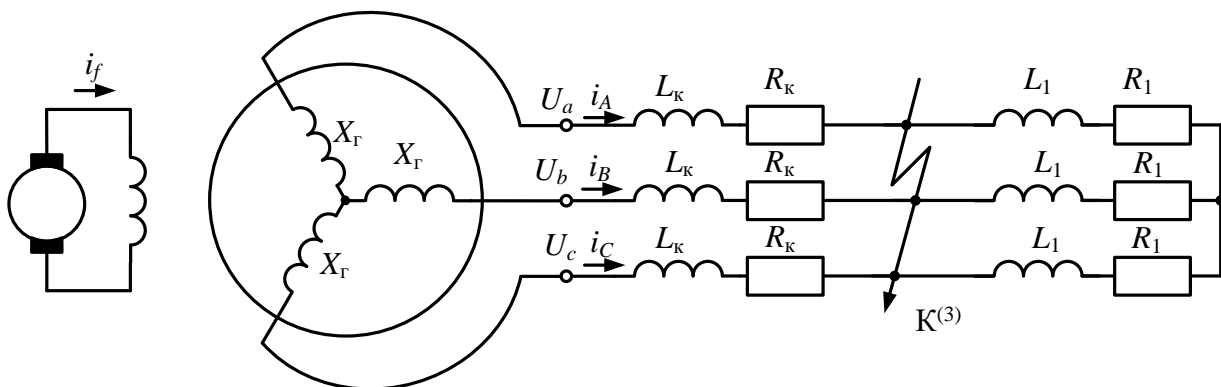


Рис. 3.4. Трехфазная симметричная цепь, питаемая от СГ

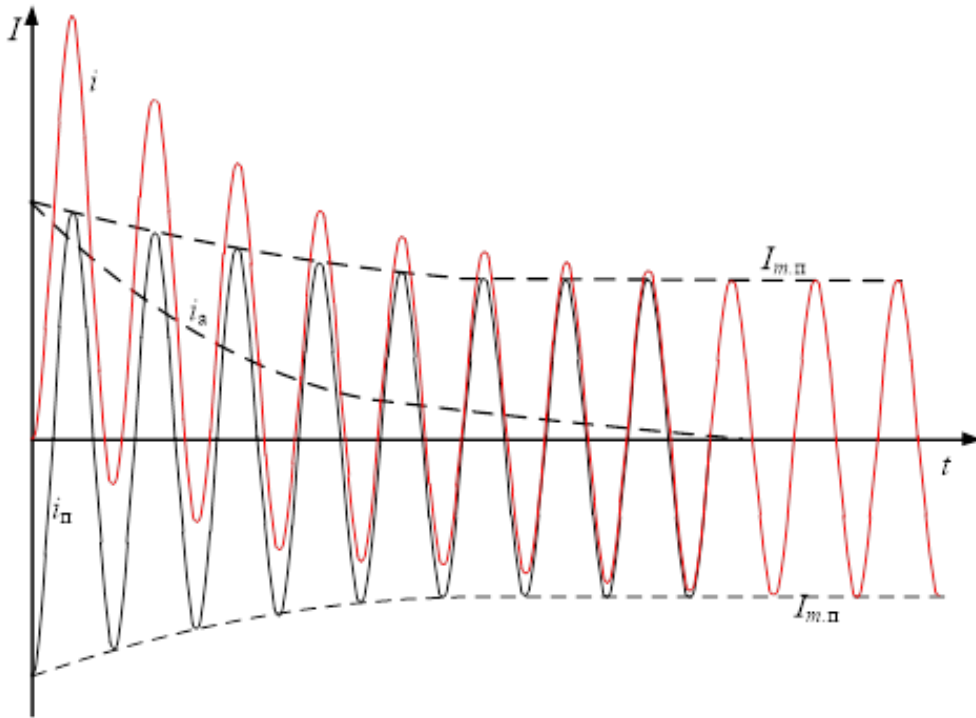


Рис. 3.5. Изменение полного тока КЗ и его составляющих

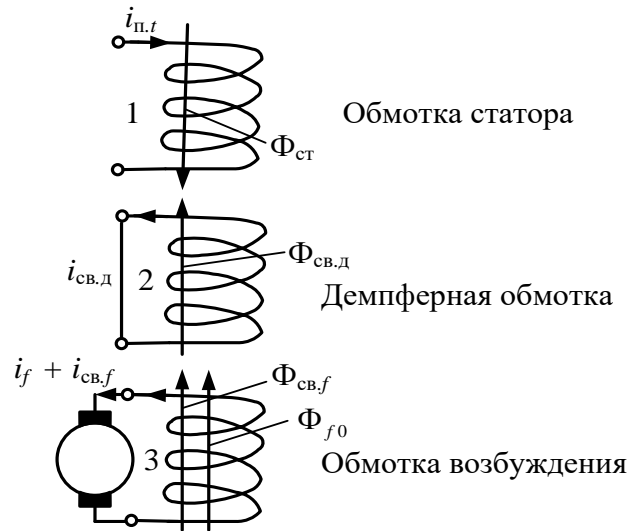
Проведем анализ факторов, влияющих на величину и характер изменения отдельных составляющих полного тока КЗ во времени.

На холостом ходу генератор работает с результирующим потоком возбуждения Φ_{f0} .

1. В момент возникновения КЗ ($t = 0$) в статоре генератора появляется ток (рис. 3.6). Периодическая составляющая тока отстает от напряжения на выводах генератора на угол φ_k , определяемый параметрами цепи КЗ. Протекая по обмоткам генератора, периодическая составляющая тока создает магнитный поток $\Phi_{ст}$, который будет направлен встречно потоку возбуждения Φ_{f0} .

На пути потока $\Phi_{ст}$ находятся два проводящих контура: короткозамкнутый контур демпферной обмотки и контур обмотки возбуждения, замкнутый на возбудитель.

Контур демпферной обмотки и обмотки возбуждения обладают индуктивностью, в которой под действием $\Phi_{ст}$ наводятся ЭДС и возникают свободные токи – соответственно $i_{св.д}$ и $i_{св.ф}$.

Рис. 3.6. Магнитные потоки генератора при $t = 0$

Поток $\Phi_{ст}$ неподвижен относительно ротора, поэтому токи $i_{св.д}$ и $i_{св.ф}$ имеют аperiodический характер. Указанные аperiodические токи затухают с постоянной времени, равной отношению индуктивности контура к его активному сопротивлению. Им соответствуют свободные магнитные потоки обмоток: демпферной ($\Phi_{св.д}$) и возбуждения ($\Phi_{св.ф}$).

Так как магнитный поток ротора не может изменяться скачком, очевидно, что для момента времени $t = 0$ должно выполняться условие: $\Phi_{ст} = \Phi_{св.д} + \Phi_{св.ф}$, и результирующий поток в немагнитном зазоре будет равен:

$$\Phi_{рез} = \Phi_{f0} + \Phi_{св.д} + \Phi_{св.ф} - \Phi_{ст}.$$

Это означает, что в начальный момент КЗ поток $\Phi_{ст}$ в роторе компенсируется свободными потоками и в немагнитном зазоре машины действует результирующий магнитный поток, равный потоку обмотки возбуждения Φ_{f0} до начала КЗ. В результате магнитный поток $\Phi_{ст}$ вытесняется из ротора и замыкается в основном по путям рассеяния обмотки статора, следовательно, ЭДС машины в начальный момент КЗ не меняется скачком, а равна значению ЭДС предшествующего режима.

Параметры, которыми характеризуется генератор в момент КЗ (т. е. $t = 0$), называются сверхпереходными:

X_d'' – сверхпереходное сопротивление генератора по продольной оси;

E_ϕ'' – действующее фазное значение начальной (сверхпереходной) ЭДС.

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ обозначают:

$I_{п.м}$ – амплитуда,

$I_{п(0)}$ – действующее значение за первый период.

Для синусоидального тока $I_{п(0)} = \frac{I_{п.м}}{\sqrt{2}}$ может быть определена по формуле:

муле:

$$I_{п(0)} = \frac{E_\phi''}{X_d'' + X_{к}} = \frac{E_\phi''}{X_{рез}},$$

где $X_{рез}$ – сопротивление цепи КЗ при условии $X_{рез} \geq r_{рез}$;

$$E_\phi'' = \sqrt{(I_{(0)} X_d'' \cos \varphi_{(0)})^2 + (U_{(0)} + I_{(0)} X_d'' \sin \varphi_{(0)})^2},$$

где $U_{(0)}$ и $I_{(0)}$ – соответственно фазные напряжение и ток генератора в предшествующем режиме; $\varphi_{(0)}$ – угол между напряжением и током в том же режиме.

2. С течением времени происходит *затухание аperiodических токов* в демпферной обмотке и обмотке возбуждения с одновременным уменьшением соответствующих магнитных потоков $\Phi_{св.д}$, $\Phi_{св.ф}$, причем первым затухает магнитный поток $\Phi_{св.д}$. В цепи обмотки возбуждения, имеющей малое активное сопротивление, свободный ток затухает медленнее.

Свободные магнитные потоки уже не могут компенсировать размагничивающее действие потока реакции якоря $\Phi_{ст}$, вследствие чего происходит уменьшение ЭДС генератора. Изменение параметров машины оказывает влияние на периодическую составляющую тока КЗ, которая тоже уменьшается:

$$I_{п.т} = \frac{E_{\phi.t}}{X_d'' + X_k} = \frac{E_{\phi.t}}{X_{рез}}.$$

3. После затухания свободных токов в демпферной обмотке и в обмотке возбуждения наступает *установившийся режим* для периодической составляющей тока статора. Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез} = \Phi_f - \Phi_{ст}$, т. е. размагничивающее действие потока статора максимально.

Следует учесть, что $\Phi_{ст}$ несколько ниже по сравнению с начальным моментом КЗ вследствие уменьшения периодической составляющей тока КЗ.

Таким образом, при отсутствии на генераторе АРВ установившееся значение периодической составляющей тока КЗ меньше его начального значения.

Апериодическая составляющая $i_{a.t}$ затухает по экспоненте с постоянной времени:

$$T_a = \frac{X_{рез}}{\omega R_{рез}}.$$

Длительность переходного процесса КЗ для современных генераторов обычно составляет не более 3–5 с. Как и в случае питания цепи КЗ от шин неизменного напряжения, максимальное значение полного тока i_y имеет место обычно через 0,01 с после начала процесса.

При определении ударного тока условно считают, что к этому времени амплитуда периодической составляющей тока не претерпевает существенных изменений и равна амплитуде периодической составляющей в начальный момент КЗ ($I_{п.м}$). Тогда

$$i_y = I_{п.м} + I_{п.м} e^{\frac{-0.01}{T_a}} = I_{п.м} \left(1 + e^{\frac{-0.01}{T_a}} \right) = \sqrt{2} I_{п.0} K_y.$$

Генератор при включенной АРВ. В этом случае снижение напряжения при КЗ компенсируется увеличением тока возбуждения i_f . Причем при снижении напряжения ниже $(0,85-0,90)U_n$ срабатывает форсировка возбуждения, обеспечивающая нарастание возбуждения генератора до предельного значения.

Таким образом, АРВ изменяет магнитный поток возбуждения Φ_f , ЭДС генератора, а следовательно, и ток КЗ.

Все АРВ действуют с небольшим запаздыванием. Кроме того, значительная индуктивность обмотки возбуждения генератора приводит к задержке увеличения тока ротора, в результате этого действие АРВ начинает проявляться только спустя некоторое время после возникновения КЗ. Из сказанного можно сделать вывод, что АРВ не влияет на ток КЗ в первые периоды КЗ. Начальное значение полного тока КЗ и его составляющие, а также ударный ток, остаются такими же, как и при отсутствии АРВ. То есть до вступления в действие АРВ ток КЗ уменьшается так же, как и при отсутствии АРВ, а затем начинает возрастать и достигает установившегося значения, соответствующего возросшему напряжению генератора за счет действия АРВ ([рис. 3.7](#)).

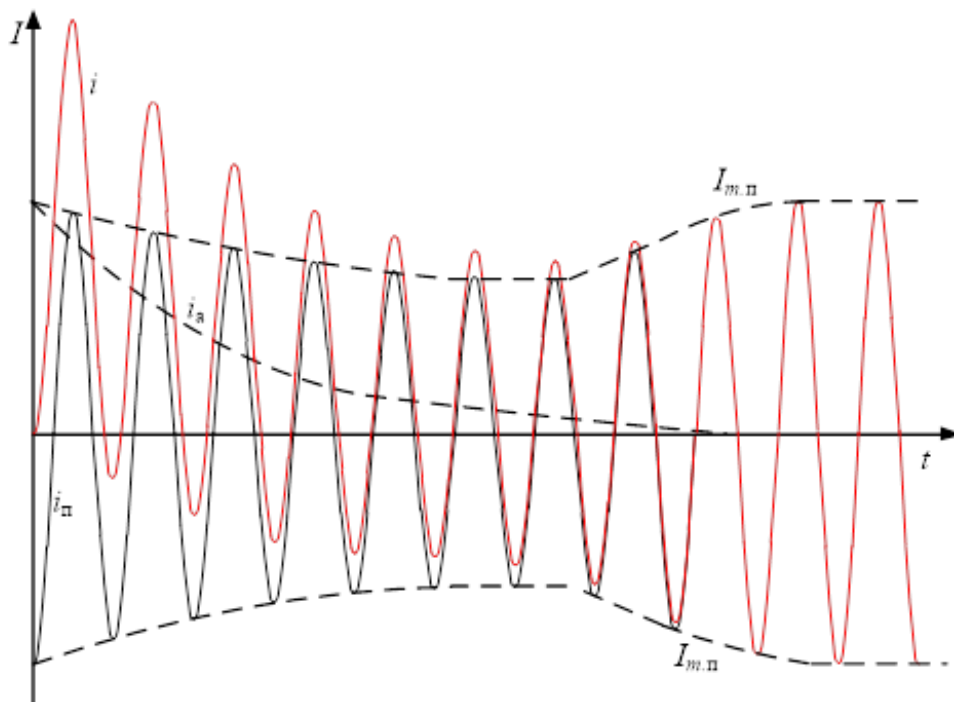


Рис. 3.7. Кривые изменения тока КЗ и его составляющих при наличии АРВ

Затухание свободных токов статора и обмотки возбуждения, возникших при внезапном КЗ, в некоторой степени компенсируется увеличением тока КЗ за счет действия АРВ.

В зависимости от соотношения между значениями этих токов и от характера их изменения кривая полного тока КЗ приобретает разный вид. При этом апериодическая составляющая тока КЗ $i_{a,t}$ остается практически такой же, как при отсутствии АРВ, а периодическая составляющая $i_{п,t}$ в зависимости от соотношения между начальным и установившимися токами КЗ при предельном токе возбуждения может затухать, увеличиваться или оставаться неизменной.

В начале переходного процесса действие АРВ сказывается незначительно, а с течением времени оно проявляется все в большей мере.

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

3.3. Короткое замыкание в удаленных точках СЭС

При КЗ в элементах ЭЭС токи в обмотках генератора будут меньше, чем в случае КЗ на зажимах генератора, так как результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи увеличивается. Следовательно, снижается 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 ЭЭС периодическая составляющая тока во время переходного процесса в генераторе практически не изменяется:

$$I_{п0} = I_{п\infty} = I_{\infty}.$$

Удаленной точкой КЗ называют такую точку СЭС, при КЗ в которой ток генераторов электростанции изменяется настолько незначительно, что изменением ЭДС генератора можно пренебречь и считать напряжение на его зажимах неизменным и равным номинальному.

В данном случае характер изменения тока в цепи будет таким же, как и при питании от шин неизменного напряжения (т. е. от источника бесконечной мощности).

Контрольные вопросы

1. Что понимается под источником бесконечной мощности?
2. Дайте определение постоянной времени цепи КЗ T_a . Как она определяется?
3. От чего зависит начальное значение апериодической составляющей тока КЗ?
4. Дайте определение ударного тока КЗ.
5. Как находится апериодическая составляющая тока короткого замыкания?
6. Каким образом находится периодическая составляющая тока короткого замыкания?
7. Дайте определение ударного коэффициента. Каковы пределы его изменения?
8. Как влияют параметры цепи короткого замыкания на величину и характер изменения тока короткого замыкания?
9. Начертите и объясните векторную диаграмму токов при трехфазном КЗ в простейшей электрической цепи для фазы А.
10. Как выглядит кривая изменения полного тока КЗ и его отдельных составляющих при малой удаленности места повреждения от генератора с отключенной АРВ?
11. Как выглядит кривая изменения полного тока КЗ и его отдельных составляющих при малой удаленности места повреждения от генератора при включенной АРВ?
12. Что понимают под удаленной точкой КЗ?
13. По какой формуле определяется значение сверхпереходной ЭДС синхронной машины?

ГЛАВА 4. УЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОБОБЩЕННОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАСЧЕТАХ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА КЗ

4.1. Переходные процессы в синхронном двигателе и СК

Синхронный двигатель при малой продолжительности процесса КЗ не снижает заметно числа оборотов.

Конечно, при выпадении синхронного двигателя из синхронизма (т. е. при переходе его в асинхронный режим) протекание процесса КЗ сопровождается появлением дополнительных токов, обусловленных разностью частот вращения участвующих машин, но это в равной мере относится и к генератору, если при КЗ нарушена его устойчивая работа.

Переходные процессы в синхронном двигателе и СК аналогичны переходным процессам в синхронном генераторе.

Однако в начальный момент времени переходного процесса двигателя имеют другие значения сверхпереходных ЭДС – E'' :

1. У перевозбужденного синхронного двигателя E'' выше подведенного напряжения ([рис. 4.1](#)). При этом любое снижение напряжения приводит к увеличению реактивного тока, генерируемого двигателем, т. е. синхронный двигатель является дополнительным источником питания.

2. У синхронного двигателя, работающего с *недовозбуждением*, ЭДС ниже подведенного напряжения и реактивный ток потребляется из сети.

Из этого следует, что при значительных снижениях напряжения при КЗ двигатель будет работать в роли генератора, а при малых снижениях, т. е. когда сохраняется неравенство $E'' < U$, он по-прежнему будет потреблять ток из сети (работа в режиме синхронного двигателя).

3. При равенстве ЭДС и напряжения реактивный ток будет отсутствовать в начальный момент времени переходного процесса, т. е. в дальнейшем все будет зависеть от степени снижения напряжения.

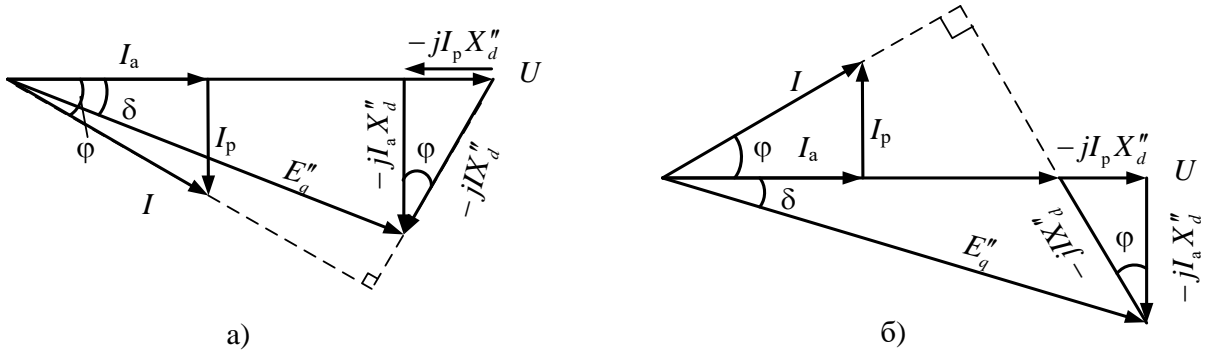


Рис. 4.1. Векторные диаграммы синхронного двигателя:

а) режим недовозбуждения; б) режим перевозбуждения

На основании векторной диаграммы ЭДС синхронных двигателей рассчитываются по следующим формулам:

$$E_q'' = \sqrt{(U \pm I_p X_d'')^2 + (I_a X_d'')^2};$$

$$E_q'' = \sqrt{(U \pm I \cdot X_d'' \sin \varphi)^2 + (I \cdot X_d'' \cos \varphi)^2},$$

где знак « \pm » соответствует режиму недовозбуждения двигателя, а знак « $+$ » – перевозбуждения, U – напряжение на зажимах двигателя до возникновения КЗ, I_p , I_a , I – соответственно реактивная и активная составляющая тока двигателя до возникновения КЗ и полный ток двигателя предшествующего режима.

Вследствие малости угла δ в приближенных расчетах может использоваться более простая формула:

$$E_q'' \approx U \pm I \cdot X_d'' \sin \varphi.$$

4.2. Переходные процессы в асинхронных двигателях

Так как в нормальном режиме асинхронные двигатели работают с малым скольжением ($s = 2-5\%$), то можно без заметной ошибки им пренебречь и считать, что асинхронный двигатель работает с синхронным числом оборотов

(практическая возможность такого допущения доказана профессором Н. Н. Щедриным).

Следовательно, в начальный момент КЗ асинхронный двигатель можно рассматривать как недовозбужденный синхронный двигатель.

Исходя из неизменности потокосцепления с обмоткой ротора в начальный момент КЗ, можно установить его сверхпереходную E'' и его X''_q .

Название сверхпереходной E'' и X''_q условно (так как ротор асинхронного двигателя имеет одну обмотку), поэтому следовало бы назвать их переходными.

Однако токи от асинхронного двигателя затухают столь же быстро, как и свободные токи в демпферных обмотках синхронных машин, следовательно, ток от асинхронного двигателя следует отнести к свободным сверхпереходным токам (так как мы разделяем процесс протекания КЗ по характеру затухания $i_{\text{своб}}$ в роторных цепях синхронных машин).

Благодаря полной симметрии ротора асинхронного двигателя отпадает необходимость разложения величин по отдельным осям, следовательно, $X''_{\text{АД}}$ является по существу его реактивностью КЗ (т. е. когда двигатель заторможен, $s = 100\%$). Практически относительное значение X можно определить по пусковому току двигателя:

$$X''_{*q} = \frac{1}{I_{*\text{пуск}}} = (0,2-0,35),$$

в зависимости от типа и мощности двигателя, где $I_{*\text{пуск}}$ – относительный пусковой ток двигателя.

Начальное значение E'' асинхронного двигателя находят из векторной диаграммы для предшествующего режима, как показано на [рис. 4.2](#).

Из диаграммы следует:

$$E''_0 = E''_{(0)} = \sqrt{(U_{(0)} \cos \varphi_{(0)})^2 + (U_{(0)} \sin \varphi_{(0)} - I''_{(0)} X''_{(0)})^2},$$

где $U_{(0)}$, $I_{(0)}$, $\varphi_{(0)}$ – напряжение, ток и угол сдвига между ними для предшествующего режима.

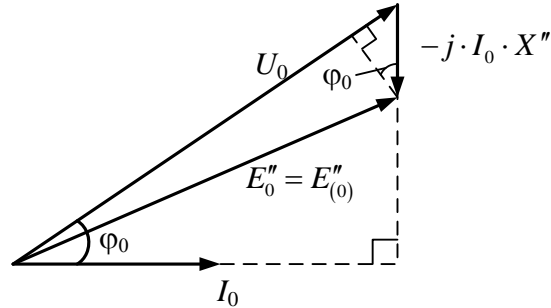


Рис. 4.2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Приближенно принимая E_0'' равной ее проекции на вектор $U_{(0)}$, получим:

$$E_0'' \approx U_{(0)} - I_{(0)} X'' \sin \varphi_{(0)}.$$

При номинальной предшествующей нагрузке двигателя с $\cos \varphi = 0,8$, считая, что $X'' = 0,2$, имеем $E_{д}'' = 0,9$.

Участие в токе КЗ асинхронного двигателя (так же как и недовозбужденного синхронного двигателя) при КЗ определяется соотношением между его E_0'' и остаточным напряжением в месте его присоединения к сети. При $E_0'' > U_{ост}$ он является дополнительным источником питания КЗ. Величина $U_{ост}$ определяет удаленность двигательной нагрузки от точки КЗ.

Периодический i_{π} и аperiodический i_a токи затухают быстро, так как активные сопротивления обмоток статора и ротора асинхронного двигателя относительно большие. Они затухают с приблизительно одинаковыми постоянными времени, величины которых составляют доли секунды. Образование i_a является следствием разряда электромагнитной энергии, которой обладал двигатель до возникновения КЗ.

Участие асинхронного двигателя может заметно сказываться на величине ударного тока КЗ.

4.3. Расчеты токов КЗ с учетом электрических двигателей

При КЗ двигатели по инерции вращаются, переходят в генераторный режим и генерируют ток к месту повреждения. В переходном процессе этот ток снижается до установившегося значения у СД и до нуля – у АД.

В сетях и электроустановках 6–10 кВ с двигателем мощностью более 1000 кВт ток КЗ может существенно увеличиваться из-за перехода двигателя в генераторный режим.

При расчете КЗ учитываются только те двигатели, которые связаны с местом КЗ непосредственно через КЛ, токопроводы, линейные реакторы или двухобмоточные трансформаторы.

Если в схеме имеется трансформатор с расщепленной обмоткой или сдвоенный реактор, то учитываются только те двигатели, которые связаны с секцией, на которой произошло КЗ.

Методика расчета токов КЗ с учетом двигателей зависит от места их размещения в расчетной схеме.

1. Радиальная схема (рис. 4.3).

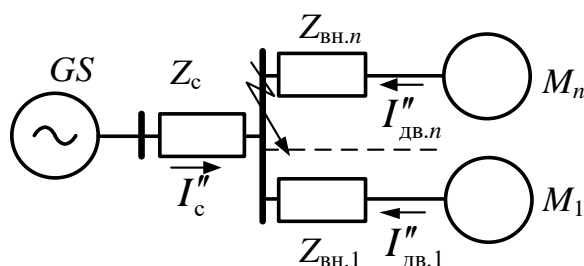


Рис. 4.3. Радиальная схема

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ:

$$I_{\text{дв}}'' = \frac{E_*'' I_{\text{ном}}}{\sqrt{\left(X_*'' + X_{* \text{вн}}''\right)^2 + r_{* \text{вн}}^2}},$$

где E_*'' – сверхпереходная ЭДС двигателя:

$$E_*'' = \sqrt{\left(U_{*(0)} \cos \varphi_{(0)}\right)^2 + \left(U_{*(0)} \sin \varphi_{(0)} \pm I_{*(0)} X_{* \text{дв}}''\right)^2}, \quad (4.1)$$

где $U_{*(0)}$, $I_{*(0)}$, $\varphi_{(0)}$ – соответственно напряжение, ток и угол между током и напряжением на шинах двигателя до возникновения КЗ; $X_{* \text{дв}}''$ – сверхпереходное сопротивление двигателя, соответственно для синхронных и асинхронных машин равно:

$$X_{* \text{дв}}'' = X_{* d}'',$$

$$X_{* \text{дв}}'' \approx \frac{1}{I_{* \text{пуск}}} \sqrt{1 - \left(\frac{M_{* \text{пуск}}}{I_{* \text{пуск}}}\right)^2}.$$

В формуле (4.1) знак «+» ставится для СГ, СК и СД, работающих с перевозбуждением, а знак «-» – для СМ с недовозбуждением и асинхронных машин.

2. Точка КЗ находится за общим сопротивлением двигателя и системы (рис. 4.4).

$$I_{\text{дв}}'' = \frac{E_*'' I_{\text{б}} - I_{\Sigma}'' Z_{* \text{общ}}}{Z_*'' + Z_{* \text{вн.дв}}},$$

где I''_{Σ} – суммарный ток от двигателя и системы, протекающий по общему сопротивлению.

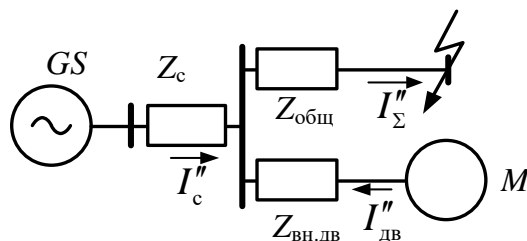


Рис. 4.4. Сложная схема соединения

$$I''_{\Sigma} = \frac{E''_{* \text{ЭКВ}}}{Z_{* \text{ЭКВ}}} I_{\text{б}},$$

где $E''_{* \text{ЭКВ}}$ – эквивалентное ЭДС после преобразования схемы к простейшему виду; $Z_{* \text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление после преобразования схемы к простейшему виду.

Пример решения задачи

Задача

Рассчитать влияние асинхронного двигателя на ток короткого замыкания (рис. 4.5). При расчетах учесть, что до возникновения КЗ двигатели работали с токовой нагрузкой, равной половине номинальной, а также что $\cos(\varphi) = 0,8$. На шинах двигателей $U_0 = 1,05U_{\text{н}}$.

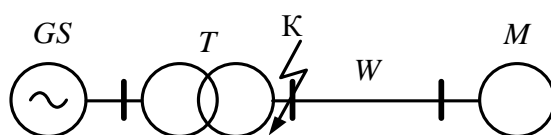


Рис. 4.5. Расчетная схема присоединения двигателя к точке КЗ

Исходные данные

Параметры двигателя M : $P_H = 1,5$ МВт; $\cos(\varphi) = 0,8$, $U_H = 6$ кВ,
 $I_{* \text{ пуск}} = 5$ о. е., $n = 3$ шт.

Параметры линии W : $x_{уд} = 0,4$ Ом/км; $l = 50$ км.

Решение

Расчет произведем в относительных единицах. Так как в расчетах все сопротивления заданы в относительных единицах, знак «*» в обозначениях опускаем.

За базисную мощность примем сумму полных номинальных мощностей двигателей.

$$S_6 = \sum S_{\text{ном.д}} = \frac{nP_H}{\cos(\varphi)} = \frac{3 \cdot 1,5}{0,8} = 5,625 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

В этом случае базисный ток будет равен сумме номинальных токов двигателей:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = \frac{5,625}{\sqrt{3} \cdot 6} = 0,541 \text{ кА}.$$

За базисное напряжение принимаем номинальное напряжение двигателя $U_6 = 6$ кВ.

Сопротивление двигателя M в относительных единицах:

$$X_d'' = \frac{1}{I_{* \text{ пуск}}} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ о. е.}$$

Сопротивление линии W в относительных единицах:

$$X_w = x_{уд} l \frac{S_6}{U_6^2} = 0,4 \cdot 3 \cdot \frac{5,625}{6^2} = 0,1875 \text{ о. е.}$$

Значение ЭДС двигателя в начальный момент короткого замыкания в о. е. находится по формуле:

$$E_d'' = \sqrt{(U_0 - I_0 X_d'' \cos(\varphi))^2 + (I_0 X_d'' \sin(\varphi))^2};$$

$$E_d'' = \sqrt{(1 - 0,5 \cdot 0,2 \cdot 0,8)^2 + (0,5 \cdot 0,2 \cdot 0,6)^2} = 0,92 \text{ о. е.}$$

Ток подпитки КЗ от двигателя находится по формуле:

$$I_{к.д} = \frac{E_d''}{X_d'' + X_{вн}} I_6 = \frac{E_d''}{X_d'' + X_w} I_6;$$

$$I_{к.д} = \frac{0,92}{0,2 + 0,1875} \cdot 0,541 = 2,5 \cdot 0,541 = 1,28 \text{ кА.}$$

Контрольные вопросы

1. Почему при небольшой удаленности двигателя от точки КЗ он является дополнительным источником питания тока КЗ?
2. Как сказывается режим работы двигателя по возбуждению на его влияние на ток КЗ?
3. Поясните векторные диаграммы синхронного двигателя в режимах перевозбуждения и недовозбуждения.
4. По какой формуле определяется сверхпереходная ЭДС синхронного двигателя?

5. Как в расчетах тока КЗ в начальный момент времени представляется асинхронный двигатель?
6. Как изменяется влияние двигателей на ток КЗ с течением времени и почему?
7. Как учесть в расчетах токов короткого замыкания узел нагрузки, содержащий, помимо двигательной, еще и нагрузку других видов?
8. Как влияет на величины начальных значений токов короткого замыкания удаленность точки короткого замыкания от места присоединения двигательной нагрузки?
9. В каких случаях допускается проводить расчеты токов короткого замыкания без учета присоединенной двигательной нагрузки?
10. Как производится расчет тока КЗ от двигателей при радиальной схеме?
11. Как производится расчет тока КЗ от двигателей при сложной схеме соединения?
12. По какой формуле определяется ток подпитки двигателем точки КЗ?
13. Как определяется сверхпереходное сопротивление АД?
14. Одинаковое ли влияние оказывает двигательная нагрузка на начальное и установившееся значения тока трехфазного КЗ?

ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЗАДАННЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

5.1. Общие положения метода типовых кривых

Наиболее распространенным практическим методом расчета действующего значения периодической составляющей тока в произвольный момент времени при близких коротких замыканиях является метод типовых кривых. В отличие от других методов он позволяет, используя единые кривые, определить ток короткого замыкания от генераторов (электродвигателей) разных типов, даже если числовые значения их одноименных параметров существенно отличаются друг от друга (исключение составляют турбогенераторы мощностью 500 МВт). Это достигается за счет того, что периодическая составляющая тока короткого замыкания в любой момент времени отнесена не к номинальному току машины, как это имело место в применяемом ранее методе расчетных кривых, а к действующему значению периодической составляющей тока машины в начальный момент короткого замыкания. Метод типовых кривых применим при любой предшествующей нагрузке генератора (электродвигателя), и результаты расчетов весьма мало зависят от места подключения нагрузки.

Метод типовых кривых основан на использовании специальных кривых: семейств основных кривых:

$$\gamma_{п.т} = \frac{I_{п.г.т}}{I''_{п.г}} = f(t) \text{ при разных удаленностях точки КЗ } \frac{I''_{п.г}}{I_{г.НОМ}} = \text{var},$$

и семейства дополнительных кривых:

$$\gamma_{п.т} = f(\gamma_{к.т}) \text{ при } \frac{I''_{п.г}}{I''_{п.Σ}} = \text{var},$$

где $I_{п.г.t}$ – действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора (синхронного компенсатора, электродвигателя) в произвольный момент времени t ; $I''_{п.г}$ – начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора; $I_{г.НОМ}$ – номинальный ток источника; $\gamma_{к.t} = \frac{I_{п.г.t}}{I''_{п.г}}$ – коэффициент; $I''_{п.г}$ – начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания от всех источников, то есть ток в месте КЗ; $I_{п.г.t}$ – периодическая составляющая тока КЗ в момент времени t , создаваемая всеми источниками.

Типовые кривые синхронных генераторов и синхронных компенсаторов с тиристорной независимой системой возбуждения приведены на [рис. 5.1](#).

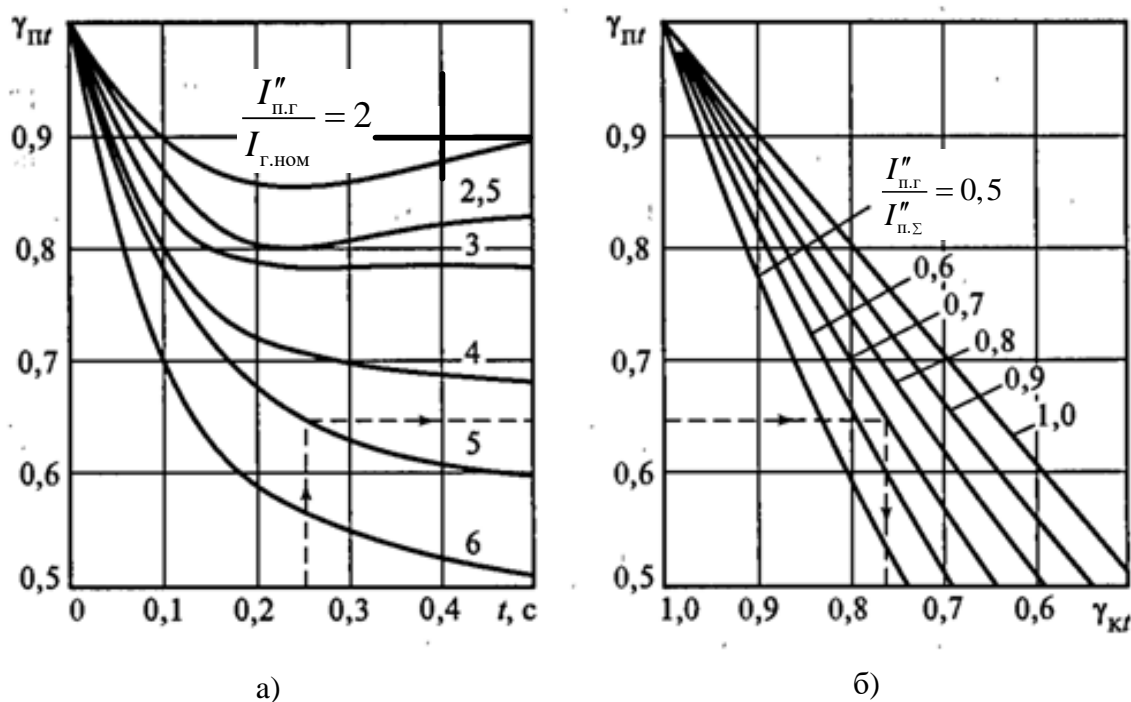


Рис. 5.1. Типовые кривые:

а) основные; б) дополнительные

Применение метода типовых кривых зависит от исходной расчетной схемы. Возможны три варианта:

1. Расчетная схема содержит только один синхронный генератор (компенсатор).

2. Расчетная схема содержит несколько однотипных синхронных генераторов (компенсаторов), и они находятся в одинаковых условиях по отношению к точке короткого замыкания.

3. Расчетная схема является сложной, т. е. содержит несколько источников энергии, и при коротком замыкании эти источники оказываются связанными с точкой повреждения через какой-либо общий элемент (трансформатор, реактор, линию электропередачи и т. п.).

Рассмотрим подробно порядок расчета во всех этих случаях, имея в виду расчет в системе относительных единиц с приближенным приведением параметров.

5.2. Схема с одним синхронным генератором (компенсатором)

В этом случае расчет периодической составляющей тока короткого замыкания в заданный момент времени с использованием метода типовых кривых производят в следующем порядке.

1. По исходной расчетной схеме составляют схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронной машины, т. е. схему, в которой синхронный генератор (компенсатор) учитывают сверхпереходным сопротивлением и сверхпереходной ЭДС.

Находят эквивалентное индуктивное сопротивление элементов схемы замещения относительно точки короткого замыкания $X_{рез}$ и определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока генератора (компенсатора) при коротком замыкании:

$$I''_{п.г} = \frac{E''}{X_{рез}} I_6^{(0)}$$

2. Если генератор и точка КЗ находятся на разных ступенях напряжения, то номинальный ток источника приводят к ступени напряжения с точкой КЗ по формуле:

$$I_{г. ном} = \frac{S_{г. ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ср. ном}}, \quad (5.1)$$

где $S_{г. ном}$ – полная номинальная мощность генератора; $U_{ср. ном}$ – среднее номинальное напряжение ступени КЗ, выбранное по шкале средних номинальных напряжений, кВ.

3. Далее находят удаленность точки КЗ от источника энергии $\frac{I''_{п.г}}{I_{г. ном}}$. Если это отношение больше или равно 2 о. е., то расчет ведут с применением типовых кривых.

В противном случае, когда $\frac{I''_{п.г}}{I_{г. ном}} < 2$, действующее значение периодической составляющей тока КЗ мало меняется во времени и можно считать, что $I_{п.г. t} = I''_{п.г}$.

4. Находят типовую кривую по [рис. 5.1](#), а соответственно полученному значению удаленности $\frac{I''_{п.г}}{I_{г. ном}}$. Если последнее оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа (при небольшой разнице между дробным и целым числами) или производят интерполяцию кривых.

По выбранной кривой определяют отношение действующих значений периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора (компенсатора) в расчетный и начальный моменты времени, т. е. $\gamma_{п.г. t} = \frac{I_{п.г. t}}{I''_{п.г}}$.

5. Определяют искомое действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчетный момент времени:

$$I_{п.г. t} = \gamma_{п.г. t} I''_{п.г}.$$

5.3. Схема с несколькими однотипными синхронными генераторами (компенсаторами), находящимися в одинаковых условиях по отношению к точке короткого замыкания

В этом случае расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени ведут в том же порядке, только все генераторы (компенсаторы) заменяют одним эквивалентным, т. е. соответствующие ветви в схеме замещения эквивалентируют, а в формулу (5.1) вместо номинальной мощности одной машины подставляют сумму номинальных мощностей всех машин.

В тех случаях, когда исходная расчетная схема содержит несколько генераторов или компенсаторов, находящихся на разном удалении от точки короткого замыкания, но связанных с ней независимо друг от друга, находят значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в произвольный момент времени изложенным выше способом от отдельных машин, и затем результаты суммируют.

5.4. Сложная схема

В этом случае схема содержит несколько источников энергии и при коротком замыкании эти источники оказываются связанными с точкой повреждения через какой-либо общий элемент (трансформатор, реактор, линию электропередачи и т. п.).

При расчете действующего значения периодической составляющей тока в месте трехфазного короткого замыкания в произвольный момент времени следует учитывать влияние переходного процесса в ближайшем к месту короткого замыкания генераторе (компенсаторе) на изменение во времени указанной составляющей тока короткого замыкания. Это влияние характеризуется коэф-

фициентом $\gamma_{к,t} = \frac{I_{п,\Sigma,t}}{I''_{п,\Sigma}}$.

Для определения этого коэффициента исходную схему замещения следует преобразовать в трехлучевую звезду (рис. 5.2). Причем ближайший к месту короткого замыкания генератор (компенсатор) и последовательно соединенные с ним элементы должны быть представлены в виде отдельной ветви с включенными в нее сверхпереходной ЭДС генератора (компенсатора) $E''_{*г}$ и суммарным сопротивлением всех элементов этой ветви $X_{*г}$ (рис. 5.2). Более удаленные источники энергии и связывающие их линии электропередачи, трансформаторы и т. д. вместе с остальной частью электроэнергетической системы должны быть представлены в другой ветви неизменной по амплитуде эквивалентной ЭДС $E''_{*с}$ и эквивалентным сопротивлением $X_{*с}$. В третью ветвь включают сопротивление элемента, который при коротком замыкании «связывает» обе ветви, содержащие ЭДС, с точкой короткого замыкания.

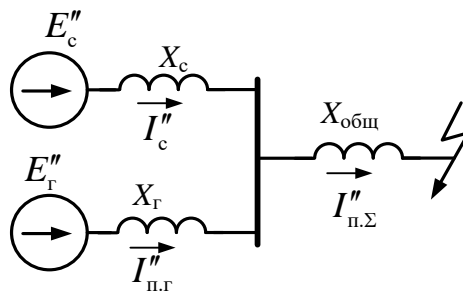


Рис. 5.2. Расчетная схема

Из полученной схемы легко найти действующие значения периодической составляющей тока генератора (компенсатора) и тока в месте короткого замыкания в начальный момент короткого замыкания, т. е. $I''_{п.г}$ и $I''_{п.Σ}$.

Далее действуют следующим образом. Если не выполняется хотя бы одно из условий $\left(\frac{I''_{п.г}}{I_{г.ном}} \geq 2 \text{ или } \frac{I''_{п.г}}{I''_{п.Σ}} \geq 0,5 \right)$, то принимают, что действующее значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания остается

неизменным во времени, т. е. $\gamma_{п.т} = \frac{I_{п.г.т}}{I''_{п.г}} = 1$.

Если выполняются оба условия, то для выделенного генератора (компенсатора) короткое замыкание является близким, и его влияние на ток в месте короткого замыкания оказывается существенным. Для определения действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени необходимо сначала найти значение коэффициента

$\gamma_{к.т} = \frac{I_{п.г.т}}{I''_{п.г}}$. Его приближенное значение может быть определено с помощью

вспомогательных кривых [рис. 5.1, б](#), построенных для разных отношений $\frac{I''_{п.г}}{I''_{п.г}}$ в пределах от 1 до 0,5.

Расчет действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени с использованием дополнительных кривых проводят в следующем порядке.

1. В соответствии с заданной расчетной схемой составляют схему замещения для определения начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания.

2. Путем преобразования схемы замещения в звезду находят эквивалентные индуктивные сопротивления ветвей ближайшего к месту короткого замыкания генератора (компенсатора) $X_{*г}$ и источников с неизменной по амплитуде ЭДС $X_{*с}$ до узловой точки, эквивалентную ЭДС $E''_{*с}$, а также сопротивление общего элемента $X_{*общ}$, который «связывает» генератор (компенсатор) и систему с точкой короткого замыкания.

3. Находят $X_{*экр}$ и $E''_{*экр}$ для определения начального значения периодической составляющей тока в точке КЗ по формуле $I''_{*п.г}$.

$$I_{* \text{ п.}\Sigma}'' = \frac{E''_{* \text{ экв}}}{Z_{* \text{ экв}}}.$$

4. Вычисляют начальное значение периодической составляющей тока КЗ в ветви генератора, выраженное в кА, пользуясь выражением:

$$I_{\text{п.г}}'' = \frac{\left(E''_{* \text{ г}} - I''_{* \text{ п.}\Sigma} Z_{* \text{ общ}} \right)}{Z_{* \text{ г}}} I_{\text{б}}$$

5. Определяют удаленность точки КЗ $\frac{I_{\text{п.г}}''}{I_{\text{г.ном}}''}$ и отношение $\frac{I_{\text{п.г}}''}{I_{\Sigma}''}$. Если

$$\frac{I_{\text{п.г}}''}{I_{\text{г.ном}}''} \geq 2 \text{ о. е. и } \frac{I_{\text{п.г}}''}{I_{\text{п.}\Sigma}''} \geq 0,5,$$

то выбирают типовую кривую, соответствующую удаленности, и для заданного расчетного момента времени по выбранной типовой кривой находят $\gamma_{\text{п.г}}$.

По этому коэффициенту, используя дополнительные типовые кривые ([рис. 5.1, б](#)) со значением $\frac{I_{\text{п.г}}''}{I_{\text{п.}\Sigma}''}$, устанавливают значение коэффициента $\gamma_{\text{к.г}} = \frac{I_{\text{п.}\Sigma t}''}{I_{\text{п.}\Sigma}''}$.

6. По найденному коэффициенту $\gamma_{\text{к.г}}$ вычисляют периодическую составляющую тока в точке КЗ в заданный момент времени:

$$I_{\text{п.}\Sigma t}'' = \gamma_{\text{к.г}} \cdot I_{\text{п.}\Sigma}''.$$

Пример решения задачи

Задача

Рассчитать периодическую составляющую тока КЗ в точках К1 и К2 ([рис. 5.3](#)) через 0,4 с после возникновения КЗ методом типовых кривых.

Исходные данные

Параметры генератора G:

$$P_{Г.НОМ} = 100 \text{ МВт}; \quad \cos(\varphi) = 0,8; \quad U_{Г.НОМ} = 10 \text{ кВ}; \quad X''_{* d.НОМ} = 0,1 \text{ о. е.};$$

$$E''_{* Г.НОМ} = 1,1 \text{ о. е.}$$

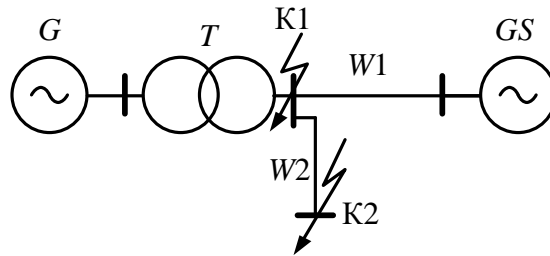


Рис. 5.3. Расчетная схема ЭЭС

Параметры трансформатора T :

$$S_{Т.НОМ} = 120 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad u_k = 10 \%; \quad U_{н.н} = 10 \text{ кВ}; \quad U_{в.н} = 115 \text{ кВ}.$$

Параметры линий $W1, W2$:

$$x_{уд} = 0,4 \text{ Ом/км}; \quad l_1 = 50 \text{ км}; \quad l_2 = 20 \text{ км}.$$

Параметры энергосистемы GS :

$$S_k = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad U_{НОМ} = 110 \text{ кВ}; \quad E''_{* с.НОМ} = 1 \text{ о. е.}$$

Решение

Расчет проведем в относительных единицах, используя приближенное приведение параметров. Следовательно, базисные напряжения на каждой ступени будут равны их среднономинальным напряжениям. Так как в расчетах все величины представлены в относительных единицах, знак «*» в обозначениях опускаем.

Выберем базисную мощность $S_б = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Тогда базисный ток основной ступени будет равен:

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{ср.ном.1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}.$$

Рассчитаем сопротивления в о. е.:

$$X_1 = X_G = X''_{*d} \frac{S_6}{S_{\text{ном.Г}}} = X''_{*d} \frac{S_6 \cos(\varphi)}{P_\Gamma} = 0,1 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{100} = 0,8 \text{ о. е.};$$

$$X_2 = X_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном.Т}}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{1000}{120} = 0,833 \text{ о. е.};$$

$$X_3 = X_{W1} = x_{\text{уд}1} l \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном.1}}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,51 \text{ о. е.};$$

$$X_4 = X_{GS} = \frac{S_6}{S_k} = \frac{1000}{1000} = 1 \text{ о. е.};$$

$$X_5 = X_{W2} = x_{\text{уд}2} l \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном.1}}^2} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,605 \text{ о. е.}$$

Соединив схемы замещения отдельных элементов исходной схемы между собой в той же последовательности, получим схему замещения, изображенную на [рис. 5.4](#).

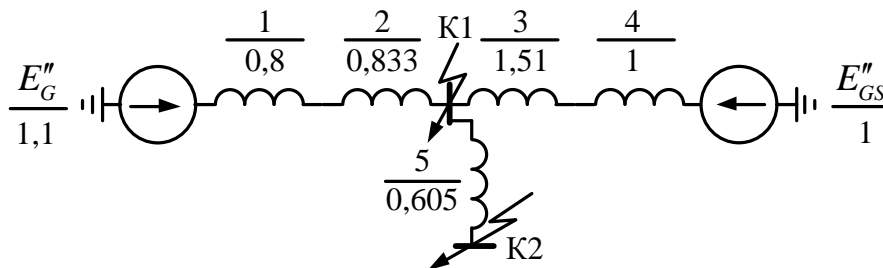


Рис. 5.4. Схема замещения

Преобразуем последовательно соединенные сопротивления:

$$X_6 = X_1 + X_2 = 0,8 + 0,833 = 1,633 \text{ о. е.};$$

$$X_7 = X_3 + X_4 = 1,51 + 1 = 2,51 \text{ о. е.}$$

Расчет для точки K1

При КЗ в точке К1 ток по ветви X_5 не протекает. Разрежем узел трехфазного КЗ и определим отдельно начальные значения периодических составляющих токов КЗ в ветвях генератора G и энергосистемы GS (рис. 5.5):

$$I''_{п.г} = \frac{E''_G}{X_6} I_{61} = \frac{1,1}{1,633} \cdot 5,02 = 3,38 \text{ кА};$$

$$I''_{п.с} = \frac{E''_{GS}}{X_7} I_{61} = \frac{1}{2,51} \cdot 0,502 = 2 \text{ кА}.$$

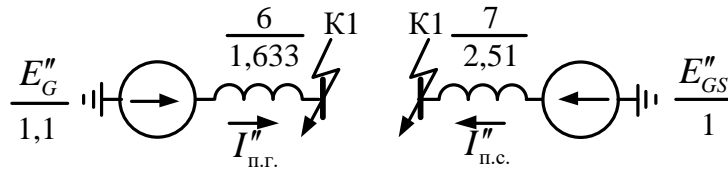


Рис. 5.5. Приведенная схема замещения относительно точки К1

Номинальный ток генератора, приведенный к основной ступени напряжения, будет равен:

$$I_{г.ном} = \frac{S_{г.ном}}{\sqrt{3}U_{ср.ном.КЗ}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,8} = 0,628 \text{ кА}.$$

Отношение начального значения периодической составляющей тока КЗ к номинальному току:

$$\frac{I''_{п.г}}{I_{г.ном}} = I''_{п.г.ном} = \frac{3,38}{0,628} \approx 5,4.$$

По данному отношению и времени $t = 0,4$ с по типовым кривым (рис. 5.6) определяем отношение $\gamma_{п.t} = \frac{I_{п.г.t}}{I''_{п.г}} = 0,59$.

Периодическая составляющая тока КЗ в ветви генератора для заданного

момента времени равна:

$$I_{п.г.t} = \gamma_{п.t} I''_{п.г} = 0,59 \cdot 3,38 = 1,99 \text{ кА.}$$

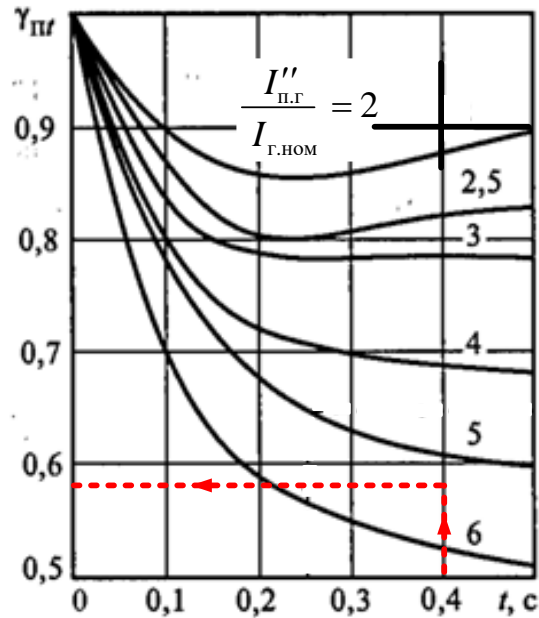


Рис. 5.6. Определение $\gamma_{п.t}$ по типовым кривым

Ток КЗ в ветви энергосистемы с течением времени не изменяется. Таким образом, токи КЗ в точке К1 в начальный момент времени ($I''_{п.с}$) и $t = 0,4$ с ($I_{п.с.t}$) соответственно равны:

$$I''_{п.с} = I''_{п.с} + I''_{п.г} = 2 + 3,38 = 5,38 \text{ кА;}$$

$$I_{п.с.t} = I''_{п.с} + I_{п.г.t} = 2 + 1,99 = 3,99 \text{ кА.}$$

Расчет для точки К2

Для точки К2 схема будет являться сложной ([рис. 5.7](#)).

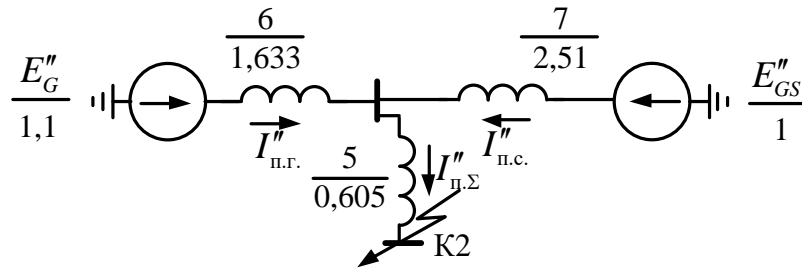


Рис. 5.7. Схема замещения для определения тока КЗ в точке К2

Вначале определим периодическую составляющую сверхпереходного тока КЗ ($I''_{п.Σ}$) в точке К2. Результирующие ЭДС и сопротивления соответственно равны:

$$E_{\text{рез}} = \frac{E_G'' X_7 + E_{GS}'' X_6}{X_6 + X_7} = \frac{1,1 \cdot 2,51 + 1 \cdot 1,633}{1,633 + 2,51} = 1,061 \text{ о. е.};$$

$$X_{\text{рез}} = \frac{X_6 X_7}{X_6 + X_7} + X_5 = \frac{2,51 \cdot 1,633}{1,633 + 2,51} + 0,605 = 0,989 + 0,605 = 1,594 \text{ о. е.}$$

Периодическая составляющая сверхпереходного тока КЗ:

$$I''_{п.Σ} = \frac{E_{\text{рез}}}{X_{\text{рез}}} I_{\text{б1}} = \frac{1,061}{1,594} \cdot 0,502 = 3,341 \text{ кА.}$$

Найдем периодическую составляющую сверхпереходного тока КЗ от генератора G по формуле:

$$I''_{п.г} = \frac{E_{\text{рез}} I_{\text{б1}} - I''_{п.Σ} X_5}{X_6} = \frac{1,1 \cdot 0,502 - 3,341 \cdot 0,605}{1,633} = 2,144 \text{ кА.}$$

Проверим выполнение условий: $\frac{I''_{п.г}}{I_{\text{г.ном}}} > 2$ и $\frac{I''_{п.г}}{I''_{п.Σ}} > 0,5$.

$$\frac{I''_{п.г}}{I_{г.ном}} = \frac{2,144}{0,628} = 3,4; \quad \frac{I''_{п.г}}{I''_{п.с}} = \frac{2,144}{3,41} = 0,64.$$

По отношению $\frac{I''_{п.г}}{I_{г.ном}} = 3,4$ и времени $t = 0,4$ с по основным типовым кри-

вым (рис. 5.8) определяем отношение: $\gamma_{п.г} = \frac{I''_{п.г.t}}{I''_{п.г}} = 0,75$. По коэффициенту

$\gamma_{п.г} = 0,75$ дополнительной типовой кривой, соответствующей отношению

$\frac{I''_{п.г}}{I''_{п.с}} = 0,64$, определяем $\gamma_{к.t} = 0,87$.

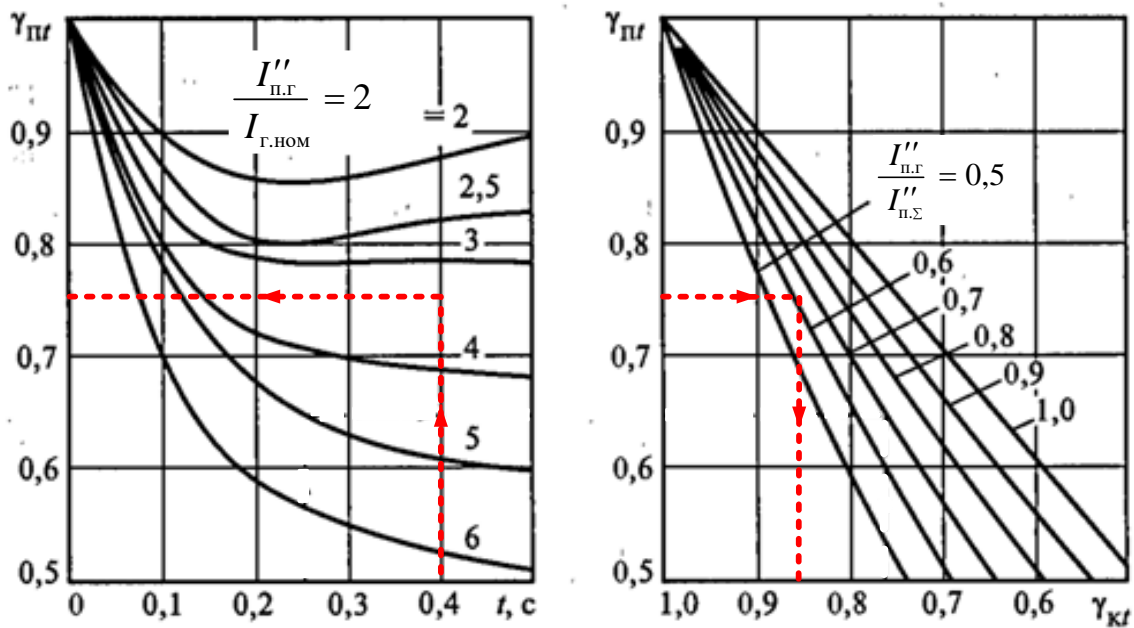


Рис. 5.8. Определение $\gamma_{к.t}$ по дополнительным типовым кривым

Периодическая составляющая тока КЗ в заданный момент времени равна:

$$I_{п.с.t} = \gamma_{к.t} I''_{п.с} = 0,87 \cdot 3,341 = 2,91 \text{ кА.}$$

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества у метода типовых кривых перед методом расчетных кривых?
2. Какие короткие замыкания являются удаленными при использовании метода типовых кривых?
3. Какие короткие замыкания являются близкими при использовании метода типовых кривых?
4. Что представляет из себя семейство основных кривых в методе типовых кривых?
5. В каких случаях применяются дополнительные кривые в методе типовых кривых?
6. Какой алгоритм расчета тока КЗ по методу типовых кривых при одной синхронной машине?
7. Какой алгоритм расчета тока КЗ по методу типовых кривых при нескольких однотипных или равноудаленных синхронных машинах?
8. Какой алгоритм расчета тока КЗ по методу типовых кривых при сложной расчетной схеме?
9. Что понимается под сложной расчетной схемой при использовании метода типовых кривых?

ГЛАВА 6. МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

6.1. Метод симметричных составляющих

При расчете трехфазных КЗ схемы рассматриваются как симметричные, поэтому эквивалентная схема короткозамкнутой цепи представляется в однолинейном изображении, и расчет ведется для одной фазы.

При несимметричном КЗ нельзя вести расчет по одной фазе, так как в сети нарушается симметрия токов в фазах, фазных и линейных напряжений, присутствуют неодинаковые падения напряжений по фазам в элементах системы.

Сравнительно просто несимметричные КЗ и другие режимы в электрических сетях можно рассчитывать с использованием метода симметричных составляющих (МСС). Идея *метода симметричных составляющих* состоит в следующем: любую несимметричную систему трех векторов можно представить в виде трех симметричных систем прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Для каждой из этих систем явления, протекающие в различных фазах, подобны, что позволяет:

- а) воспользоваться однолинейными схемами для каждой последовательности;
- б) вести расчет для одной фазы (такая фаза называется *особой*).

Основные положения МСС:

1. Любой из векторов симметричной трехфазной системы можно представить одноименным вектором другой фазы с помощью оператора поворота:
 $a = e^{j120}$.

Умножение вектора на оператор a означает поворот вектора на 120° в положительном направлении (против хода часовой стрелки). Причем умножение на a^2 соответствует повороту на 240° в том же направлении: $a^2 = e^{j240}$.

В практических расчетах часто используют следующие преобразования с оператором поворота:

$$a^2 + a = -1;$$

$$a^2 - a = -j\sqrt{3};$$

$$a^3 = e^{j360}.$$

2. Любую несимметричную систему трех векторов можно разложить на три симметричные системы: прямой, обратной и нулевой последовательности (рис. 6.1).

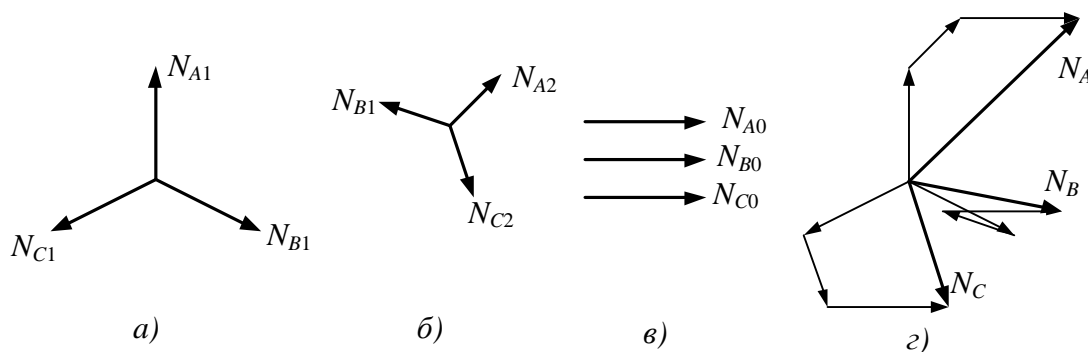


Рис. 6.1. Симметричные системы векторов:

а) прямой (чередование векторов то же, что и для основной симметричной системы); б) обратной (чередование векторов противоположно основной симметричной системе); в) нулевой (направление векторов совпадает); г) несимметричная система

$$N_A = N_{A1} + N_{A2} + N_{A0} ;$$

$$N_B = N_{B1} + N_{B2} + N_{B0} ;$$

$$N_C = N_{C1} + N_{C2} + N_{C0} .$$

3. Системы прямой и обратной последовательностей являются уравновешенными:

$$N_{A1} + N_{B1} + N_{C1} = N_{A1}(1 + a + a^2) = 0 ;$$

$$N_{A2} + N_{B2} + N_{C2} = N_{A2}(1 + a + a^2) = 0.$$

Система нулевой последовательности симметрична, но не уравновешена:

$$N_{A0} + N_{B0} + N_{C0} = 3N_{A0} \neq 0.$$

4. С помощью оператора поворота вектор любой фазы можно выразить через симметричные составляющие вектора фазы А:

$$\begin{cases} N_A = N_{A1} + N_{A2} + N_{A0} \\ N_B = a^2 N_{A1} + a N_{A2} + N_{A0} \\ N_C = a N_{A1} + a^2 N_{A2} + N_{A0} \end{cases} \quad (6.1)$$

5. Основное допущение, принимаемое в расчетах несимметричных переходных процессов ([рис. 6.2](#)), заключается в следующем: протекающие токи в схемах замещения разных последовательностей зависят лишь от действующей в схеме разности потенциалов и сопротивления одноименной последовательности (не учитывается взаимоиנדукция между фазами).

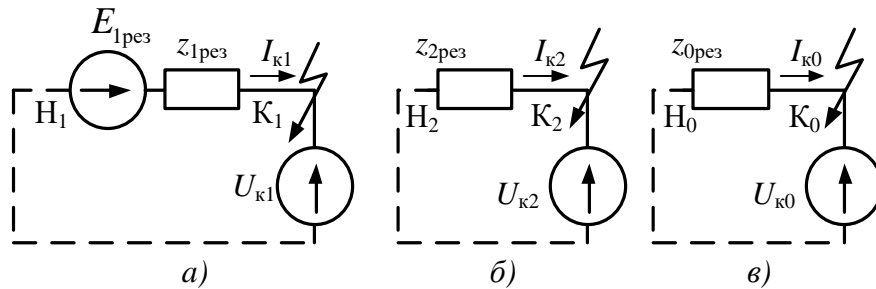


Рис. 6.2. Результирующие схемы замещения:

а) прямой; б) обратной; в) нулевой последовательностей

Основные уравнения соотношений между напряжением и током для каждой последовательности имеют вид:

$$U_{к1} = E_{1\text{рез}} - z_{1\text{рез}} I_{к1};$$

$$U_{к2} = 0 - z_{2\text{рез}} I_{к2};$$

$$U_{к0} = 0 - z_{0\text{рез}} I_{к0},$$

где $U_{к1}$, $U_{к2}$, $U_{к0}$ и $I_{к1}$, $I_{к2}$, $I_{к0}$ – симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ; $E_{1\text{рез}}$ – результирующая ЭДС прямой последовательности относительно точки КЗ; $z_{1\text{рез}}$, $z_{2\text{рез}}$, $z_{0\text{рез}}$ – результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

6.2. Схемы замещения отдельных последовательностей

При расчете любого несимметричного режима или процесса методом симметричных составляющих одной из первоочередных задач является составление схем замещения. Схемы замещения отдельных последовательностей включают в себя все элементы сети, по которым при данном виде несимметрии протекают токи соответствующих последовательностей.

Схема прямой последовательности идентична схеме, которую составляют для расчета любого симметричного трехфазного режима.

Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, схема обратной последовательности по конфигурации аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит, прежде всего, в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей условно считают равными нулю.

За начало схемы прямой или обратной последовательности выбирают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности. Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия.

Схемы замещения силовых трансформаторов. Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от их конструкции и схемы соединения обмоток. Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду с незаземленной нулевой точкой, принимается равным бесконечности ($X_0 = \infty$).

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов 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 (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Схемы соединения обмоток трансформаторов и их схемы замещения

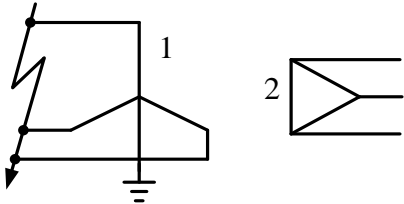
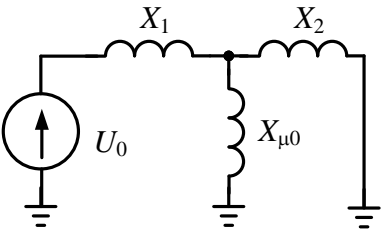
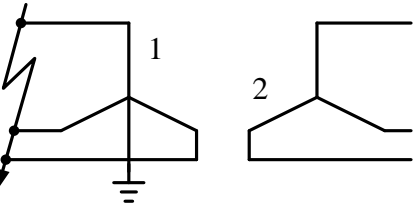
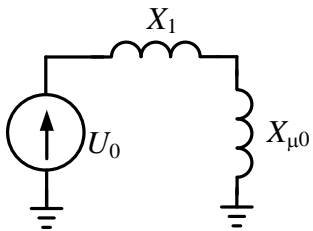
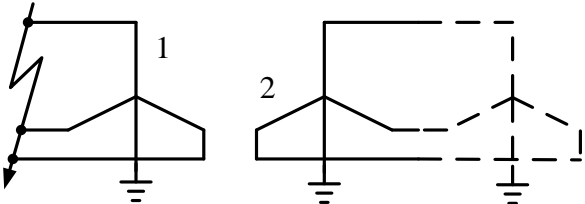
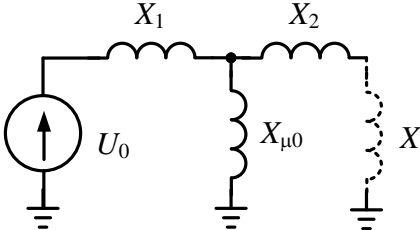
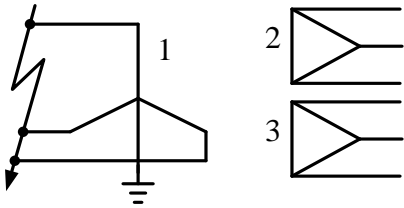
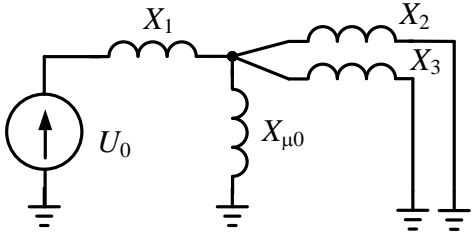
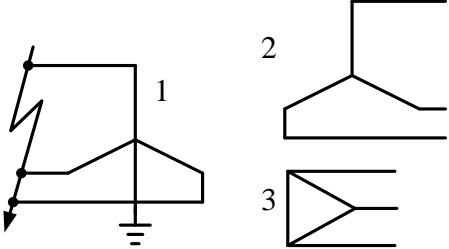
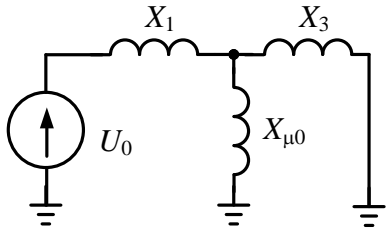
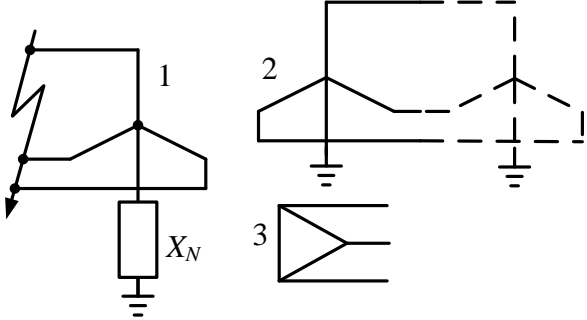
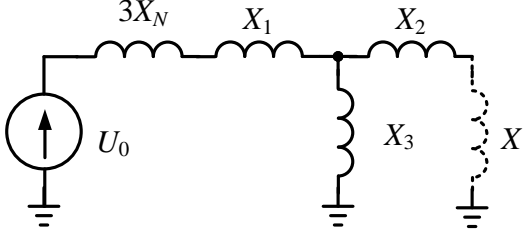
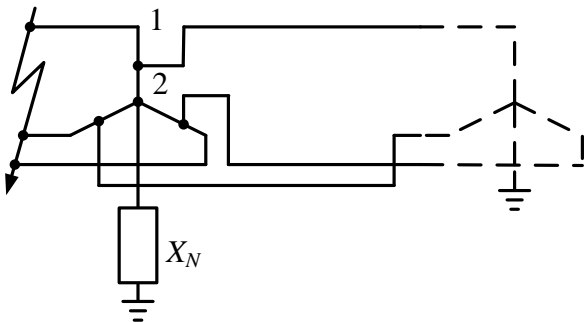
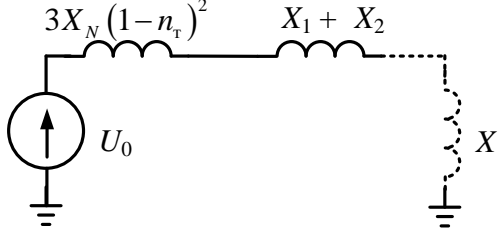
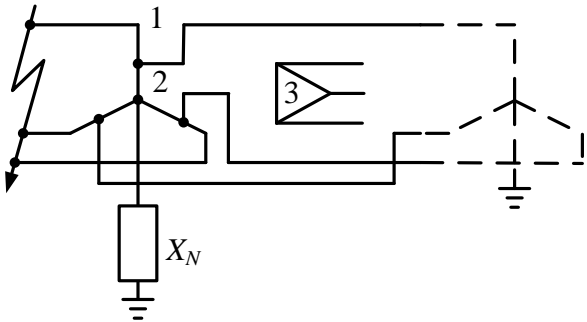
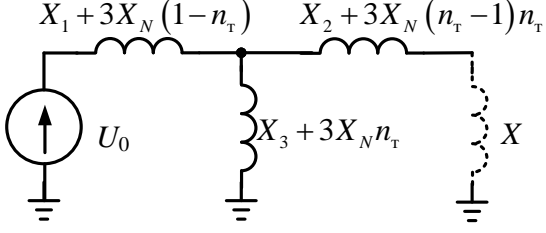
Схема соединения обмоток	Схема замещения
 <p data-bbox="244 1290 778 1323">Двухобмоточный трансформатор Y_0/Δ</p>	
 <p data-bbox="244 1565 778 1599">Двухобмоточный трансформатор Y_0/Y</p>	
 <p data-bbox="236 1841 786 1874">Двухобмоточный трансформатор Y_0/Y_0</p>	

Схема соединения обмоток	Схема замещения
 <p data-bbox="233 472 791 504">Трехобмоточный трансформатор $Y_0/\Delta/\Delta$</p>	
 <p data-bbox="233 775 791 808">Трехобмоточный трансформатор $Y_0/Y/\Delta$</p>	
 <p data-bbox="180 1140 839 1207">Трехобмоточный трансформатор (заземление нейтрали через индуктивное сопротивление X_N)</p>	
 <p data-bbox="165 1556 858 1628">Двухобмоточный автотрансформатор (заземление нейтрали через индуктивное сопротивление X_N)</p>	
 <p data-bbox="165 1977 858 2042">Трехобмоточный автотрансформатор (заземление нейтрали через индуктивное сопротивление X_N)</p>	

На схемах U_0 – источник напряжения нулевой последовательности; X_1 – индуктивное сопротивление обмотки 1, соединенной в звезду с заземленной нейтралью; X_2, X_3 – сопротивления обмоток 2 и 3, приведенные к обмотке 1; $X_{\mu 0}$ – сопротивление ветви намагничивания тока нулевой последовательности, $n_T = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}$.

При любом конструктивном исполнении трансформатора $X_{\mu 0} \gg X_2$ или $X_{\mu 0} \gg X_3$ сопротивление $X_{\mu 0}$ считается бесконечно большим и ветвь с ним в расчетах не учитывается.

6.3. Сопротивления элементов тока отдельных последовательностей

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, 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 симметричной трехфазной системы токов взаимоиנדукция между фазами элемента не меняется. Таким образом, для трансформаторов, автотрансформаторов, ВЛ, КЛ и реакторов $R_1 = R_2, X_1 = X_2$.

Реактивное сопротивление обратной последовательности элементов (синхронные генераторы, компенсаторы, двигатели) с вращающимися электромагнитными полями зависит от конструкции машины (симметричности ротора). Токи обратной последовательности образуют магнитный поток, который перемещается относительно статора с синхронной скоростью в обратном направлении. При своем перемещении этот поток встречает сопротивление в расточке статора, поочередно совмещаясь то с продольной осью ротора, то с поперечной.

Значения реактивного сопротивления обратной последовательности приводятся в каталогах и справочниках как параметры машин. При отсутствии этих данных можно принимать для машин с успокоительными обмотками

$X_2 = 1,22 X_d''$, а для явнополюсных машин без успокоительных обмоток $X_2 = 1,45 X_d'$. В приближенных практических расчетах обычно идут на дополнительное упрощение, полагая для турбогенераторов и машин с продольно-поперечными успокоительными обмотками $X_2 \approx X_d''$. Для асинхронных двигателей сопротивление обратной последовательности можно считать также равным их сверхпереходному сопротивлению $X_2 = X_d''$, которое определяется выражением:

$$X_{*2} \approx 1 / I_{* \text{пуск}}^2,$$

где $I_{* \text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$ – каталожное значение кратности пускового тока двигателя по отношению к его номинальному току.

Реактивное сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электрической энергии и относительной роли каждого из них в создании нагрузки. Для средней типовой промышленной нагрузки можно полагать, что основная её часть состоит из асинхронных двигателей, реактивное сопротивление обратной последовательности которых практически такое же, как и в начальный момент внезапного нарушения режима, т. е. $X_{*2} = X_{*1} = 0,35$ о. е.

Сопротивление нулевой последовательности элементов 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 рассматриваемого элемента и схемы заземления нейтрали. Если пути для прохождения токов нулевой последовательности нет, то это равносильно сопротивлению в цепи, равному бесконечности.

В синхронных машинах с заземленной нейтралью протекают токи нулевой последовательности, которые создают одинаковые по значению и совпадающие по времени магнитные потоки. Поскольку фазовые обмотки машины сдвинуты по окружности статора на 120° , магнитные потоки нулевой последовательности

машины будут сдвинуты в пространстве друг относительно друга также на 120° . Поэтому можно считать, что результирующий магнитный поток нулевой последовательности в расточке машины равен нулю и реакции ротора не вызывает.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности синхронных машин определяется рассеянием магнитного потока в пазах и лобовых частях, причем по значению оно меньше, чем при симметричном трехфазном потоке. Это уменьшение зависит от типа обмотки, из-за чего реактивное сопротивление синхронных машин колеблется в широких пределах: $X_0 = (0,15-0,60) X_d''$.

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

Основные нагрузочные ответвления, как правило, работают с изолированной нейтралью, так что пути для токов нулевой последовательности здесь нет. По этой причине можно считать, что реактивное сопротивление нулевой последовательности нагрузочных ответвлений равно бесконечности и вносить их в эквивалентную схему нулевой последовательности не требуется.

Реактивное сопротивление реакторов в основном определяется их самоиндукцией. Если речь идет о взаимной индукции, то она играет меньшую роль в создании общего реактивного сопротивления реактора из-за большого расстояния между катушками. С учетом этого реактивное сопротивление нулевой последовательности реактора можно полагать равным сопротивлению прямой последовательности.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности ВЛ зависит от её конструктивных особенностей (одноцепная, двухцепная, наличие или отсутствие проводящего стального троса). Расчетные выражения для x_0 в каждом случае берутся из справочника.

Для практических расчетов токов короткого замыкания средние значения соотношений между индуктивными сопротивлениями нулевой последовательности X_0 и прямой последовательности X_1 для воздушных линий можно считать следующими:

Одноцепная ЛЭП без тросов	3,5
То же со стальными тросами	3,0
То же с хорошо проводящими тросами	2,0
Двухцепная ЛЭП без тросов	5,5
То же со стальными тросами	4,7
То же с хорошо проводящими тросами	3,0

Для КЛ сопротивление X_0 зависит от типа кабеля, способа его прокладки, параметров оболочки кабеля, характера ее заземления, параметров заземлителей и т. п.

$$X_0 = (3,5-4,6) X_1.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается суть метода симметричных составляющих?
2. В чем заключается необходимость применения метода симметричных составляющих?
3. Каковы основные положения метода симметричных составляющих?
4. Каковы условия для прохождения тока нулевой последовательности через трансформатор?
5. Чем следует руководствоваться при составлении схем замещения трансформаторов и автотрансформаторов для токов нулевой последовательности?
6. Что влияет на величину индуктивного сопротивления нулевой последовательности линии?
7. Что выбирается в качестве точки начала схемы замещения прямой или обратной последовательности?
8. Чему равно сопротивление обратной последовательности АД?
9. Какое влияние оказывает грозозащитный трос на сопротивление нулевой последовательности воздушной линии?
10. Чему равно сопротивление обратной последовательности синхронной машины?

ГЛАВА 7. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КЗ

7.1. Основные допущения и положения

В трехфазной электрической сети около 5 % коротких замыканий являются трехфазными, причем в некоторых случаях токи несимметричных коротких замыканий превышают токи трехфазных. При несимметричных коротких замыканиях напряжение в месте короткого замыкания не равно нулю. При расчете методом симметричных составляющих в общем случае необходимо найти три составляющие тока короткого замыкания и три составляющие напряжения короткого замыкания.

Принятые допущения метода симметричных составляющих:

- а) ЭДС обратной и нулевой последовательностей равны нулю;
- б) токи прямой, обратной и нулевой последовательностей положительны, если направлены к точке КЗ.

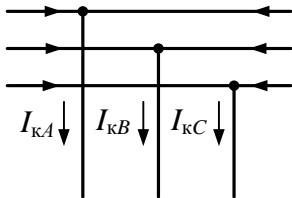


Рис. 7.1. Фиктивное ответвление в месте КЗ

Для наглядности представления условий нахождения различных фаз при несимметричных КЗ полагают, что замыкание произошло не на проводниках электроустановки, а на воображаемых от них ответвлениях, не имеющих сопротивлений (рис. 7.1). Токи этих ответвлений при КЗ и являются искомыми токами КЗ.

При несимметричных КЗ одна фаза находится в условиях, отличных от других, и называется особой фазой. В расчетах в качестве особой принимается фаза *A*.

Для принятых допущений справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} U_{A1} = E_{1\text{рез}} - jI_{A1}X_{1\text{рез}} \\ U_{A2} = 0 - jI_{A2}X_{2\text{рез}} \\ U_{A0} = 0 - jI_{A0}X_{0\text{рез}} \end{cases} \quad (7.1)$$

Для каждого короткого замыкания в ответвлении возникают условия, его характеризующие, которые называются граничными условиями.

7.2. Однофазное короткое замыкание

На схемах однофазное короткое замыкание обозначается $K^{(1)}$. Граничные условия для однофазного короткого замыкания ([рис. 7.2](#)):

- 1) напряжение в поврежденной (особой) фазе равно нулю: $U_{кА}^{(1)} = 0$.
- 2) токи в неповрежденных фазах равны нулю: $I_{кВ}^{(1)} = 0$, $I_{кС}^{(1)} = 0$.

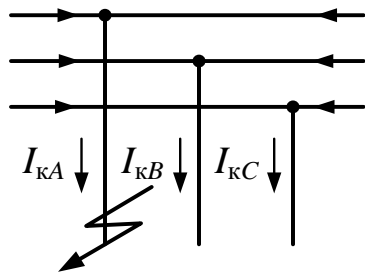


Рис. 7.2. Однофазное КЗ

Граничные условия, выраженные через симметричные составляющие с учетом [\(6.1\)](#), примут вид:

$$U_{кА1}^{(1)} + U_{кА0}^{(1)} + U_{кА0}^{(1)} = 0; \quad (7.2)$$

$$I_{A1}^{(1)} = I_{A2}^{(1)} = I_{A0}^{(1)} = \frac{1}{3}I_{кА}^{(1)}. \quad (7.3)$$

Из первого уравнения (7.1) с учетом (7.2) и (7.3) получим формулу для определения $I_{A1}^{(1)}$:

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

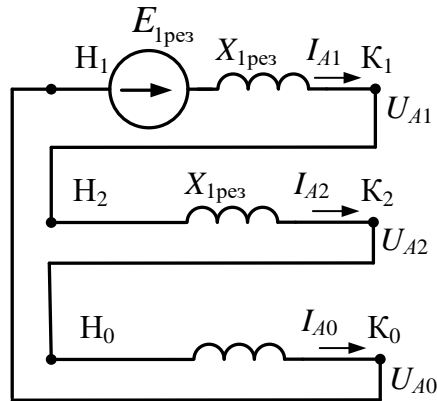


Рис. 7.3. Упрощенная комплексная схема замещения для однофазного КЗ

Ток в аварийной фазе:

$$I_{\text{кА}}^{(1)} = I_{A1}^{(1)} + I_{A2}^{(1)} + I_{A0}^{(1)} = 3I_{A1}^{(1)} = \frac{3E_{1\text{pez}}}{j(X_{1\text{pez}} + X_{2\text{pez}} + X_{0\text{pez}})}.$$

Коэффициент взаимосвязи токов:

$$m^{(1)} = \frac{I_{\text{кА}}^{(1)}}{I_{A1}^{(1)}} = 3.$$

Напряжения симметричных составляющих:

$$U_{A0}^{(1)} = -jI_{A1}^{(1)}X_{0\text{pez}}; \quad U_{A2}^{(1)} = -jI_{A1}^{(1)}X_{2\text{pez}};$$

$$U_{A1}^{(1)} = -U_{A2}^{(1)} - U_{A0}^{(1)} = jI_{A1}^{(1)}(X_{2\text{pez}} + X_{0\text{pez}}).$$

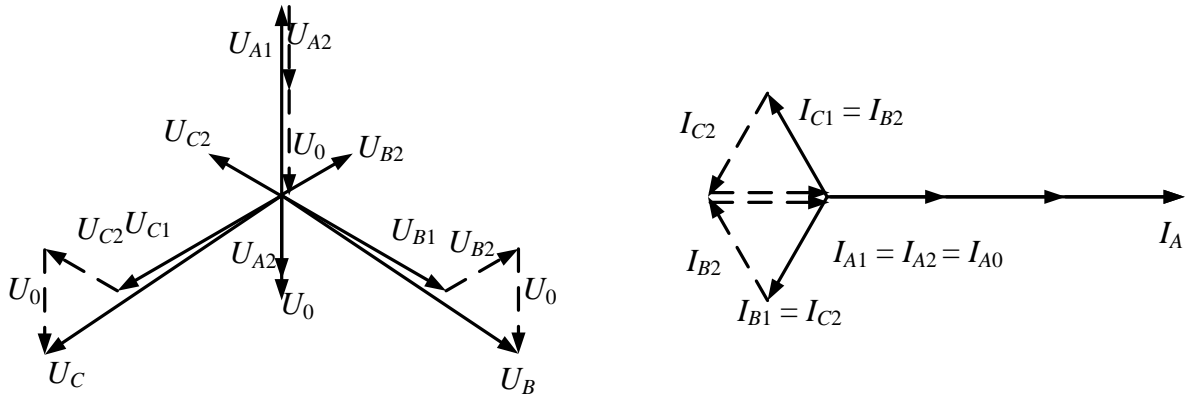


Рис. 7.4. Векторные диаграммы токов и напряжений однофазного КЗ

Соотношения между симметричными составляющими тока особой фазы в месте КЗ дают возможность соединить между собой схемы замещения отдельных последовательностей и получить комплексную схему замещения для однофазного КЗ (рис. 7.3), а также построить векторные диаграммы тока и напряжения однофазного КЗ, изображенные на рис. 7.4.

7.3. Двухфазное короткое замыкание

На схемах двухфазное короткое замыкание обозначается $K^{(2)}$. Граничные условия для однофазного короткого замыкания (рис. 7.5):

- 1) ток в неповрежденной (особой) фазе равен нулю: $I_{кА}^{(2)} = 0$.
- 2) сумма токов поврежденных фаз равна нулю: $I_{кВ}^{(2)} + I_{кС}^{(2)} = 0$.
- 3) напряжения в месте КЗ в поврежденных фазах одинаковы: $U_{кВ}^{(2)} = U_{кС}^{(2)}$.

Из (6.1) известно, что

$$I_{кА}^{(2)} + I_{кВ}^{(2)} + I_{кС}^{(2)} = 3I_{А0}^{(2)}. \quad (7.4)$$

Таким образом, граничные условия, выраженные через симметричные составляющие с учетом (6.1) и (7.4), примут вид:

$$I_{А0}^{(2)} = 0;$$

$$I_{A1}^{(2)} = -I_{A2}^{(2)}; \quad (7.5)$$

$$U_{A1}^{(2)} = U_{A2}^{(2)}. \quad (7.6)$$

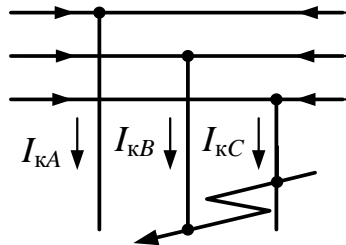


Рис. 7.5. Двухфазное КЗ

Из уравнений (7.1), учитывая соотношения (7.5) и (7.6), получаем:

$$I_{A1}^{(2)} = \frac{E_{1\text{рез}}}{j(X_{1\text{рез}} + X_{2\text{рез}})}.$$

Токи в поврежденных фазах:

$$I_{кВ}^{(2)} = a^2 I_{A1}^{(2)} + a I_{A2}^{(2)} = (a^2 - a) I_{A1}^{(2)} = -j\sqrt{3} I_{A1}^{(2)};$$

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

Коэффициент взаимосвязи токов $m^{(2)}$:

$$m^{(2)} = \frac{I_{кВ}^{(2)}}{I_{A1}^{(2)}} = \frac{I_{кС}^{(2)}}{I_{A1}^{(2)}} = \sqrt{3}.$$

Абсолютное значение полного тока двухфазного короткого замыкания:

$$I_{к}^{(2)} = \sqrt{3} I_{A1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} E_{1\text{рез}}}{(X_{1\text{рез}} + X_{2\text{рез}})}.$$

Напряжения симметричных составляющих:

$$U_{A0}^{(2)} = 0;$$

$$U_{A1}^{(2)} = U_{A2}^{(2)} = jI_{A1}^{(2)} X_{2\text{pez}}.$$

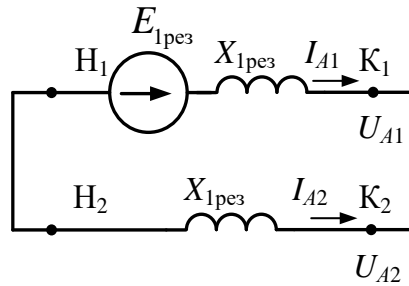


Рис. 7.6. Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ

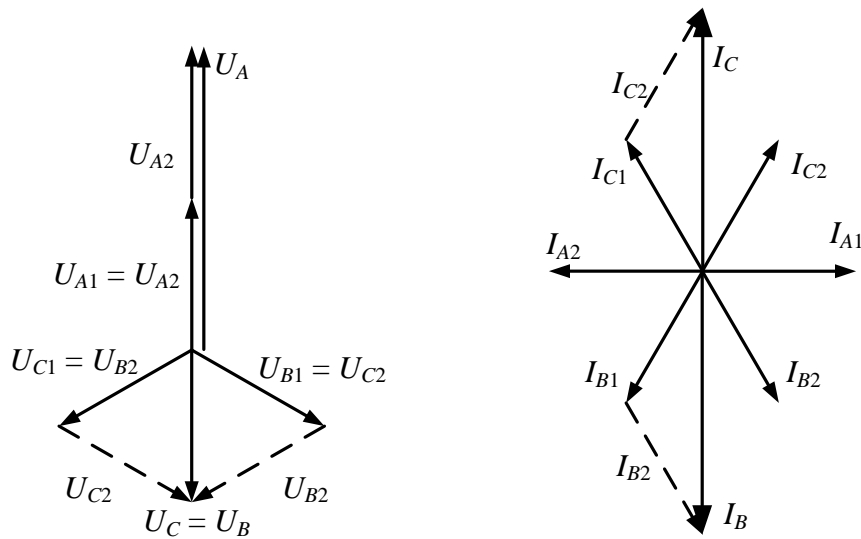


Рис. 7.7. Векторные диаграммы токов и напряжений двухфазного КЗ

Соотношения между симметричными составляющими тока особой фазы в месте КЗ дают возможность соединить между собой схемы замещения отдельных последовательностей и получить комплексную схему замещения для двухфазного КЗ (рис. 7.6). Полученные выражения также позволяют построить векторные диаграммы токов и напряжений однофазного КЗ, изображенные на рис. 7.7.

7.4. Двухфазное короткое замыкание на землю

На схемах двухфазное короткое замыкание на землю обозначается $K^{(1,1)}$.

Граничные условия для двухфазного короткого замыкания на землю ([рис. 7.8](#)):

1. Ток в неповрежденной (особой) фазе равен нулю: $I_{кА}^{(1,1)} = 0$.

2. Напряжения в месте КЗ в поврежденных фазах равны нулю:

$$U_{кВ}^{(1,1)} = U_{кС}^{(1,1)} = 0.$$

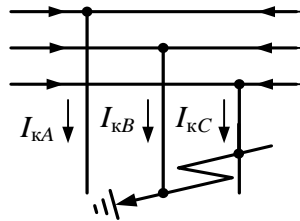


Рис. 7.8. Двухфазное КЗ

Граничные условия, выраженные через симметричные составляющие с учетом ([6.1](#)), примут вид:

$$I_{A1}^{(1,1)} + I_{A0}^{(1,1)} + I_{A0}^{(1,1)} = 0; \quad (7.7)$$

$$U_{A1}^{(1,1)} = U_{A2}^{(1,1)} = U_{A0}^{(1,1)} = \frac{1}{3} U_{кА}^{(1,1)}. \quad (7.8)$$

Из второго и третьего уравнения ([7.1](#)) с учетом ([7.8](#)) получаем:

$$I_{A0}^{(1,1)} = \frac{X_{2рез}}{X_{0рез}} I_{A2}^{(1,1)}. \quad (7.9)$$

Подставив полученное выражение в ([7.7](#)), получим:

$$I_{A2}^{(1,1)} = -\frac{I_{A1}^{(1,1)}}{1 + \frac{X_{2рез}}{X_{0рез}}} I_{A1}^{(1,1)} = -\frac{X_{0рез}}{X_{0рез} + X_{2рез}} I_{A1}^{(1,1)}. \quad (7.10)$$

С учетом (7.10) выражение (7.9) примет вид:

$$I_{A0}^{(1,1)} = -\frac{X_{2\text{рез}}}{X_{0\text{рез}} + X_{2\text{рез}}} I_{A1}^{(1,1)}. \quad (7.11)$$

Из первых двух уравнений системы (7.1) с учетом (7.10) и (7.11) получаем:

$$I_{A1}^{(1,1)} = \frac{E_{1\text{рез}}}{j \left(X_{1\text{рез}} + \frac{X_{2\text{рез}} X_{0\text{рез}}}{X_{2\text{рез}} + X_{0\text{рез}}} \right)}.$$

Токи в поврежденных фазах:

$$I_{\text{кВ}}^{(1,1)} = a^2 I_{A1}^{(1,1)} + a I_{A2}^{(1,1)} + I_{A0}^{(1,1)} = \left(a^2 - \frac{a X_{0\text{рез}} + X_{2\text{рез}}}{X_{0\text{рез}} + X_{2\text{рез}}} \right) I_{A1}^{(1,1)};$$

$$I_{\text{кС}}^{(1,1)} = a I_{A1}^{(1,1)} + a^2 I_{A2}^{(1,1)} + I_{A0}^{(1,1)} = \left(a - \frac{a^2 X_{0\text{рез}} + X_{2\text{рез}}}{X_{0\text{рез}} + X_{2\text{рез}}} \right) I_{A1}^{(1,1)}.$$

Модули токов в поврежденных фазах равны:

$$I_{\text{к}}^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\text{рез}} X_{0\text{рез}}}{(X_{2\text{рез}} + X_{0\text{рез}})^2}} I_{A1}^{(1,1)}.$$

Коэффициент взаимосвязи тока прямой последовательности полного тока:

$$m^{(1,1)} = \frac{I_{\text{кВ}}^{(1,1)}}{I_{A1}^{(1,1)}} = \frac{I_{\text{кС}}^{(1,1)}}{I_{A1}^{(1,1)}} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\text{рез}} X_{0\text{рез}}}{(X_{2\text{рез}} + X_{0\text{рез}})^2}} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{X_{2\text{рез}}^2 + X_{2\text{рез}} X_{0\text{рез}} + X_{0\text{рез}}^2}}{X_{2\text{рез}} + X_{0\text{рез}}}.$$

Симметричные составляющие напряжений:

$$U_{A1}^{(1,1)} = U_{A2}^{(1,1)} = U_{A0}^{(1,1)} = \frac{X_{2\text{рез}} X_{0\text{рез}}}{X_{0\text{рез}} + X_{2\text{рез}}} I_{A1}^{(1,1)}.$$

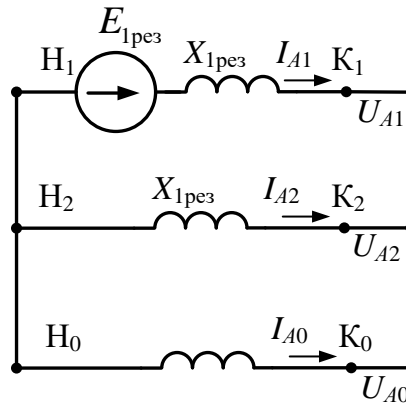


Рис. 7.9. Комплексная схема замещения для двухфазного КЗ на землю

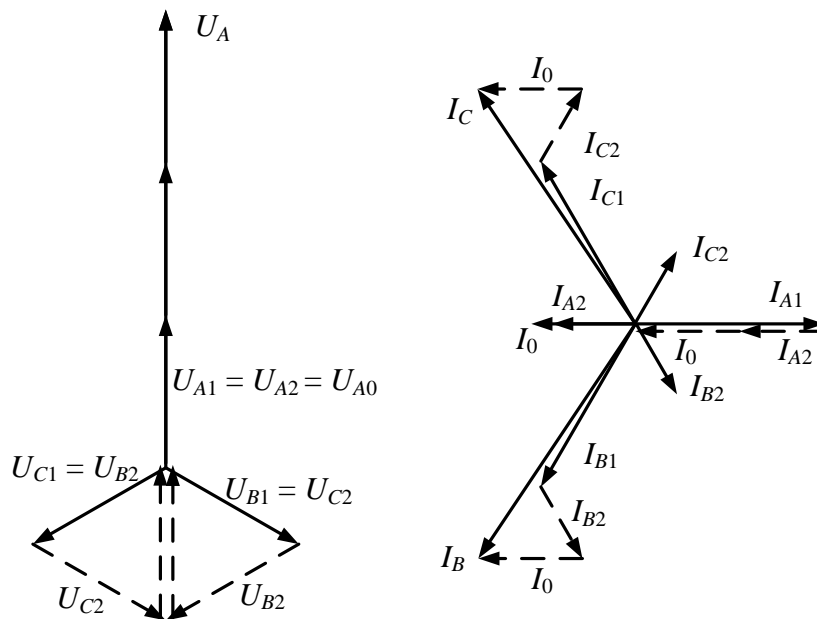


Рис. 7.10. Векторные диаграммы токов и напряжений двухфазного КЗ на землю

Соотношения между симметричными составляющими тока особой фазы в месте КЗ дают возможность соединить между собой схемы замещения отдельных последовательностей и получить комплексную схему замещения

для двухфазного КЗ на землю ([рис. 7.9](#)). Полученные выражения позволяют построить векторные диаграммы токов и напряжений двухфазного КЗ на землю, изображенных на [рис. 7.10](#).

7.5. Правило эквивалентности прямой последовательности

Как следует из п. 7.2–7.4, при любом несимметричном КЗ токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте короткого замыкания. Следовательно, задача расчета несимметричного КЗ состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте короткого замыкания.

Структура формул для определения токов прямой последовательности позволяет представить их в общем виде для разных видов несимметричных (n) коротких замыканий.

$$I_{A1}^{(n)} = \frac{E_{1\text{рез}}}{j(X_{1\text{рез}} + X_{\Delta}^{(n)})}, \quad (7.12)$$

где верхний индекс (n) означает вид КЗ; $X_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительное сопротивление в зависимости от вида короткого замыкания ([табл. 7.1](#)).

В общем виде модуль фазного тока в месте КЗ может быть представлен в следующем виде:

$$I_{\text{к}}^{(n)} = m^{(n)} I_{A1}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида КЗ (определяется по [табл. 7.1](#)).

Напряжение прямой последовательности в месте КЗ может быть представлено в виде:

$$U_{A1}^{(n)} = X_{\Delta}^{(n)} I_{A1}^{(n)}.$$

Значения дополнительных сопротивлений $X_{\Delta}^{(n)}$ и коэффициента $m^{(n)}$

Вид КЗ	$X_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трёхфазное, К ⁽³⁾	0	1
Однофазное, К ⁽¹⁾	$X_{2рез} + X_{0рез}$	3
Двухфазное, К ⁽²⁾	$X_{2рез}$	$\sqrt{3}$
Двухфазное на землю, К ^(1,1)	$\frac{X_{2рез} X_{0рез}}{X_{2рез} + X_{0рез}}$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2рез} X_{0рез}}{(X_{2рез} + X_{0рез})^2}}$

Форма записи (7.12) дает возможность сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности:

Ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания может быть определен как ток при трехфазном коротком замыкании в точке, удаленной от действительной точки короткого замыкания на дополнительное сопротивление $X_{\Delta}^{(n)}$.

Это сопротивление не зависит от параметров схемы прямой последовательности и для каждого вида короткого замыкания вычисляется по результирующему сопротивлению обратной и нулевой последовательности относительно рассматриваемой точки схемы.

Пример решения задачи

Задача

Рассчитать ток однофазного КЗ в точке К (рис. 7.11) и построить векторные диаграммы токов и напряжений, а также эпюры напряжений симметричных составляющих напряжения.

Исходные данные

Параметры генератора G:

$$P_{Г.НОМ} = 100 \text{ МВт}; \quad \cos(\varphi) = 0,8; \quad U_{Г.НОМ} = 10 \text{ кВ}; \quad X''_{* d.НОМ} = 0,1 \text{ о. е.}; \quad X_2 = X_1;$$

$$E''_{* Г.НОМ} = 1,1 \text{ о. е.}$$

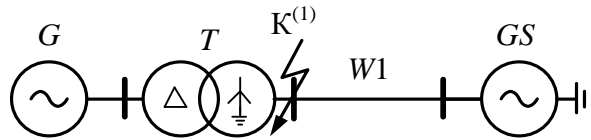


Рис. 7.11. Расчетная схема к примеру

Параметры трансформатора T :

$$S_{\text{т.ном}} = 120 \text{ МВ} \cdot \text{А}; u_{\text{к}} = 10 \% ; U_{\text{н.н}} = 10 \text{ кВ}; U_{\text{в.н}} = 115 \text{ кВ}; X_2 = X_1.$$

Параметры линии W :

$$x_{\text{уд}} = 0,4 \text{ Ом/км}; l = 50 \text{ км}; X_2 = X_1; X_0 = 3 \cdot X_1.$$

Параметры энергосистемы GS :

$$S_{\text{к}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}; E''_{* \text{ с.ном}} = 1 \text{ о. е.}$$

Решение

Расчет проведем в относительных единицах, используя приближенное приведение параметров. Следовательно, базисные напряжения на каждой ступени будут равны их среднономинальным напряжениям. Так как в расчетах все величины представлены в относительных единицах, знак «*» в обозначениях опускаем.

Выберем базисную мощность $S_{\text{б}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Тогда базисный ток основной ступени будет равен:

$$I_{\text{б1}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном.1}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}.$$

Схемы замещения для каждой последовательности представлены на [рис. 7.12](#). Схема замещения обратной последовательности отличается от схемы замещения прямой отсутствием ЭДС источников. Так как трансформатор T соединен по схеме Y_0/Δ и КЗ произошло на стороне Y_0 , в схеме замещения нулевой последовательности трансформатор представлен своим сопротивлением.

Элементы схемы замещения нулевой последовательности со стороны обмотки трансформатора, соединенной Δ , зашунтированы.

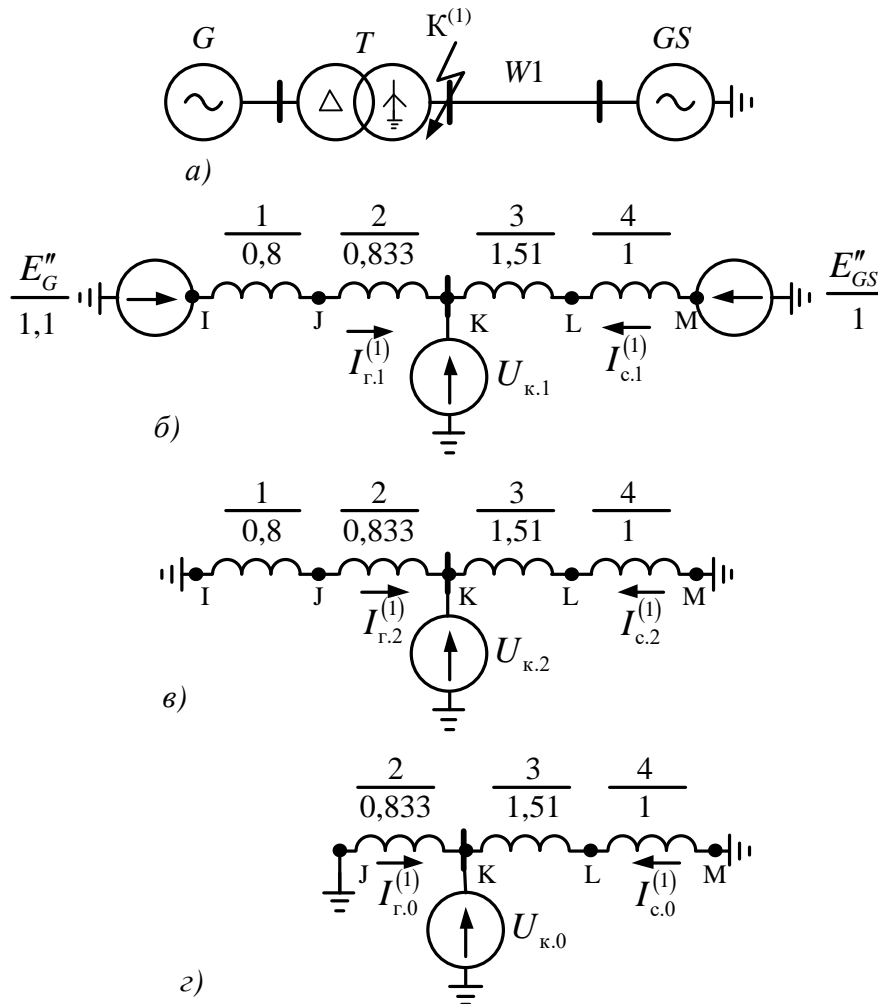


Рис. 7.12. Расчетная схема и схемы замещения отдельных последовательностей:

а) расчетная схема; б) схема прямой последовательности; в) схема обратной последовательности; г) схема нулевой последовательности

Рассчитаем сопротивления прямой последовательности в о. е.

$$X_{1.1} = X_{G.1} = X''_* \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ.Г}}} = X''_* \frac{S_{\bar{6}} \cos(\varphi)}{P_{\Gamma}} = 0,1 \cdot \frac{1000 \cdot 0,8}{100} = 0,8 \text{ о. е.};$$

$$X_{2.1} = X_{T.1} = \frac{u_{K.}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{1000}{120} = 0,833 \text{ о. е.};$$

$$X_{3.1} = X_{w.1} = x_{уд1} l_1 \frac{S_6}{U_{ср.ном.1}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,51 \text{ о. е.};$$

$$X_{4.1} = X_{GS.1} = \frac{S_6}{S_k} = \frac{1000}{1000} = 1 \text{ о. е.}$$

Сопротивления элементов обратной последовательности равны сопротивлениям прямой.

Рассчитаем сопротивления прямой последовательности в о. е.:

$$X_{2.0} = X_{T.0} = X_{T.1} = 0,833 \text{ о. е.};$$

$$X_{3.0} = X_{w.0} = 3X_{w.1} = 3 \cdot 1,51 = 4,53 \text{ о. е.};$$

$$X_{4.0} = X_{GS.0} = 0,9X_{GS.1} = 0,9 \cdot 1 = 0,9 \text{ о. е.}$$

Результирующие ЭДС и сопротивление токам прямой последовательности соответственно равны:

$$E_{рез.1} = \frac{E_G''(X_{3.1} + X_{4.1}) + E_{GS}''(X_{1.1} + X_{2.1})}{X_{1.1} + X_{2.1} + X_{3.1} + X_{4.1}} = \frac{1,1 \cdot 2,51 + 1 \cdot 1,633}{1,633 + 2,51} = 1,061 \text{ о. е.};$$

$$X_{рез.1} = \frac{(X_{1.1} + X_{2.1})(X_{3.1} + X_{4.1})}{X_{1.1} + X_{2.1} + X_{3.1} + X_{4.1}} = \frac{1,633 \cdot 2,51}{1,633 + 2,51} = 0,989 \text{ о. е.}$$

Результирующее сопротивление токам обратной последовательности равно результирующему сопротивлению прямой: $X_{рез.2} = X_{рез.1} = 0,989$.

Результирующее сопротивление токам нулевой последовательности

$$X_{рез.0} = \frac{X_{2.0}(X_{3.0} + X_{4.0})}{X_{2.0} + X_{3.0} + X_{4.0}} = \frac{0,833(4,53 + 0,9)}{0,833 + 4,53 + 0,9} = 0,722 \text{ о. е.}$$

Определим ток прямой последовательности однофазного КЗ в о. е. по правилу эквивалентности токов прямой последовательности:

$$I_{к.1}^{(1)} = \frac{E_{\text{рез.1}}}{j(X_{\text{рез.1}} + X_{\Delta}^{(1)})} = \frac{1,061}{j(0,989 + 1,711)} = -j0,393 \text{ о. е.},$$

где

$$X_{\Delta}^{(1)} = X_{\text{рез.2}} + X_{\text{рез.0}} = 0,989 + 0,722 = 1,711 \text{ о. е.}$$

Для однофазного КЗ коэффициент взаимосвязи $m^{(1)} = 3$, и ток однофазного КЗ равен:

$$I_{\kappa}^{(1)} = m^{(1)} I_{к.1}^{(1)} I_{\delta 1} = -3 \cdot j \cdot 0,393 \cdot 0,502 = -j5,92 \text{ кА.}$$

Векторная диаграмма токов представлена на [рис. 7.13](#).

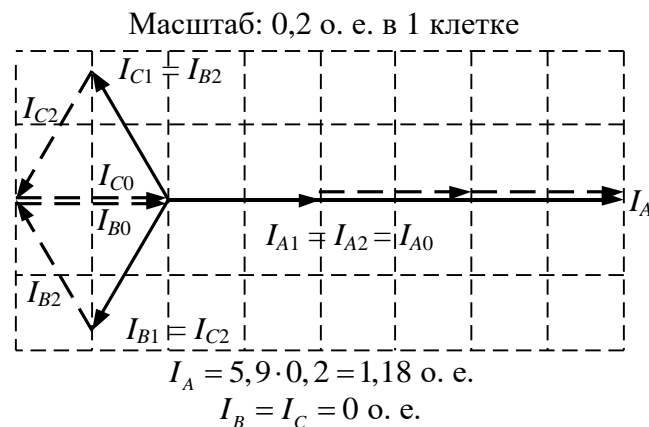


Рис. 7.13. Векторная диаграмма токов в месте однофазного КЗ

Напряжения симметричных составляющих в месте КЗ в о. е.:

$$U_{к.1}^{(1)} = j I_{к.1}^{(1)} X_{\Delta}^{(1)} = j(-j \cdot 0,393)1,711 = 0,672 \text{ о. е.};$$

$$U_{к.2}^{(1)} = -j I_{к.1}^{(1)} X_{\text{рез.2}} = -j(-j \cdot 0,393)0,989 = -0,3887 \text{ о. е.};$$

$$U_{к.0}^{(1)} = -jI_{к.1}^{(1)}X_{рез.0} = -j(-j \cdot 0,393)0,722 = -0,2837 \text{ о. е.}$$

На основании схемы замещения ([рис. 7.12, а](#)) токи прямой последовательности в ветвях генератора и системы равны:

$$I_{г.1}^{(1)} = \frac{E_g'' - U_{к.1}}{X_{1.1} + X_{2.1}} = \frac{1,1 - 0,672}{j \cdot 0,8 + j \cdot 0,833} = -j \cdot 0,262 \text{ о. е.};$$

$$I_{с.1}^{(1)} = \frac{E_c'' - U_{к.1}}{X_{3.1} + X_{4.1}} = \frac{1 - 0,672}{j \cdot 1,51 + j \cdot 1} = -j \cdot 0,131 \text{ о. е.}$$

На основании схемы замещения ([рис. 7.12, б](#)) токи обратной последовательности в ветвях генератора и системы равны:

$$I_{г.2}^{(1)} = \frac{-U_{к.2}}{X_{1.2} + X_{2.2}} = \frac{-(-0,389)}{j \cdot 0,8 + j \cdot 0,833} = -j \cdot 0,238 \text{ о. е.};$$

$$I_{с.2}^{(1)} = \frac{-U_{к.2}}{X_{3.2} + X_{4.2}} = \frac{-(-0,389)}{j \cdot 1,51 + j \cdot 1} = -j \cdot 0,155 \text{ о. е.}$$

На основании схемы замещения ([рис. 7.12, в](#)) токи нулевой последовательности в ветвях генератора и системы равны:

$$I_{г.0}^{(1)} = \frac{-U_{к.0}}{X_{2.0}} = \frac{-(-0,2837)}{j \cdot 0,833} = -j \cdot 0,341 \text{ о. е.};$$

$$I_{с.0}^{(1)} = \frac{-U_{к.0}}{X_{3.0} + X_{4.0}} = \frac{-(-0,2837)}{j \cdot 4,53 + j \cdot 1} = -j \cdot 0,052 \text{ о. е.}$$

Напряжения прямой последовательности, согласно схеме замещения

(рис. 7.12, б), в указанных точках равны:

$$U_{K.1} = U_{K.1} = 0,672 \text{ о. е.};$$

$$U_{J.1} = U_{K.1} + jI_{r.1}^{(1)}X_{2.1} = 0,672 + j(-j \cdot 0,262)0,833 = 0,89 \text{ о. е.};$$

$$U_{I.1} = U_{K.1} + jI_{r.1}^{(1)}(X_{2.1} + X_{1.1}) = 0,672 + j(-j \cdot 0,262)(0,833 + 0,8) = 1,1 \text{ о. е.};$$

$$U_{L.1} = U_{K.1} + jI_{c.1}^{(1)}X_{3.1} = 0,672 + j(-j \cdot 0,131)1,51 = 0,87 \text{ о. е.};$$

$$U_{M.1} = U_{K.1} + jI_{c.1}^{(1)}(X_{3.1} + X_{4.1}) = 0,672 + j(-j \cdot 0,131)(1,51 + 1) = 1 \text{ о. е.}$$

Следует обратить внимание, что напряжения в точках I и M равны величинам ЭДС у соответствующих точек: $U_{I.1} = E_r'' = 1,1 \text{ о. е.}$, $U_{M.1} = E_c'' = 1 \text{ о. е.}$

Напряжения обратной последовательности, согласно схеме замещения (рис. 7.12, в), в указанных точках равны:

$$U_{K.2} = U_{K.2} = -0,389 \text{ о. е.};$$

$$U_{J.2} = U_{K.2} + jI_{r.1}^{(1)}X_{2.2} = -0,389 + j(-j \cdot 0,238)0,834 = 0,198 \text{ о. е.};$$

$$U_{I.2} = U_{K.2} + jI_{r.2}^{(1)}(X_{2.2} + X_{1.2}) = -0,389 + j(-j \cdot 0,238)(0,834 + 0,8) = 0 \text{ о. е.};$$

$$U_{L.2} = U_{K.2} + jI_{c.2}^{(1)}X_{3.2} = -0,389 + j(-j \cdot 0,155)1,51 = -0,155 \text{ о. е.};$$

$$U_{M.2} = U_{K.2} + jI_{c.2}^{(1)}(X_{3.2} + X_{4.2}) = -0,389 + j(-j \cdot 0,155)(1,51 + 1) = 0 \text{ о. е.}$$

Напряжения нулевой последовательности, согласно схеме замещения (рис. 7.12, г), в указанных точках равны:

$$U_{K.0} = U_{K.0} = -0,2837 \text{ о. е.};$$

$$U_{J.0} = U_{K.0} + jI_{r.0}^{(1)}X_{2.0} = -0,2837 + j(-j \cdot 0,341)0,834 = 0 \text{ о. е.};$$

$$U_{L,0} = U_{K,0} + jI_{c,0}^{(1)}X_{3,0} = -0,2837 + j(-j \cdot 0,052)4,53 = -0,048 \text{ о. е.};$$

$$U_{M,0} = U_{K,0} + jI_{c,0}^{(1)}(X_{3,0} + X_{4,0}) = -0,2837 + j(-j \cdot 0,052)(4,53 + 0,9) = 0 \text{ о. е.}$$

Эпюры напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей изображены на [рис. 7.14](#).

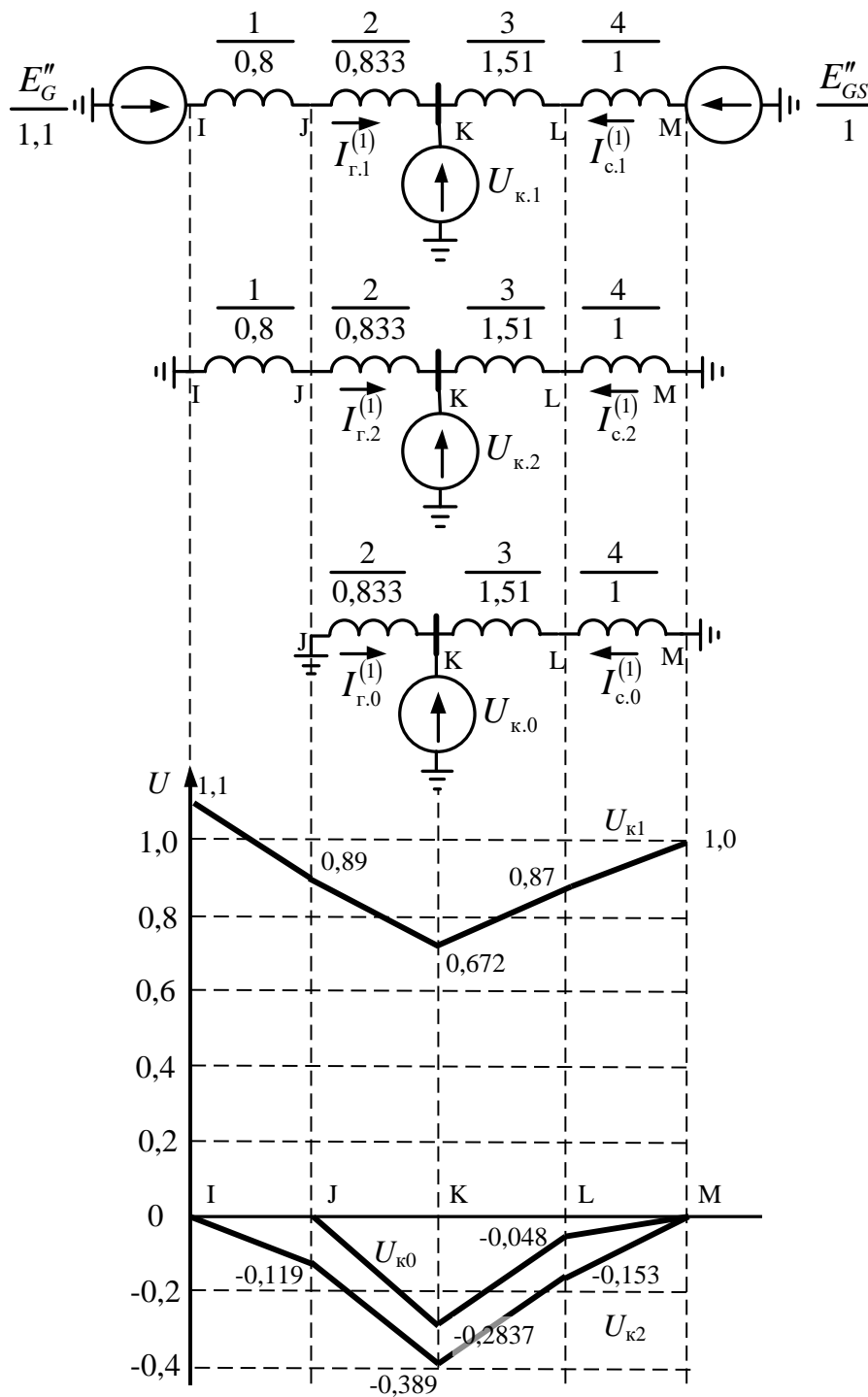


Рис. 7.14. Эпюры напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей

По эпюрам напряжений можно построить векторную диаграмму напряжений для любой точки системы.

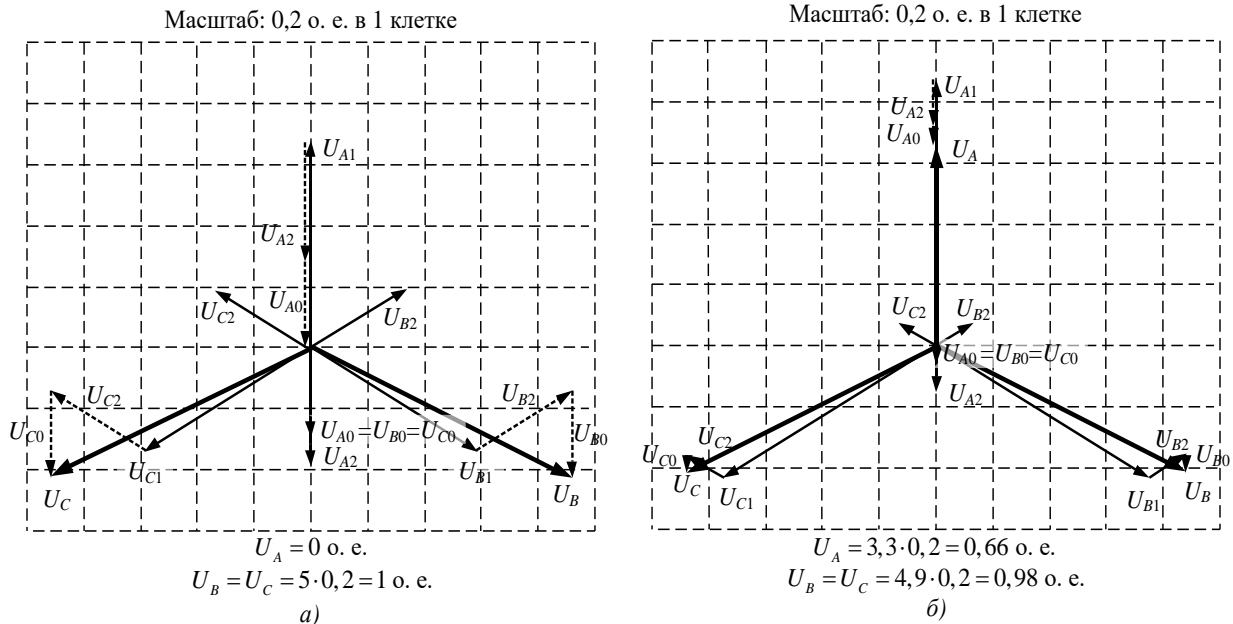


Рис. 7.15. Векторные диаграммы напряжений

а) в точке КЗ; б) в точке L

Следует помнить, что эпюры напряжений дают представление об изменении относительных значений симметричных составляющих напряжения и не учитывают коэффициент трансформации и группу соединения обмоток. Для определения фаз симметричных составляющих следует учесть, что при переходе со стороны ВН трансформатора на НН векторы прямой последовательности поворачиваются на угол $-\frac{\pi}{6} \cdot N$ (по часовой стрелке), а векторы обратной – на

угол $\frac{\pi}{6} \cdot N$ (против часовой стрелки), где N – номер группы соединения обмоток трансформатора. При переходе со стороны НН на ВН угол поворота меняет свой знак на противоположный.

Контрольные вопросы

1. Какая фаза при расчете несимметричных коротких замыканий называется особой?
2. Какие граничные условия принимаются при различных видах несимметричных КЗ?
3. Каково правило эквивалентности прямой последовательности для несимметричных КЗ?
4. Как находятся токи и напряжения различных последовательностей при разных видах несимметричных КЗ?
5. Во сколько раз ток в поврежденной фазе больше тока прямой последовательности при однофазном КЗ?
6. Во сколько раз ток в поврежденных фазах больше тока прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю?
7. Во сколько раз ток в поврежденных фазах больше тока прямой последовательности при двухфазном КЗ?
8. Начертите комплексные схемы замещения при однофазном КЗ.
9. Начертите комплексные схемы замещения при двухфазном КЗ и двухфазном КЗ на землю.

ГЛАВА 8. ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ. ОДНОКРАТНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

8.1. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью

В нормальном режиме работы сети с изолированной нейтралью (рис. 8.1) по фазам протекают токи нагрузки I_n и емкостные (зарядные) токи, обусловленные емкостями фаз на землю. Так как емкостное сопротивление элементов электрической схемы много больше индуктивного и активного сопротивлений, то можно считать, что емкостный ток не зависит от места короткого замыкания.

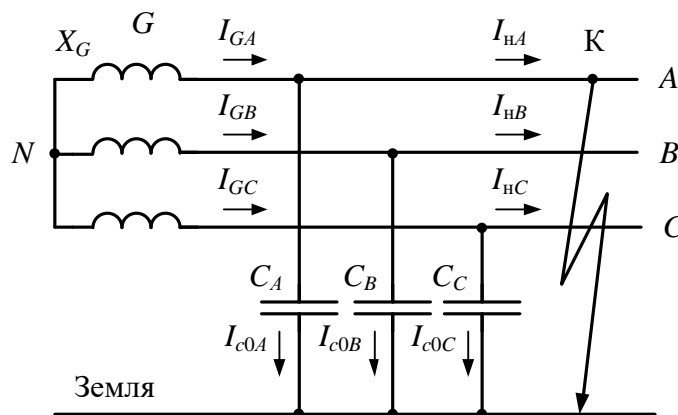


Рис. 8.1. Схема замещения для анализа токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью

Емкостный ток фазы

$$I_{c0} = U_{\phi} \omega C .$$

При нормальном режиме работы тока в земле нет. При однофазном замыкании напряжение поврежденной фазы равно нулю ($U_A = 0$), а напряжение неповрежденных фаз относительно земли возрастает в $\sqrt{3}$ раз (рис. 8.2), что приводит к увеличению в них емкостных токов. Также емкость замкнутой фазы

шунтируется и становится равной нулю. В результате в земле появится ток, равный

$$I_3 = I_c = \sqrt{3}I_{cB} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{c0B} = 3I_{c0} = \frac{3U_\phi}{X_{c0\Sigma}},$$

где $X_{c0\Sigma} = \frac{1}{\omega C}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности линий, электрически связанных с точкой замыкания.

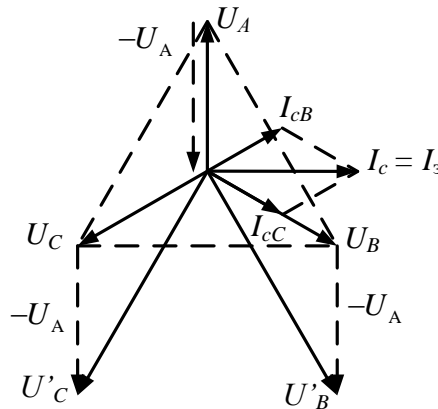


Рис. 8.2. Векторная диаграмма при однофазном замыкании в сетях с изолированной нейтралью

Таким образом, ток замыкания фазы на землю равен утроенному значению емкостного тока в нормальном режиме.

Симметричные составляющие напряжений в месте замыкания на землю определяются по выражению:

$$\begin{cases} \dot{U}_{к1} = \dot{U}_{к0} = \dot{U}_\phi \\ \dot{U}_{к2} = 0 \end{cases}.$$

Опасность таких замыканий заключается в том, что при токах замыкания выше определенных значений, указанных в ПУЭ, возникают перемежающаяся

дуга и дуга перенапряжения. Отсюда повышается вероятность перехода однофазного короткого замыкания в междуфазное. Таким образом, в соответствии с ПУЭ в сетях с изолированной нейтралью при определенных токах замыкания на землю должна выполняться компенсация емкостных токов на землю включением дугогасящего реактора в нейтраль.

Для грубой оценки порядка значения тока замыкания на землю при отсутствии данных о параметрах КЛ сети и конструкции ВЛ можно пользоваться следующей формулой:

$$I_3 = U_{\text{л}} \cdot \sum \frac{l_i}{N_i},$$

где $U_{\text{л}}$ – среднее номинальное значение линейного напряжения ступени, где произошло замыкание, кВ; l_i – длина i -й линии (участка линии); N_i – коэффициент, принимаемый для ВЛ равным 350, для КЛ – равным 10.

8.2. Однократная продольная несимметрия

8.2.1. Общие замечания

Однократная продольная несимметрия может быть следствием разрыва фаз, несимметричности нагрузки, неодновременной пофазной коммутации. В расчетах ее представляют как включение в каждую фазу электрической системы на участке LL' неодинаковых сопротивлений (рис. 8.3).

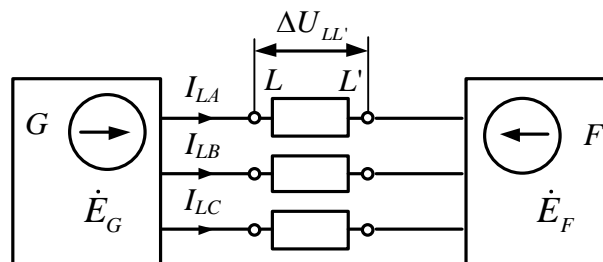


Рис. 8.3. Продольная несимметрия в трехфазной системе

Разрыв в фазе тождественен включению в месте разрыва источника напряжения, равного падению напряжения на концах разорванной фазы. Здесь также эффективно применение метода симметричных составляющих.

Симметричные составляющие падений напряжений в месте несимметрии связаны с симметричными составляющими токов соотношениями:

$$\begin{cases} \Delta U_{LA1} = E_{1\text{рез}} - X_{L1\text{экв}} I_{LA1} \\ \Delta U_{LA2} = 0 - X_{L2\text{экв}} I_{LA2} \\ \Delta U_{LA0} = 0 - X_{L0\text{экв}} I_{LA0} \end{cases} .$$

где ΔU_{LA1} , ΔU_{LA2} , ΔU_{LA0} – симметричные составляющие падения напряжения особой фазы на несимметричном участке системы; $X_{L1\text{экв}}$, $X_{L2\text{экв}}$, $X_{L0\text{экв}}$ – результирующие сопротивления отдельных последовательностей относительно места возникновения несимметрии.

Как и при несимметричных КЗ, проще и нагляднее проводить решение для каждого вида несимметрии, используя граничные условия.

8.2.2. Разрыв одной фазы

Разрыв одной фазы ([рис. 8.4](#)) характеризуется следующими граничными условиями:

$$I_{LA}^{(1)} = 0; \Delta U_{LB}^{(1)} = 0; \Delta U_{LC}^{(1)} = 0.$$

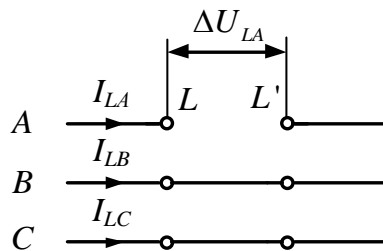


Рис. 8.4. Поясняющая схема для обрыва одной фазы

Они аналогичны условиям двухфазного короткого замыкания на землю. Воспользовавшись преобразованиями, аналогичными тем, что используются при двухфазном коротком замыкании на землю, получим выражения:

$$I_{LA1}^{(1)} = \frac{E_{1\text{pez}}}{j \left(X_{L1\text{pez}} + \frac{X_{L2\text{pez}} X_{L0\text{pez}}}{X_{L2\text{pez}} + X_{L0\text{pez}}} \right)};$$

$$I_{LA2}^{(1)} = -\frac{X_{L0\text{pez}}}{X_{L0\text{pez}} + X_{L2\text{pez}}} I_{LA1}^{(1)}; \quad I_{LA0}^{(1)} = -\frac{X_{L2\text{pez}}}{X_{L0\text{pez}} + X_{L2\text{pez}}} I_{LA1}^{(1)};$$

$$\Delta U_{LA1}^{(1)} = \Delta U_{LA2}^{(1)} = \Delta U_{LA0}^{(1)} = \frac{1}{3} \Delta U_{LA}^{(1)};$$

$$\Delta U_{LA1}^{(1)} = j \frac{X_{L2\text{pez}} X_{L0\text{pez}}}{X_{L0\text{pez}} + X_{L2\text{pez}}} I_{LA1}^{(1)}.$$

Полученные выражения позволяют построить векторные диаграммы токов и получить комплексную схему замещения для обрыва фазы (рис. 8.5).

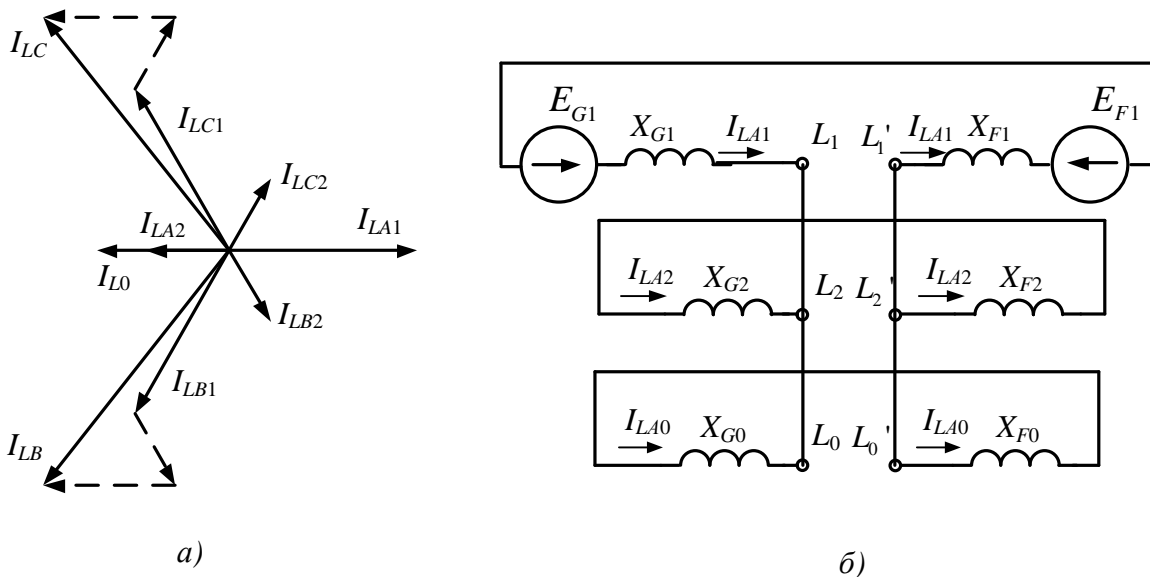


Рис. 8.5. Векторная диаграмма токов (а) и комплексная схема замещения (б) при обрыве фазы

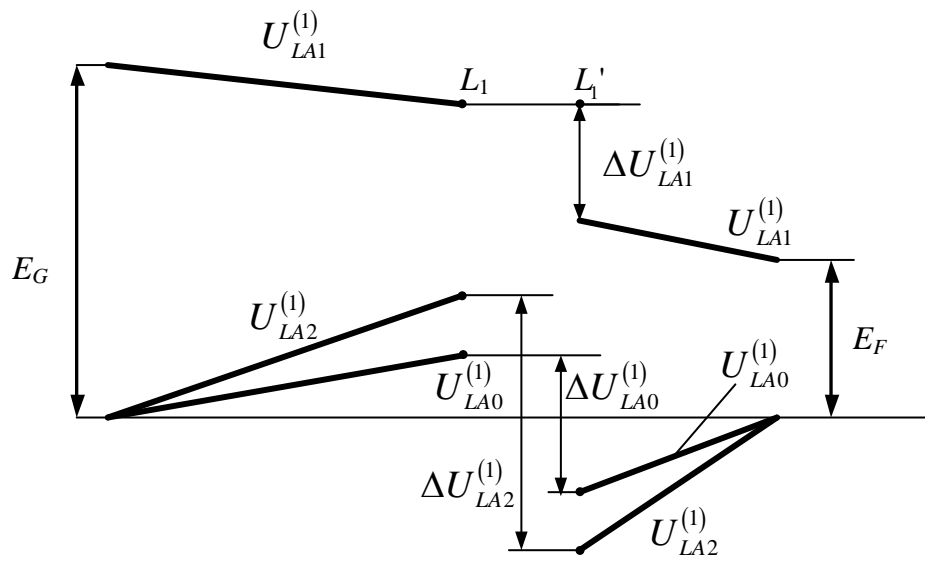


Рис. 8.6. Эпюры распределения симметричных составляющих напряжения

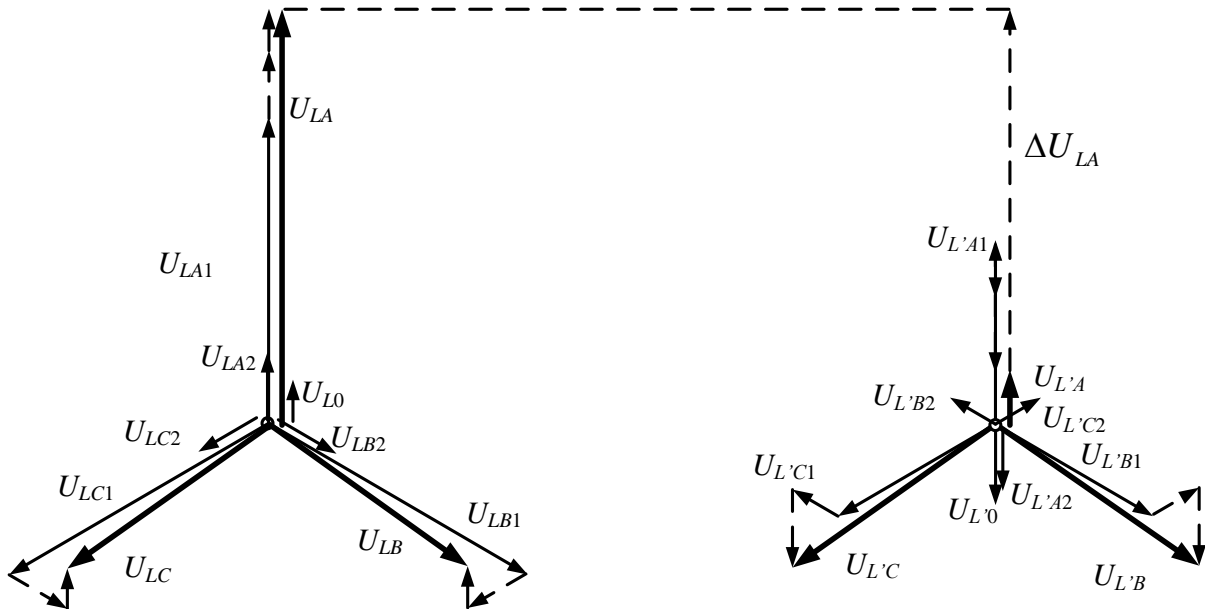


Рис. 8.7. Векторные диаграммы напряжений в точках L и L'

Характер эпюр распределения симметричных составляющих напряжения изображен на [рис. 8.6](#), а векторные диаграммы напряжений в точках L и L' – на [рис. 8.7](#).

8.2.3. Разрыв двух фаз

Разрыв двух фаз (рис. 8.8) характеризуется следующими граничными условиями:

$$I_{LB}^{(2)} = 0; I_{LC}^{(2)} = 0; \Delta U_{LA}^{(2)} = 0.$$

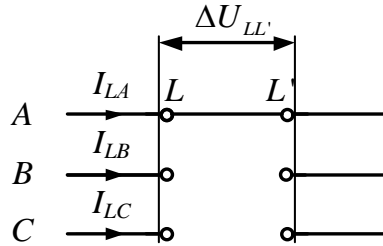


Рис. 8.8. Поясняющая схема для обрыва двух фаз

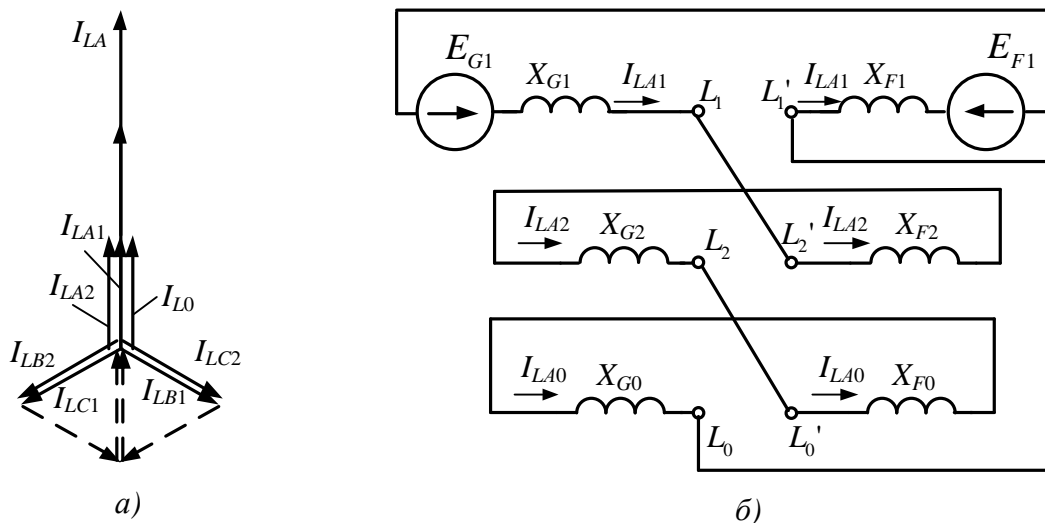


Рис. 8.9. Векторная диаграмма токов (а) и комплексная схема замещения (б) при обрыве двух фаз

Эти граничные условия аналогичны условиям при однофазном коротком замыкании. Таким образом, аналогично получаем следующие соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений:

$$I_{LA1}^{(2)} = \frac{E_{1\text{pez}}}{j(X_{L1\text{pez}} + X_{L2\text{pez}} + X_{L0\text{pez}})};$$

$$I_{LA1}^{(2)} = I_{LA2}^{(2)} = I_{LA0}^{(2)} = \frac{1}{3} I_{LA}^{(2)} ;$$

$$\Delta U_{LA1}^{(2)} = -(\Delta U_{LA2}^{(2)} + \Delta U_{LA0}^{(2)}) = j(X_{L2\text{pez}} + X_{L0\text{pez}}) I_{LA1}^{(2)} .$$

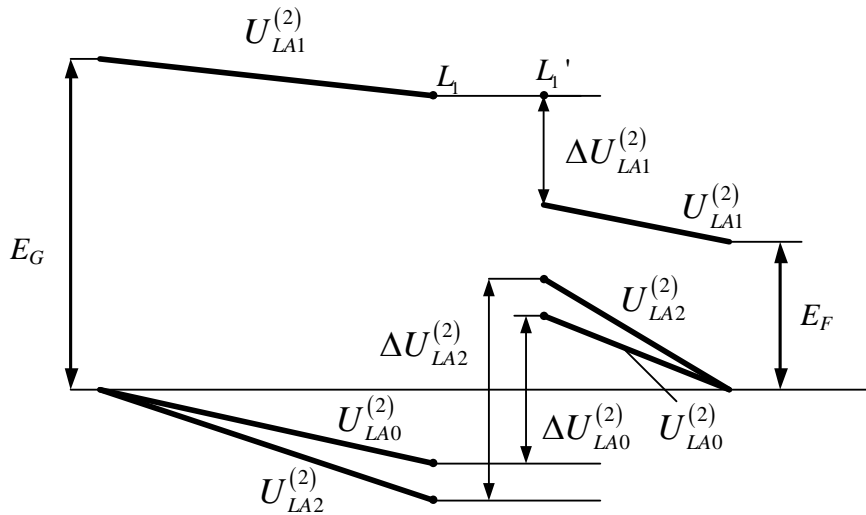


Рис. 8.10. Эпюры распределения симметричных составляющих напряжения

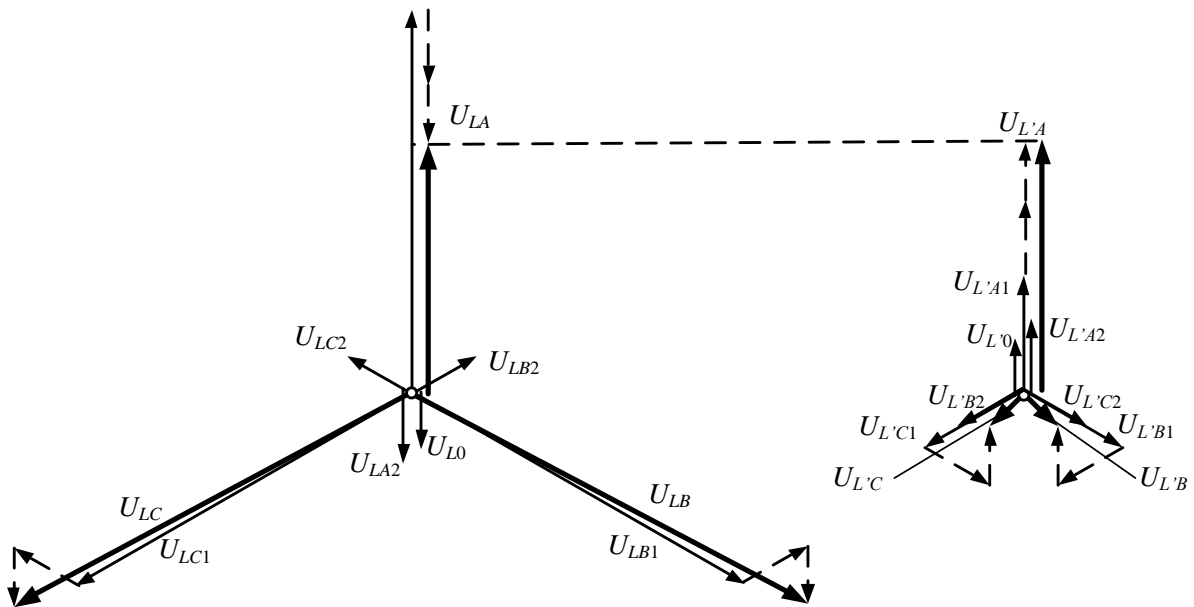


Рис. 8.11. Векторные диаграммы напряжений в точках L и L'

Полученные выражения позволяют построить векторные диаграммы токов и получить комплексную схему замещения для обрыва двух фаз ([рис. 8.9](#)).

Характер эпюр распределения симметричных составляющих напряжения при обрыве двух фаз изображен на [рис. 8.10](#), а векторные диаграммы напряжений в точках L и L' – на [рис. 8.11](#).

Контрольные вопросы

1. В чем опасность однофазного замыкания в сетях с изолированной нейтралью, если его ток не превышает номинальный?
2. Как определяется ток замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью?
3. Напишите основные уравнения второго закона Кирхгофа и граничные условия для случаев обрыва одной и двух фаз.
4. Напишите выражения для определения токов прямой, обратной и нулевой последовательности в месте разрыва одной фазы.
5. Напишите выражения для определения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности в месте разрыва одной фазы.
6. Напишите выражения для определения токов прямой, обратной и нулевой последовательности в месте разрыва двух фаз.
7. Напишите выражения для определения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности в месте разрыва двух фаз.
8. Как определить напряжения по обеим сторонам продольной несимметрии для построения эпюр напряжений?
9. Изобразите векторные диаграммы токов при обрыве одной фазы.
10. Изобразите векторные диаграммы токов при обрыве двух фаз.
11. Изобразите векторные диаграммы напряжений при обрыве одной фазы.
12. Изобразите векторные диаграммы напряжений при обрыве двух фаз.
13. Напишите правило эквивалентности прямой последовательности для продольной несимметрии.

ГЛАВА 9. КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ НИЖЕ 1 КВ

9.1. Основные положения

Электроустановки напряжением до 1000 В находятся на очень большой электрической удаленности от генераторов системы, что позволяет с большим основанием считать напряжение в узле, от которого они питаются, неизменным. Достоверность расчетов токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В зависит главным образом от правильности и полноты учета всех сопротивлений короткозамкнутой цепи. Наряду с индуктивными, здесь преобладают активные сопротивления проводов, кабелей и шин длиной более 10 м. Заметное влияние оказывают такие элементы, как сборные шины, первичные обмотки трансформаторов тока, токовые катушки расцепителей автоматических выключателей. Существенно сказываются переходные контактные сопротивления электрических аппаратов (автоматических выключателей, рубильников); активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений кабелей и шинопроводов как между собой, так и с выключателями; контакт в точке короткого замыкания.

Точная оценка сопротивлений контактных соединений представляет достаточно трудную и, в известной мере, неопределенную задачу, так как величина этих сопротивлений зависит от многих факторов: состояния контактных поверхностей, степени затяжки болтовых соединений, силы сжатия контактных пружин и др. При отсутствии достоверных данных о контактах рекомендуется при расчете токов короткого замыкания в сетях, питаемых от трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А включительно, учитывать их суммарное сопротивление. Это достигается введением в схему активного сопротивления, величина которого зависит от электрической удаленности короткого замыкания от сборных шин низшего напряжения этого трансформатора:

- для распределительных устройств подстанций – 15 мОм;
- для первичных цеховых распределительных пунктов (РП) и при коротких замыканиях на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций и главных магистралей, – 20 мОм;

- для вторичных цеховых РП, как и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных РП, – 25 мОм;

- для аппаратов, включенных непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных РП, – 30 мОм.

Несмотря на невысокие значения большинства сопротивлений, их суммарная величина становится ощутимой при большом количестве контактов в рассчитываемой схеме. Отказ от их учета может привести к излишнему увеличению токов короткого замыкания со всеми вытекающими последствиями: применению более мощной аппаратуры, проводников большего сечения и, как следствие, к дополнительным затратам на электрооборудование.

Если требуется повышенная надежность электроустановки напряжением до 1000 В, расчет токов короткого замыкания проводят без учета переходных сопротивлений.

Кроме того, при расчетах токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В допускается:

- использовать упрощенные методы расчетов, если их погрешность не превышает 10 %;

- максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту короткого замыкания и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту короткого замыкания;

- не учитывать ток намагничивания трансформаторов и насыщение магнитных систем электрических машин;

- принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений (0,69; 0,525; 0,4; 0,23 кВ) тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы;

- не учитывать влияния синхронных и асинхронных электродвигателей, электротермических установок, ламп накаливания, комплексной нагрузки, если их суммарный номинальный ток не превышает 1 % начального значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания, рассчитанного без учета этой нагрузки.

Вместе с тем рекомендуется учитывать сопротивление электрической дуги в месте короткого замыкания и изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева.

В зависимости от постановки задачи требуется определять как максимальное, так и минимальное значение тока короткого замыкания. Максимальное значение требуется для выбора электрических аппаратов и проводников, минимальное – при выборе элементов защиты (установок расцепителей автоматических выключателей, предохранителей).

9.2. Расчет сопротивлений элементов схемы замещения

Расчет сопротивлений элементов схем замещения в системах электропитания напряжением до 1000 В производится в именованных единицах, параметры схемы замещения приводятся к ступени напряжения сети, на которой находится точка короткого замыкания. Сопротивления элементов выражаются в миллиомах (МОм).

Сеть высокого напряжения. При расчете токов КЗ представляется в виде эквивалентной ЭДС и индуктивного сопротивления X_c .

$$E_{c,\phi} = \frac{U_{\text{ср.н.Н}}}{\sqrt{3}};$$

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.н.Н}}^2}{\sqrt{3}I_{\text{к.В}}U_{\text{ср.н.В}}} = \frac{U_{\text{ср.н.Н}}^2}{S_{\text{к}}},$$

где $U_{\text{ср.н.Н}}$ – среднее номинальное напряжение сети в месте короткого замыкания, В; $U_{\text{ср.н.В}}$ – среднее номинальное напряжение сети высшего напряжения, В; $I_{\text{к.В}}$ – действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформато-

ра, кА; S_k – условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

Это же сопротивление может быть рассчитано по формуле:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.н.Н}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{откл.ном}} U_{\text{ср.н.В}}},$$

где $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения трансформатора, кА.

Силовые трансформаторы. При расчете токов КЗ представляется активным R_T и индуктивным X_T сопротивлениями:

$$R_T = \frac{\Delta P_k U_{\text{н.н.}}^2}{S_T^2} \cdot 10^6;$$

$$Z_T = u_k \frac{U_{\text{н.н.}}^2}{S_T} \cdot 10^4;$$

$$X_T = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_T} \cdot 10^2 \right)^2} \frac{U_{\text{н.н.}}^2}{S_T} \cdot 10^4,$$

где ΔP_k – потери короткого замыкания, кВ; $U_{\text{н.н.}}$ – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ; u_k – напряжение короткого замыкания, %; S_T – номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Сопротивления обратной последовательности трансформатора принимаются равными сопротивлениям прямой.

Сопротивления нулевой последовательности трансформатора с обмоткой высшего напряжения, соединенной в треугольник, равны сопротивлениям прямой. При соединении обмоток по схеме «звезда – звезда с нулем» сопротивле-

ния могут быть определены только экспериментально. При отсутствии данных можно воспользоваться таблицей [4, с. 357, табл. 15.2].

Автоматические выключатели. При расчете токов КЗ представляется активным R и индуктивным X сопротивлениями:

$$R_1 = R_2 = R_0 = (R_{\text{расц}} + R_{\text{конт}}) \leq \frac{\Delta P_{\text{пот}}}{I_{\text{ном}}^2};$$

$$X_1 = X_2 = X_0 = X_{\text{расц}},$$

где R_1, R_2, R_0 – активные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей; $R_{\text{расц}}$ – активное сопротивление катушки расцепителей; $R_{\text{конт}}$ – активное сопротивление главных полюсов и присоединительных зажимов; $\Delta P_{\text{пот}}$ – нормируемые номинальные значения потери мощности в трех полюсах выключателя, X_1, X_2, X_0 – индуктивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей; $X_{\text{расц}}$ – индуктивное сопротивление катушки расцепителя.

Рубильники, магнитные пускатели, контакторы. Входят в схему замещения только активным сопротивлением разъемных контактов:

$$R_1 = R_2 = R_0 = R_{\text{конт}}.$$

Измерительные трансформаторы тока. Измерительные трансформаторы тока с многовитковыми первичными обмотками в схеме замещения учитываются активными и индуктивными сопротивлениями, одинаковыми для токов всех последовательностей. Одновитковые трансформаторы тока можно не учитывать.

Шинопроводы, кабельные и воздушные линии. В схему замещения вводятся активными и индуктивными сопротивлениями.

$$R_1 = R_2 = R_{\text{лиог}} l;$$

$$R_0 = R_{0\text{пог}} l;$$

$$X_1 = X_2 = X_{1\text{пог}} l;$$

$$X_0 = X_{0\text{пог}} l,$$

где $R_{1\text{пог}}$, $X_{1\text{пог}}$ – погонные активные и индуктивные сопротивления, мОм/м; l – длина линии, м.

Токоограничивающие реакторы.

$$R_1 = R_2 = R_0 = \frac{\Delta P_{LR\text{ном}}}{I_{LR\text{ном}}^2} \cdot 10^2;$$

$$X_1 = X_2 = X_0 = \omega(L - M) \cdot 10^3,$$

где $\Delta P_{LR\text{ном}}$ – потери активной мощности в фазе реактора на номинальном токе, Вт; $I_{LR\text{ном}}$ – номинальный ток реактора, А; L – индуктивность катушки реактора, Гн; M – взаимная индуктивность между фазами реактора, Гн.

Синхронный двигатель. В приближенных расчетах может быть учтен следующими активными и индуктивными сопротивлениями:

$$X''_{*d} = 0,15 \text{ о. е.};$$

$$X_2 = X''_d;$$

$$R_1 = R_2 = 0,15 X''.$$

Асинхронный двигатель. В приближенных расчетах может быть учтен следующими активными и индуктивными сопротивлениями:

$$X''_{*АД.н} = 0,18 \text{ о. е.};$$

$$X_2 = X''_{\text{АД.н}};$$

$$R_{\text{АД.н1}} = R_1 = R_2 = 0,36X''_{\text{АД.н}}.$$

Электрические контакты. В приближенных расчетах могут быть учтены следующими активными сопротивлениями:

0,1 мОм – для контактных соединений кабелей;

0,2 мОм – для контактных соединений шинопроводов;

1,0 мОм – для коммутационных аппаратов.

9.3. Расчет тока короткого замыкания

Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания (кА) рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{н0}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}},$$

где $U_{\text{ср.н}}$ – среднее номинальное напряжение сети, где произошло короткое замыкание, В; $R_{1\Sigma}$, $X_{1\Sigma}$ – суммарные активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности в цепи короткого замыкания, мОм:

$$R_{1\Sigma} = R_{\text{т}} + R_{\text{LR}} + R_{\text{ТА}} + R_{\text{Q}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к}} + R_{\text{1ВЛ}} + R_{\text{1КЛ}} + R_{\text{д}};$$

$$X_{1\Sigma} = X_{\text{с}} + X_{\text{т}} + X_{\text{LR}} + X_{\text{ТА}} + X_{\text{Q}} + X_{\text{ш}} + X_{\text{1ВЛ}} + X_{\text{1КЛ}},$$

где $X_{\text{т}}$ – эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения; $R_{\text{т}}$, $X_{\text{т}}$ – активное и индуктивное сопротивления силового трансформатора; R_{LR} , X_{LR} – актив-

ное и индуктивное сопротивления реактора; R_{TA} ; X_{TA} – активное и индуктивное сопротивления трансформаторов тока; R_Q , X_Q – активное и индуктивное сопротивления катушек автоматических выключателей; $R_{ш}$, $X_{ш}$ – активное и индуктивное сопротивления шин; R_k – суммарное активное сопротивление контактов; $R_{1ВЛ}$, $X_{1ВЛ}$ – активное и индуктивное сопротивления воздушной линии; $R_{1КЛ}$, $X_{1КЛ}$ – активное и индуктивное сопротивления кабельной линии; R_d – активное сопротивление электрической дуги в месте короткого замыкания.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного короткого замыкания $I_{п0}^{(1)}$ (кА) рассчитывается по формуле:

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{U_{\text{ср.Н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}},$$

где $R_{1\Sigma}$, $X_{1\Sigma}$ – результирующие активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности, $R_{0\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ – результирующие активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности, определяемые по формулам, аналогичным определению сопротивлений прямой.

Контрольные вопросы

1. Какие основные допущения принимаются при расчете токов КЗ в сетях ниже 1000 В?
2. Почему в сетях ниже 1000 В нельзя пренебрегать активной составляющей напряжения?
3. Как учитывается внешняя сеть выше 1000 В при расчете токов КЗ в сетях ниже 1000 В?
4. По каким формулам рассчитываются сопротивления силового трансформатора?

5. Как и почему при расчетах токов КЗ в сетях ниже 1000 В учитывают контактные соединения?

6. Какие измерительные трансформаторы тока учитываются при расчетах токов КЗ в сетях ниже 1000 В?

7. По какой формуле рассчитывают ток трехфазного КЗ в сетях ниже 1000 В?

8. По какой формуле рассчитывают ток однофазного КЗ в сетях ниже 1000 В?

ЧАСТЬ II. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

ГЛАВА 10. ПОНЯТИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ

10.1. Основные понятия

Переходные процессы и, соответственно, переходные режимы начинаются с возмущений – начальных отклонений параметров режима, то есть начальных изменений значений токов, напряжений, мощностей и других параметров.

Причины, по которым появляются возмущения, называются возмущающими воздействиями. В качестве возмущающих воздействий выступают, например, короткие замыкания, обрывы проводов, коммутационные переключения в электрических сетях.

Различают малые и большие возмущения в системе.

Малые возмущения в действующей энергосистеме присутствуют непрерывно. Существование этих возмущений связано с непрерывным изменением нагрузки, действием регулирующих устройств, температурными изменениями активных сопротивлений элементов системы и с другими причинами. Поэтому строго неизменного режима системы не существует и, говоря об установившемся режиме, в сущности, имеют в виду режим малых возмущений. При этом предполагают, что непрерывные процессы происходят около некоторого равновесного состояния системы.

Большими возмущениями считают начальные отклонения параметров режима, вызванные какими-либо резкими изменениями в электроэнергетической системе: короткими замыканиями, коммутационными переключениями в электрической сети и другими причинами.

Устойчивость параллельной работы электрических машин должна сохраняться при малых и больших возмущениях в электроэнергетической системе. В зависимости от типа возмущений различают два основных вида устойчивости системы.

Статической устойчивостью называется способность системы восстанавливать исходный режим после малого его возмущения или режим, весьма близкий к исходному (если возмущающее воздействие не снято).

Динамическая устойчивость – это способность системы восстанавливать исходное или близкое к исходному состояние после действия больших возмущений.

Специфической разновидностью является результирующая устойчивость – способность электроэнергетической системы возвращаться в исходное или близкое к исходному состояние после кратковременного асинхронного хода синхронных машин.

10.2. Уравнение движения ротора генератора

Уравнение движения ротора генератора является одним из основных при изучении электромеханических переходных процессов.

Движение вращающейся части энергоагрегата (далее условно – ротор генератора) описывается уравнением:

$$J_0 \frac{d\omega}{dt} = \Delta M = M_T - M_{эм}, \quad (10.1)$$

где J_0 – момент инерции; ΔM – небаланс моментов, действующих на вал, M_T – вращающий момент, создаваемый турбиной; $M_{эм}$ – электромагнитный момент, обусловленный электрической нагрузкой генератора.

Разделим правую и левую части [\(10.1\)](#) на номинальный момент $M_{ном} = \frac{S_{ном}}{\omega_0}$, а затем умножим и разделим на синхронную частоту вращения ω_0

и представим результат в следующем виде:

$$T_j \frac{d\omega_*}{dt} = \Delta M_*,$$

где $T_j = \frac{J_0 \omega_0^2}{S_{\text{ном}}}$ – постоянная инерции ротора, с.

Подставим в полученное выражение величины $T_{j*} = \frac{T_j}{t_6}$ и $t_* = \frac{t}{t_6}$. Уравнение движения ротора в относительных единицах примет вид:

$$T_{j*} \frac{d\omega_*}{dt_*} = \Delta M_*. \quad (10.2)$$

Обычно при расчетах переходных процессов за базисную единицу времени принимают промежуток времени, в течение которого достигается изменение угла в один радиан при синхронной угловой скорости:

$$t_6 = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{314} \text{ [с]} = 1 \text{ [рад]}.$$

Для упрощения расчетов вместо небаланса моментов ΔM используется небаланс ΔP между мощностью турбины P_T и электрической (электромагнитной) мощностью генератора P . Связь между этими небалансами в системе относительных единиц выражается соотношением:

$$\Delta M_* = \Delta P_* \frac{1}{\omega_*} = \Delta P_* \frac{1}{1 + \Delta \omega_*},$$

где $\Delta \omega_* = \omega_* - 1$ – составляющая угловой скорости, вызванная качаниями гене-

ратора в переходных режимах ($\Delta\omega_* = 0,01-0,02$).

Составляющей $\Delta\omega_*$ пренебрегают из-за ее малой величины, а уравнение (10.2) записывается без явных признаков принадлежности к системе относительных единиц (без звездочек):

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = \Delta P. \quad (10.3)$$

Параметры движения ротора генератора, а именно его угловое ускорение α , угловая скорость ω и угол θ , связаны между собой через производные:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2},$$

где угол θ отсчитывается от неподвижной оси, которую совмещают с магнитной осью статорной обмотки фазы А.

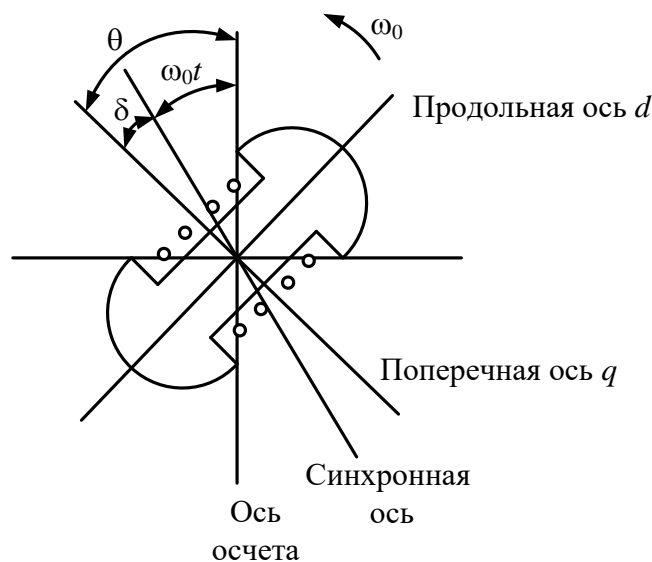


Рис. 10.1. Параметры движения ротора генератора

Более удобной для отсчета углов является специально вводимая синхронно вращающаяся (синхронная) ось, относительно которой фиксируется угловое

положение δ ротора генератора ([рис. 10.1](#)).

Связь между углами θ и δ определяется функцией:

$$\theta = \omega_0 t + \delta. \quad (10.4)$$

Двойное дифференцирование функции ([10.4](#)) приводит к равенству:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (10.5)$$

Подстановкой ([10.5](#)) в ([10.3](#)) получают уравнение движения ротора генератора в окончательной (основной) форме:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \Delta P = P_T - P.$$

10.3. Характеристика мощности генератора

Простейшая (одномашинная) модель энергосистемы представляется одной удаленной электростанцией (эквивалентным генератором), работающей через трансформаторные связи и линию электропередачи параллельно с настолько мощной энергосистемой, что ее приемные шины обозначают как шины бесконечной мощности ([рис. 10.2](#)). Для упрощения примем, что активные сопротивления и полные проводимости всех элементов системы равны нулю.

Результирующее сопротивление системы:

$$X = X_d + X_{T1} + X_w + X_{T2}.$$

Векторная диаграмма нормального режима работы электропередачи

изображена на [рис. 10.3](#).

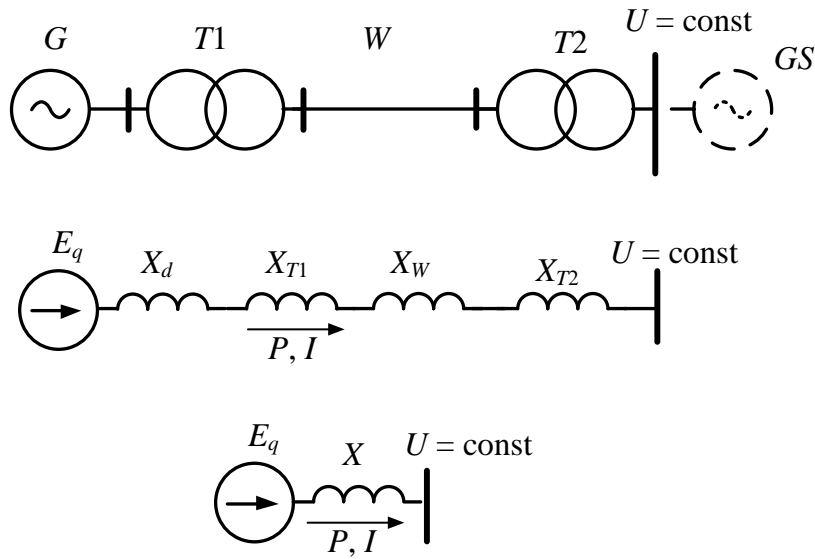


Рис. 10.2. Простейшая модель энергосистемы

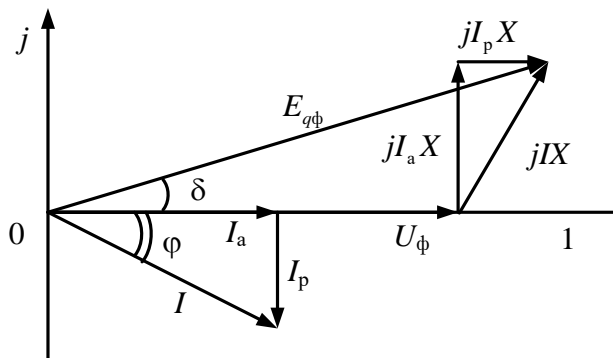


Рис. 10.3. Векторная диаграмма

На диаграмме выделены активная I_a и реактивная I_p составляющие тока I и показаны продольная $jI_p X$ и поперечная $jI_a X$ составляющие падения напряжения jIX на эквивалентном сопротивлении X .

Из векторной диаграммы следует, что поперечная составляющая падения напряжения равна:

$$I_a X = E_{q\phi} \sin \delta.$$

Умножив обе части этого равенства на $\frac{3U_\phi}{X}$, получим:

$$3U_{\phi} I_a = \frac{3E_q U_{\phi}}{X} \sin \delta = \frac{E_q U}{X} \sin \delta.$$

Учитывая, что трехфазная мощность определяется как $P = 3U_{\phi} I_a$, представим последнее равенство в виде зависимости:

$$P = \frac{E_q U}{X} \sin \delta. \quad (10.6)$$

При $E_q = \text{const}$ и $U = \text{const}$ зависимость (10.6) представляет собой синусоидальную функцию активной мощности генератора от угла. Графическое изображение этой функции называется *угловой характеристикой активной мощности генератора*. Ее графическое представление в пределах положительного полупериода синусоиды представлено на [рис. 10.4](#).

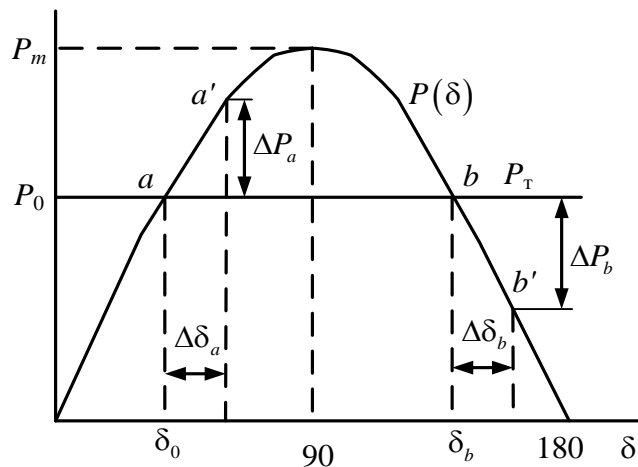


Рис. 10.4. Угловая характеристика генератора

Величину $P_m = \frac{E_q U}{X}$ называют идеальным пределом мощности рассматриваемой простейшей электрической системы.

В установившемся режиме от генератора передается только одна конкретная величина мощности, которой соответствует конкретное значение угла. Эта мощность P_0 равна мощности турбины P_T , вследствие чего турбина, вал

и ротор генератора сохраняют равномерное вращательное движение. Отклонение любой из этих мощностей (моментов) от установившегося значения отражается в виде появления небаланса мощностей (моментов) $\Delta P = P_T - P$ на валу, под действием которого ротор генератора будет ускоряться либо замедляться. Соответственно, величина угла δ будет увеличиваться или уменьшаться.

Как видно на [рис. 10.4](#), есть две точки пересечения (a и b) характеристики турбины P_T и угловой характеристики генератора $P(\delta)$.

Рассмотрим режим работы в точке a . Если мощность генератора по какой-либо причине изменится на величину ΔP_a , то и угол δ , следуя синусоидальной зависимости, изменится на $\Delta\delta_a$. Из [рис. 10.4](#) следует, что в точке a положительному приращению мощности соответствует положительное приращение угла.

При увеличении мощности генератора равновесие моментов нарушается, и на валу генератора возникает избыточный тормозящий момент, так как тормозящий момент генератора преобладает над вращающим моментом турбины. Под влиянием тормозящего момента ротор генератора начинает замедляться, что вызывает перемещение ротора и связанного с ним вектора ЭДС в сторону уменьшения угла δ . В итоге в точке a восстанавливается исходный режим работы, следовательно, этот режим является устойчивым. Такой же вывод можно получить и при уменьшении мощности генератора в точке a .

В точке b отрицательному приращению мощности генератора соответствует положительное приращение угла. При уменьшении мощности генератора на валу возникает избыточный ускоряющий момент, который увеличивает угол δ . С ростом угла мощность генератора падает, это увеличивает ускоряющий момент, т. е. возникает лавинообразный процесс, называемый выпадением из синхронизма. Процесс выпадения из синхронизма и асинхронный режим, в котором оказывается генератор, характеризуются непрерывным перемещением вектора ЭДС относительно напряжения приемной системы.

Таким образом, точка a характеристики мощности является точкой устойчивого равновесия, точка b – точкой неустойчивого равновесия моментов

турбины и генератора. Поэтому все точки, лежащие на возрастающей части характеристики мощности, являются точками устойчивой работы системы, а точки, лежащие на падающей части характеристики, – точками неустойчивой работы. Границей зон устойчивой и неустойчивой работы является максимум характеристики мощности.

Формальным признаком статической устойчивости электрической системы может служить знак приращения мощности к приращению угла. Критерий статической устойчивости простейшей системы можно записать в виде:

$$\frac{dP}{d\delta} > 0.$$

Эта производная носит название синхронизирующей мощности. Она положительна при $\delta < 90^\circ$. Критическим является значение угла $\delta = 90^\circ$, когда достигается максимум характеристики.

Увеличение мощности турбины от значения приводит к возрастанию угла ротора и уменьшению запаса статической устойчивости $K_{з.ст}$ (%), который определяется следующим образом:

$$K_{з.ст} = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} \cdot 100.$$

Запас устойчивости электропередачи, связывающей станцию с шинами энергосистемы, должен быть не менее 20 % в нормальном режиме и 8 % в кратковременном послеаварийном.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение статической устойчивости энергетической системы.
2. Дайте определение динамической устойчивости энергетической системы.

3. Каким дифференциальным уравнением описывается движение ротора?
4. Какова окончательная (основная) форма уравнения движения ротора?
5. Какова связь между углами θ и δ ?
6. Дайте определение угловой характеристики активной мощности генератора.
7. Дайте определение идеального предела передаваемой мощности.
8. Как определить точку устойчивого равновесия на угловой характеристике генератора?
9. Что понимается под синхронизирующей мощностью?
10. Назовите формальный признак критерия статической устойчивости простейшей электрической системы.
11. Как определяется коэффициент запаса статической устойчивости энергосистемы по активной мощности?

ГЛАВА 11. УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМОГО ГЕНЕРАТОРА. ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ПРИ СЛОЖНОЙ СВЯЗИ ГЕНЕРАТОРА С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

11.1. Угловые характеристики регулируемого генератора

При построении угловых характеристик мощности нерегулируемого генератора используется его простейшая математическая модель: $E_q = \text{const}$, X_d . Угловая характеристика генератора в этом случае представляет собой синусоидальную зависимость. Для уяснения взаимосвязи между режимными параметрами нерегулируемого генератора рассмотрим два режима энергосистемы. Совмещенная векторная диаграмма этих режимов представлена на [рис. 11.1](#).

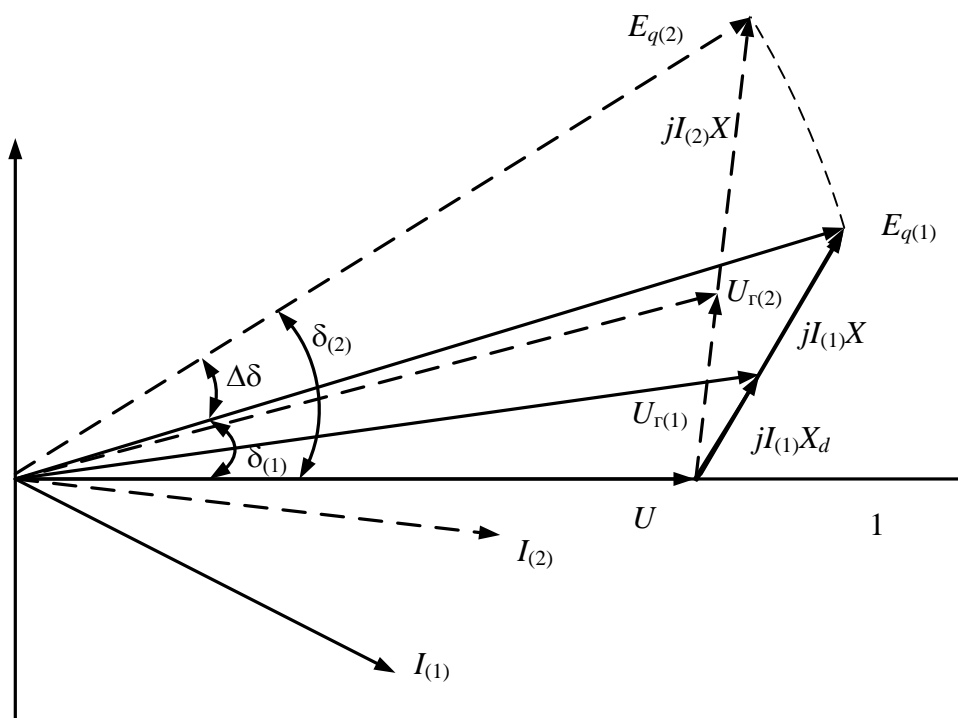


Рис. 11.1. Векторная диаграмма нерегулируемого генератора

Вектор напряжения на шинах генератора делит вектор падения напряжения jIX на две части, пропорциональные индуктивным сопротивлениям гене-

ратора и внешней сети. Увеличим передаваемую активную мощность и тем самым угол δ .

Увеличение угла δ вызовет уменьшение реактивной мощности, а следовательно, поворот вектора тока в сторону уменьшения угла φ . Новое положение вектора тока показано на диаграмме пунктирной линией. Этому току соответствует новое положение вектора ЭДС, показанное также пунктирной линией. Новое значение напряжения на шинах генератора найдем, поделив падение напряжения в сопротивлении X в той же пропорции, как и в предыдущем случае.

Из диаграммы следует, что увеличение угла δ вызывает уменьшение напряжения на шинах генератора, что указывает на его значительную зависимость от мощности нагрузки.

Если генератор снабжен *автоматическим регулятором возбуждения* пропорционального действия, который контролирует напряжение U_r , при его понижении регулятор увеличивает ток возбуждения, а вместе с ним и ЭДС.

При линейном представлении характеристики намагничивания ток возбуждения и синхронная ЭДС E_q генератора изменяются пропорционально и в соответствующей системе относительных единиц имеют равные численные значения. Поэтому при определении синхронной ЭДС E_q регулируемого генератора ток возбуждения можно не вводить, а его действие учитывать упрощенно по выражению:

$$E_q = E_{q0} + k_U (U_{r0} - U_r),$$

где E_{q0} – установочное (начальное) значение ЭДС; U_{r0} – установочное (требуемое) значение напряжения; k_U – коэффициент усиления АРВ по отклонению напряжения генератора.

При $k_U \rightarrow \infty$ с помощью АРВ поддерживается постоянным напряжение на его зажимах U_r . Проследим за изменением синхронной ЭДС по совмещенной для двух режимов векторной диаграмме генератора ([рис. 11.2](#)).

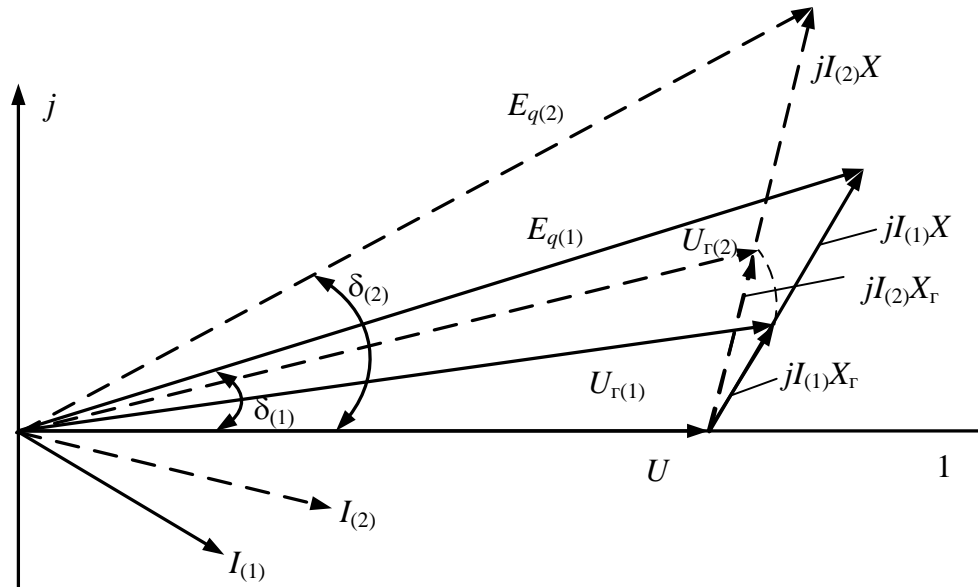


Рис. 11.2. Векторная диаграмма регулируемого генератора

Из диаграммы следует, что при изменении тока статора поддержание генераторного напряжения на неизменном уровне обеспечивается за счет соответствующего изменения синхронной ЭДС. Этот фактор существенно влияет на статическую устойчивость генератора.

Для графического построения угловой характеристики регулируемого генератора разделим весь диапазон возможных значений синхронной ЭДС $E_{q.min} < E < E_{q.max}$ на несколько уровней и для этих уровней построим семейство так называемых *внутренних* угловых характеристик (рис. 11.3). Обозначим исходный установившийся режим изображающей точкой *a* при одном из принятых уровней ЭДС и относительно этого режима будем увеличивать и уменьшать активную мощность генератора, учитывая изменение ЭДС. В результате будет построена серия точек на внутренних характеристиках, объединение которых дает *внешнюю угловую характеристику* регулируемого генератора, учитывающую изменение синхронной ЭДС при изменениях режима.

За пределами граничных точек g_n и g_b внешняя угловая характеристика совпадает с граничными внутренними характеристиками, соответствующими нижнему и верхнему граничным значениям синхронной ЭДС.

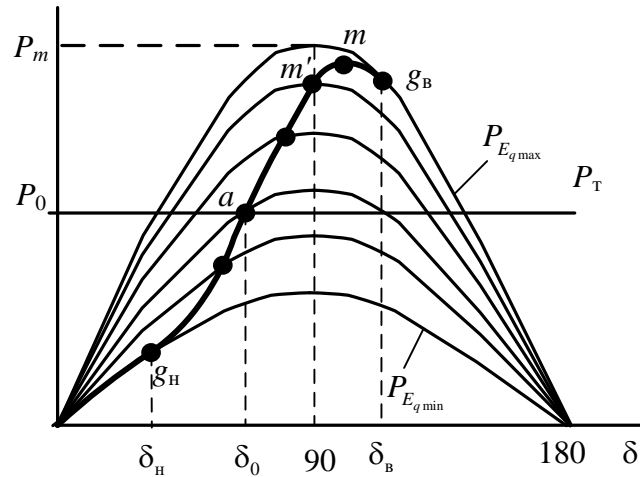


Рис. 11.3. Построение внешней угловой характеристики генератора

В интервале значений угла от 0 до 90° по всем внутренним характеристикам мощности выполняется неравенство: $\frac{dP}{d\delta} > 0$, поэтому система обладает естественной устойчивостью.

11.2. Упрощенные математические модели регулируемого генератора

При учете реально установленных значений коэффициента усиления АРВ генератора k_U напряжение U не является константой. Однако при этом на синхронном реактивном сопротивлении X_d генератора может быть условно выделено некоторое сопротивление ΔX , за которым ЭДС E_x сохраняет практически постоянное значение. Значения ΔX и E_x используются в расчетах [рис. 11.4](#).

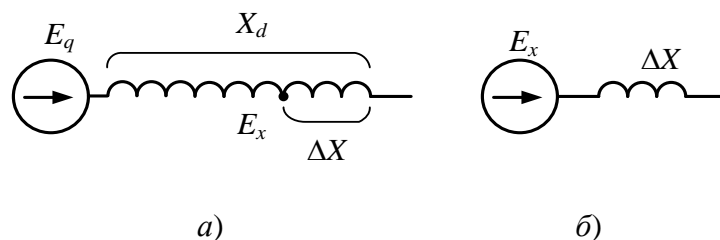


Рис. 11.4. Схемы замещения генератора:

а) поясняющая; б) принимаемая в расчетах

Если увеличивать коэффициент k_U от нуля до бесконечности, то сопротивление ΔX будет изменяться в пределах $0 < \Delta X < X_d$. В практических расчетах этот фактор учитывают упрощенно. Для генераторов с АРВ сильного действия принимают $E_x = U_r = \text{const}$, $X_r = \Delta X = 0$, а для генераторов с АРВ пропорционального действия $E_x = E_q = \text{const}$, $X_r = \Delta X = X'_d$.

11.3. Характеристика мощности при сложной связи генератора с приемной системой

Во многих случаях удаленная электростанция связана с приемной системой более сложной сетью, чем одна линия и два трансформатора. Насколько бы ни была сложна схема замещения, ее всегда можно привести к Т-образному или П-образному виду.

Для Т-образной схемы замещения распределение токов может быть представлено как результат наложения токов от двух источников ЭДС, действующих раздельно (рис. 11.5, рис. 11.6).

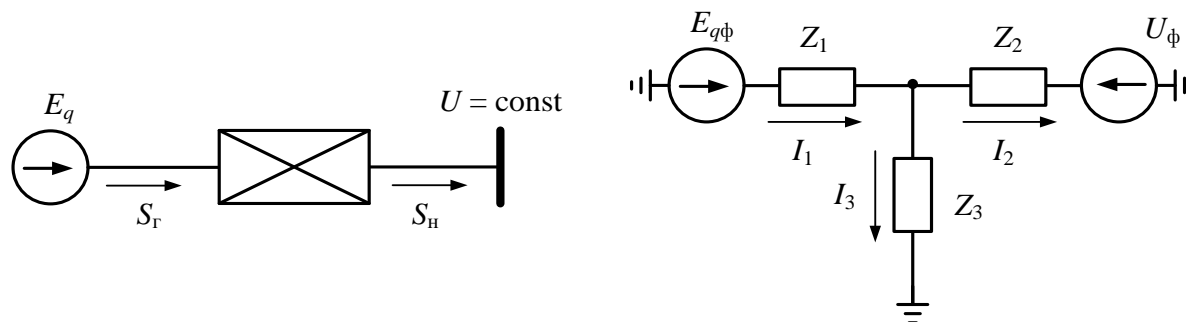


Рис. 11.5. Обобщенная и Т-образные схемы замещения одномашинной энергосистемы

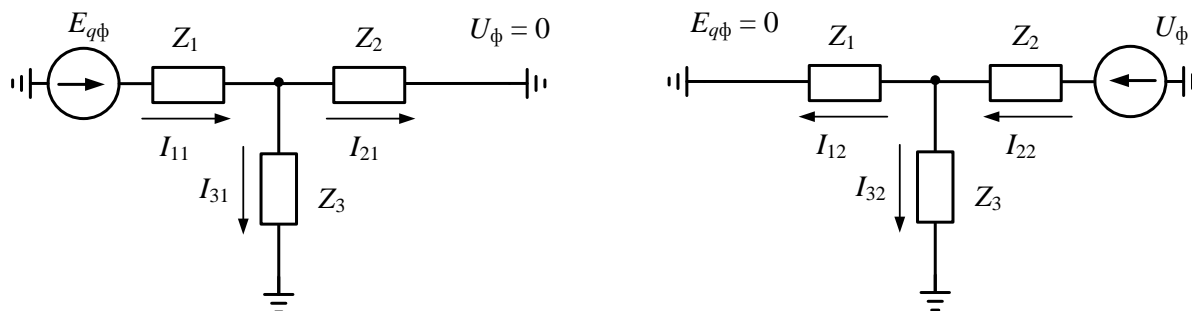


Рис. 11.6. Расчет токов методом наложения

В соответствии с принятыми положительными направлениями искомые токи I_1 , I_2 в трехфазной схеме будут определены как

$$\begin{cases} I_1 = I_{11} - I_{12} \\ I_2 = -I_{22} + I_{21} \end{cases};$$

где

$$\begin{cases} I_{11} = \frac{E_{q\phi}}{Z_{11}} = E_{q\phi} Y_{11} \\ I_{22} = \frac{U_{\phi}}{Z_{22}} = U_{\phi} Y_{22} \end{cases}, \quad \begin{cases} I_{21} = \frac{E_{q\phi}}{Z_{21}} = E_{q\phi} Y_{21} \\ I_{12} = \frac{U_{\phi}}{Z_{12}} = U_{\phi} Y_{12} \end{cases},$$

где Z_{11} , Z_{22} – собственные сопротивления ветвей с источниками ЭДС; Y_{11} , Y_{22} – собственные проводимости ветвей с источниками ЭДС; Z_{21} , Z_{12} – взаимные сопротивления ветвей между узлами подключения источников ЭДС; Y_{21} , Y_{12} – взаимные проводимости ветвей между узлами подключения источников ЭДС.

Собственное сопротивление каждой ветви с источником ЭДС определяет величину тока в этой ветви при нулевом значении ЭДС другого источника. Они вычисляются как эквивалентные сопротивления пассивной части относительно зажимов источников ЭДС по правилам параллельного и последовательного сложения:

$$\begin{cases} Z_{11} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \\ Z_{22} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \end{cases}.$$

Взаимное сопротивление определяет величину тока в ветви с источником ЭДС при нулевом значении этой ЭДС под действием ЭДС другого источника. Взаимные сопротивления Z_{12} и Z_{21} одинаковы. Они вычисляются по формуле преобразования звезды в эквивалентный треугольник:

$$Z_{21} = Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}.$$

Сопротивления и проводимости могут быть представлены в декартовой и полярной системах координат:

$$\begin{cases} Z_{11} = r_{11} + jx_{11} = z_{11} e^{j\psi_{11}} \\ Z_{22} = r_{22} + jx_{22} = z_{22} e^{j\psi_{22}} \\ Z_{12} = r_{12} + jx_{12} = z_{12} e^{j\psi_{12}} \end{cases} ; \begin{cases} Y_{11} = g_{11} + jb_{11} = y_{11} e^{-j\psi_{11}} \\ Y_{22} = g_{22} + jb_{22} = y_{22} e^{-j\psi_{22}} \\ Y_{12} = g_{12} + jb_{12} = y_{12} e^{-j\psi_{12}} \end{cases}.$$

Выразим токи через проводимости:

$$\begin{cases} \underline{I}_1 = \underline{E}_{q\phi} Y_{11} - \underline{U}_{\phi} Y_{12} \\ \underline{I}_2 = -\underline{U}_{\phi} Y_{22} + \underline{E}_{q\phi} Y_{21} \end{cases}.$$

Мощности со стороны генератора $\underline{S}_Г$ и со стороны приемника $\underline{S}_Н$ равны соответственно:

$$\begin{cases} \underline{S}_Г = P_Г + jQ_Г = 3\underline{E}_{q\phi} \underline{I}_1^* = 3\underline{E}_{q\phi} (\underline{E}_{q\phi}^* Y_{11}^* - \underline{U}_{\phi}^* Y_{12}^*) \\ \underline{S}_Н = P_Н + jQ_Н = 3\underline{U}_{\phi} \underline{I}_2^* = 3\underline{U}_{\phi} (-\underline{U}_{\phi}^* Y_{22}^* + \underline{E}_{q\phi}^* Y_{21}^*) \end{cases},$$

где звездочкой обозначены комплексно-сопряженные величины.

Обозначим угол между векторами ЭДС и напряжением буквой δ и совместим ось отсчета углов с вектором напряжения. Тогда будут справедливы соотношения:

$$\begin{cases} \underline{U}_{\phi} = \underline{U}_{\phi}^* = U_{\phi} e^{j0} = U_{\phi} \\ \underline{E}_{q\phi} = E_{q\phi} e^{j\delta} \\ \underline{E}_{q\phi}^* = E_{q\phi} e^{-j\delta} \end{cases}.$$

С учетом этих соотношений выражения для мощностей в декартовой системе координат приводятся к виду:

$$\begin{cases} \underline{S}_Г = E_q^2 y_{11} e^{j\psi_{11}} - U E_q y_{12} e^{j(\delta + \psi_{12})} \\ \underline{S}_Н = -U^2 y_{22} e^{j\psi_{22}} + E_q U y_{21} e^{j(-\delta + \psi_{12})} \end{cases},$$

где E_q и U – линейные ЭДС генератора и напряжение приемной системы.

Откуда

$$\begin{cases} P_Г = E_q^2 y_{11} \cos \psi_{11} - U E_q y_{12} \cos(\delta + \psi_{12}) \\ P_Н = -U^2 y_{22} \cos \psi_{22} + E_q U y_{21} \cos(-\delta + \psi_{12}) \end{cases};$$

$$\begin{cases} Q_Г = E_q^2 y_{11} \sin \psi_{11} - U E_q y_{12} \sin(\delta + \psi_{12}) \\ Q_Н = -U^2 y_{22} \sin \psi_{22} + E_q U y_{21} \sin(-\delta + \psi_{12}) \end{cases}.$$

Если вместо углов ψ ввести углы, дополняющие их до $90^\circ - \alpha = 90^\circ - \psi$, то

$$\begin{cases} P_Г = E_q^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + U E_q y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) \\ P_Н = -U^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + E_q U y_{21} \sin(\delta + \alpha_{21}) \end{cases};$$

$$\begin{cases} Q_Г = E_q^2 y_{11} \sin \alpha_{11} - U E_q y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) \\ Q_Н = -U^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + E_q U y_{21} \sin(\delta + \alpha_{21}) \end{cases}.$$

Дополняющие углы будут отличны от нуля только в тех случаях, когда хотя бы один элемент пассивной части схемы замещения будет содержать активное сопротивление. При преобразованиях идеализированных схем замещения, не содержащих активных сопротивлений, все дополняющие углы приобретают нулевое значение.

Собственные сопротивления являются, в физическом смысле, активно-реактивными сопротивлениями. Взаимные сопротивления следует рассматри-

вать как комплексные коэффициенты пропорциональности между токами и ЭДС, а значит, они могут иметь как положительные, так и отрицательные вещественные части.

Выражения для реактивных мощностей при рассмотрении вопросов устойчивости используются редко, а активные записываются в более компактной форме:

$$\begin{cases} P_{\Gamma} = P_{11} + P_{12m} \sin(\delta - \alpha_{12}) \\ P_{\Pi} = -P_{22} + P_{12m} \sin(\delta + \alpha_{21}) \end{cases},$$

где $P_{11} = E_q^2 y_{11} \sin \alpha_{11}$ и $P_{22} = U^2 y_{22} \sin \alpha_{22}$ – собственные мощности со стороны генератора и приемной системы; $P_{12m} = UE_q y_{12}$ – максимум взаимной мощности генератора и приемной системы.

Контрольные вопросы

1. Как влияет увеличение угла δ на режимные параметры ($\cos(\varphi)$, P_{Γ} , Q_{Γ} , U_{Γ}) нерегулируемого генератора?
2. Как определяется синхронная ЭДС генератора (E_q), снабженного АВР пропорционального действия?
3. Как графически построить угловую характеристику регулируемого генератора?
4. Какой вид имеет упрощенное математическое представление регулируемого генератора?
5. Как определяются собственные сопротивления ветвей с источниками ЭДС?
6. Что определяют и как находятся взаимные сопротивления при сложной связи генератора с энергосистемой?
7. Как выглядят выражения угловых характеристик для активных мощностей при сложной связи генератора с принимающей системой?

ГЛАВА 12. ПОНЯТИЕ О ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРАВИЛО ПЛОЩАДЕЙ

То, что система сохраняет статическую устойчивость в установившемся режиме работы, не позволяет утверждать, что она окажется устойчивой и при резких внезапных нарушениях режима её работы (КЗ, отключение генераторов, линий). Эта сторона проблемы исследуется отдельно и затрагивает круг вопросов, относящихся к динамической устойчивости.

Для выяснения принципиальных положений анализа динамической устойчивости рассмотрим явления, возникающие при внезапном отключении одной из двух параллельных цепей линии электропередачи одномашинной энергосистемы (рис. 12.1).

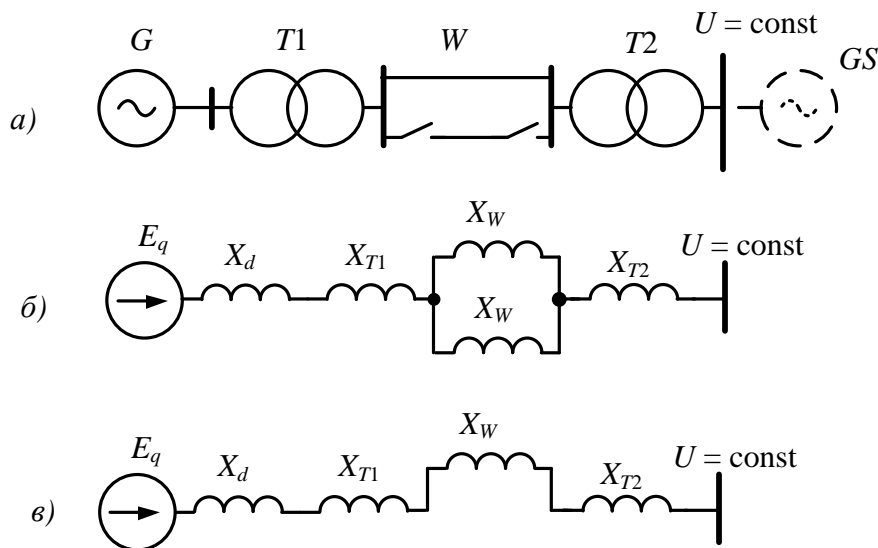


Рис. 12.1. Отключение одной из параллельных линий:

а) схема простейшей энергосистемы; б) схема замещения в нормальном режиме; в) – схема замещения с отключенной цепью

В нормальном режиме взаимное реактивное сопротивление схемы замещения:

$$X_1 = X_d + X_{T1} + \frac{X_W}{2} + X_{T2},$$

определяет амплитуду характеристики мощности генератора $P_1(\delta)$:

$$P_{mI} = \frac{E_q U}{X_I}.$$

При отключении одной из цепей ЛЭП схема замещения изменится, и суммарное сопротивление будет выше:

$$X_{II} = X_d + X_{T1} + X_w + X_{T2}.$$

Следовательно, максимум новой угловой характеристики $P_{II}(\delta)$ (рис. 12.2) составит меньшую величину:

$$P_{mII} = \frac{E_q U}{X_{II}}.$$

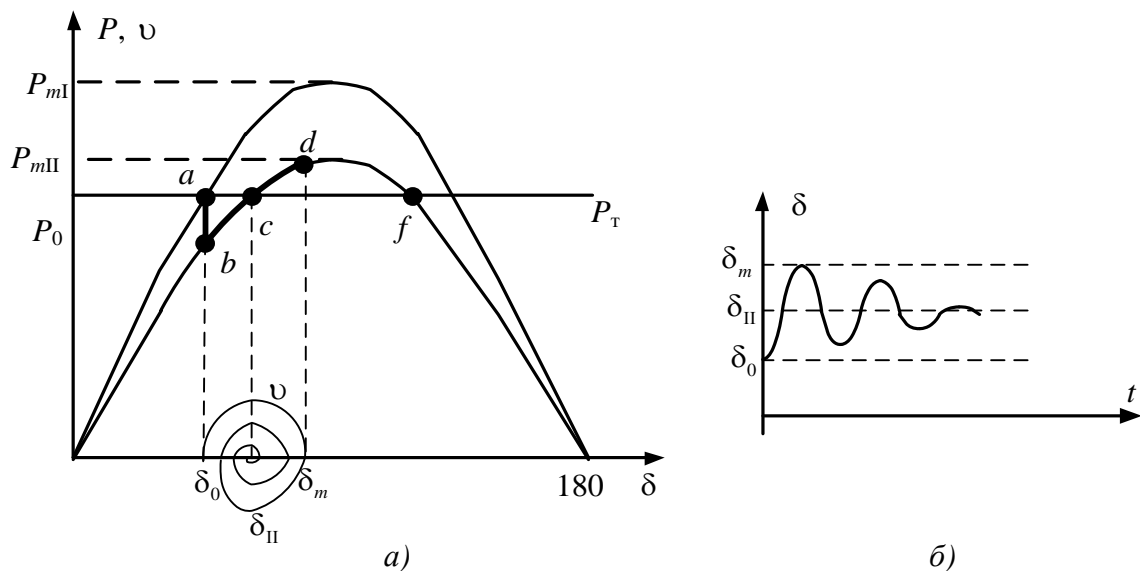


Рис. 12.2. Устойчивый переход энергосистемы:

а) характеристики мощности; б) колебания угла δ во времени

Точка a соответствует нормальному режиму работы (рис. 12.2, а) при передаваемой мощности P_0 и угле δ_0 . В момент отключения угол сохраняет свое зна-

чение в силу существования механической инерции у ротора генератора. Следовательно, в момент отключения цепи режим работы характеризуется точкой b на новой характеристике, что обуславливает внезапное уменьшение мощности генератора. Мощность турбины остаётся при этом неизменной и равной P_0 .

В результате нарушается баланс мощностей (моментов) на валу ротора генератора и турбины за счет уменьшения тормозящего момента, обусловленного электрической нагрузкой. Под действием избыточного ускоряющего момента относительная скорость ω нарастает и при значении угла δ_{II} становится наибольшей.

В точке c ускоряющий и тормозящий моменты уравниваются, но ротор по инерции, за счет дополнительной кинетической энергии, накопленной на участке bc , будет продолжать относительное движение. Поскольку справа от точки c ускоряющий момент турбины меньше, чем тормозящий электромагнитный момент генератора, относительное движение будет происходить с замедлением. Увеличение угла продолжится до значения δ_m , когда дополнительная кинетическая энергия, приобретенная ротором на участке bc , компенсируется равной по величине потенциальной энергией на участке cd .

В точке d действует избыточный тормозящий момент, под действием которого ротор будет возвращаться к точке c и снова по инерции ее пройдет. В результате потерь на трение и действия демпфирующих моментов амплитуда изменения угла ротора будет уменьшаться и после нескольких колебаний режим системы установится в новой точке устойчивого равновесия – точке c , соответствующей углу δ_{II} ([рис. 12.2](#)).

В рассмотренном примере нет нарушений устойчивости. Однако возможен и другой исход процесса – нарушение динамической устойчивости ([рис. 12.3](#)).

Это возможно, если угол достигнет критической величины $\delta_{кр}$, соответствующей точке f , прежде чем относительная скорость ω примет нулевое значение. Тогда избыточный момент на валу ротора генератора становится вновь ускоряющим, а относительная скорость ω ротора опять начинает возрастать до

выпадения генератора из синхронизма. Такой характер нарушения устойчивости называется динамическим.

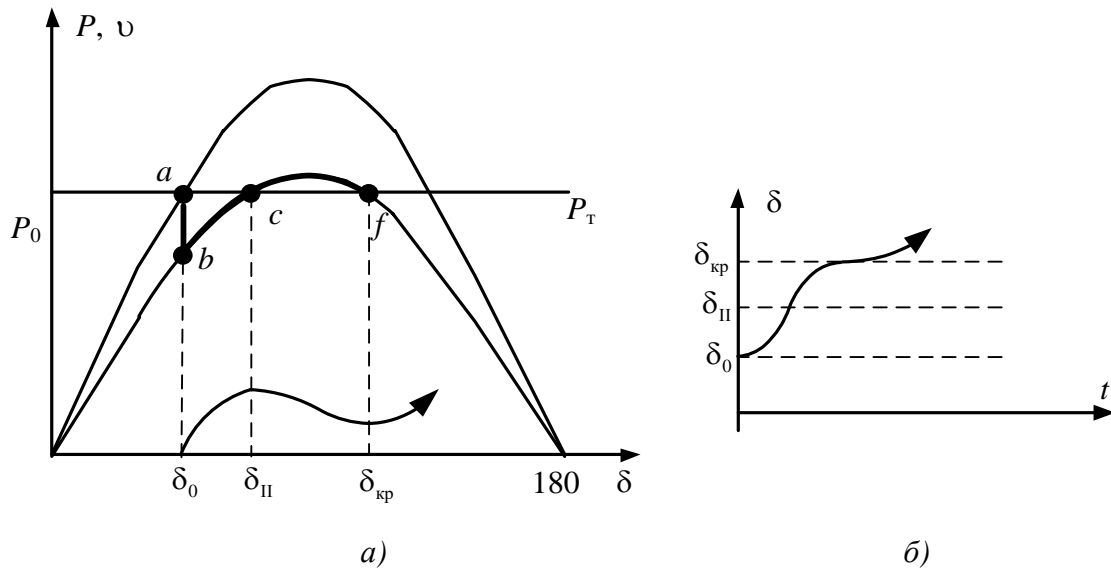


Рис. 12.3. Нарушение динамической устойчивости

а) характеристики мощности; б) нарастание угла

Для рассмотренной схемы при сохранении динамической устойчивости (рис. 12.4) ординаты заштрихованных площадок представляют собой избыток мощности $\Delta P = P_0 - P_{(0)}$, создающий избыточный момент того или иного знака. С достаточной точностью значение ω можно считать постоянным и равным ω_0 , следовательно, избыточный момент в относительных единицах может быть принят численно равным избытку мощности.

Можно предположить, что при перемещении ротора на бесконечно малый угол $d\delta$ избыточный момент совершает элементарную работу, равную $\Delta M \cdot d\delta$. При отсутствии потерь вся эта работа идет на изменение кинетической энергии ротора в его относительном движении.

В рассматриваемом случае избыточный момент сначала ускоряет вращение ротора и работа, совершаемая в период ускорения при перемещении ротора от δ_0 до δ_{II} , равна:

$$A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{II}} \Delta M d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{II}} \Delta P d\delta = F_{abc} = F_{\text{уск}},$$

где F_{abc} – кинетическая энергия, запасенная ротором в период его ускорения (называется *площадью ускорения*).

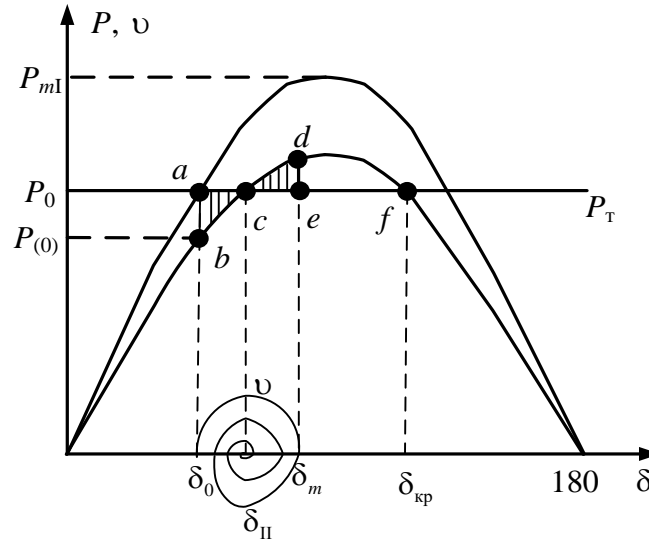


Рис. 12.4. Анализ колебаний по правилу площадей

После того как ротор пройдет точку своего установившегося положения на новой характеристике мощности, избыточный момент меняет свой знак и начинает тормозить вращение ротора. Изменение кинетической энергии в период торможения при перемещении ротора от δ_{II} до δ_m (*площадь торможения*) равно:

$$A_{\text{торм}} = \int_{\delta_{II}}^{\delta_m} \Delta M d\delta = \int_{\delta_{II}}^{\delta_m} \Delta P d\delta = F_{cde} = F_{\text{торм}}.$$

Площади торможения и ускорения пропорциональны кинетической энергии ускорения и торможения.

В период торможения ротор возвращает запасенную им ранее избыточную кинетическую энергию. Когда вся запасенная ротором избыточная энергия будет израсходована, т. е. когда работа торможения $A_{\text{торм}}$ уравнивает работу ускорения $A_{\text{уск}}$, относительная скорость становится равной нулю, поскольку кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости. В этот момент ро-

тор останавливается в своем относительном движении, а достигнутый им при этом угол δ_m является максимальным углом отклонения ротора машины. Таким образом, для определения угла δ_m оказывается достаточным равенство:

$$A_{\text{уск}} + A_{\text{торм}} = 0, \text{ или } F_{\text{уск}} + F_{\text{торм}} = 0.$$

То есть угол δ_m может быть определен графически.

Если бы максимально возможная площадь торможения $F_{\text{возм.торм}} = F_{cdf}$ оказалась бы меньше площади ускорения $F_{\text{уск}} = F_{abc}$, то система выпала бы из синхронизма.

Мерой *запаса динамической устойчивости* системы является отношение площади возможного торможения к площади ускорения, называемое коэффициентом запаса динамической устойчивости:

$$K_{\text{д.у}} = \frac{F_{\text{возм.торм}} - F_{\text{уск}}}{F_{\text{уск}}}.$$

Таким образом, для сохранения динамической устойчивости одномашинной энергосистемы необходимо и достаточно, чтобы площадь возможного торможения была больше или равна площади ускорения.

Контрольные вопросы

1. Как определить угловые характеристики мощности генератора в нормальном режиме и при отключении одной из линий?
2. Как изменяется угол δ во времени при отключении одной из параллельных ЛЭП при сохранении устойчивости?
3. Как изменяется угол δ во времени при отключении одной из параллельных ЛЭП при нарушении устойчивости?

4. Как определяется площадь ускорения и торможения при отключении одной из параллельных ветвей?
5. Как найти угол максимального отклонения δ_m графически?
6. Как определяется максимально возможная площадь торможения?
7. Как находится коэффициент запаса динамической устойчивости?
8. Каково условие сохранения динамической устойчивости простейшей энергосистемы?

ГЛАВА 13. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЛИНИИ И ПРЕДЕЛЬНЫЙ УГОЛ ОТКЛЮЧЕНИЯ

13.1. Динамическая устойчивость при несимметричных коротких замыканиях

Основной причиной нарушения динамической устойчивости энергосистем являются короткие замыкания, приводящие к резким снижениям электромагнитных моментов генераторов. Рассмотрим общий случай несимметричного КЗ в начале линии ([рис. 13.1](#)).

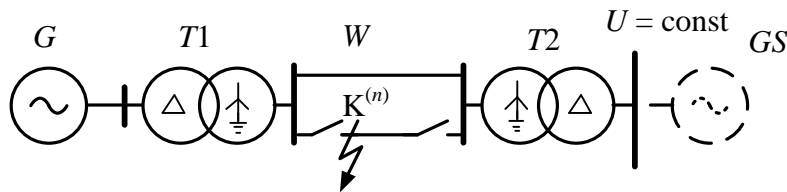


Рис. 13.1. Принципиальная схема простейшей энергосистемы

Для анализа динамической устойчивости следует составить три схемы замещения ([рис. 13.2](#)): для нормального, аварийного и послеаварийного режимов.

По схеме замещения нормального режима ([рис. 13.2, а](#)) определяется взаимное сопротивление X_1 между точкой приложения ЭДС и шинами бесконечной мощности:

$$X_1 = X'_d + X_{T1} + \frac{X_W}{2} + X_{T2}.$$

Тогда выражение для электромагнитной мощности генератора вычисляется по выражению:

$$P_1(\delta) = \frac{E'_q U}{X_1} \sin(\delta).$$

В схеме замещения аварийного режима (рис. 13.2, б) необходимо присоединить к точке короткого замыкания шунт $X_{\Delta}^{(n)}$, составленный из результирующих сопротивлений обратной и нулевой последовательностей (рис. 13.3).

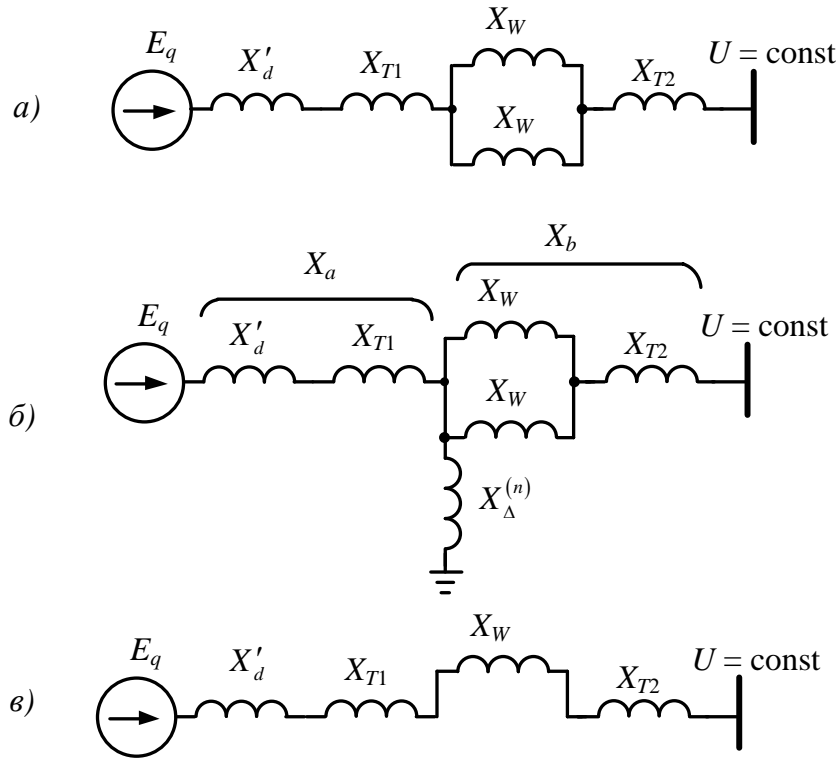


Рис. 13.2. Схемы замещения режимов:

а) нормального, б) аварийного и в) послеаварийного

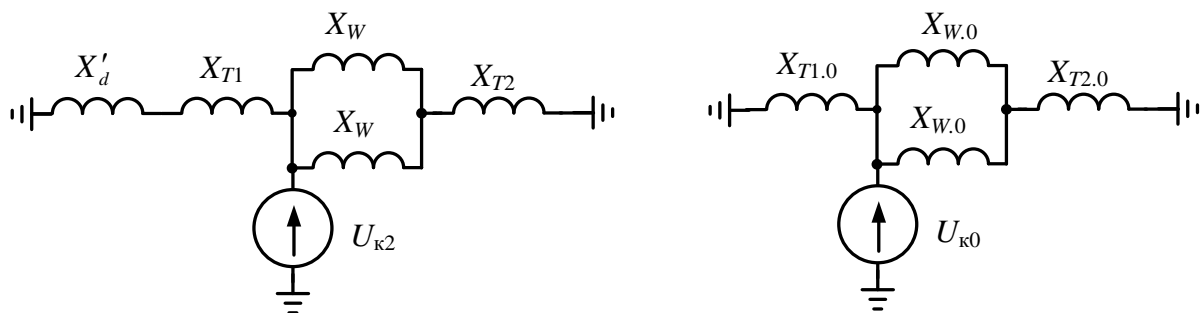


Рис. 13.3. Схемы замещения обратной и нулевой последовательностей

Для различных видов короткого замыкания сопротивление шунта определяется по табл. 7.1. Для определения взаимного сопротивления X_{II} преобразуем звезду $X_a, X_b, X_{\Delta}^{(n)}$ в треугольник (рис. 13.4).

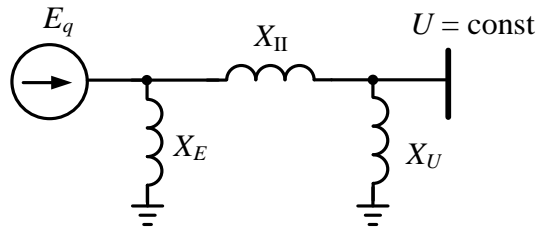


Рис. 13.4. Преобразованная схема замещения в аварийном режиме

$$X_{II} = X'_d + X_{T1} + \frac{X_W}{2} + X_{T2} + \frac{(X'_d + X_{T1}) \left(\frac{X_W}{2} + X_{T2} \right)}{X_{\Delta}^{(n)}};$$

$$X_E = X'_d + X_{T1} + X_{\Delta}^{(n)} + \frac{(X'_d + X_{T1}) X_{\Delta}^{(n)}}{\frac{X_W}{2} + X_{T2}};$$

$$X_U = \frac{X_W}{2} + X_{T2} + X_{\Delta}^{(n)} + \frac{\left(\frac{X_W}{2} + X_{T2} \right) X_{\Delta}^{(n)}}{X'_d + X_{T1}}.$$

Выражение для электромагнитной мощности генератора в аварийном режиме имеет следующий вид:

$$P_{II}(\delta) = \frac{E'_q U}{X_{II}} \sin(\delta).$$

Взаимное сопротивление схемы в послеаварийном режиме:

$$X_{III} = X'_d + X_{T1} + X_W + X_{T2},$$

а электромагнитная мощность:

$$P_{III}(\delta) = \frac{E'_q U}{X_{III}} \sin(\delta).$$

На [рис. 13.5](#) графически показаны угловые характеристики для нормального, аварийного и послеаварийного режимов.

В момент КЗ в связи с изменением параметров схемы происходит переход с характеристики мощности $P_I(\delta)$ на характеристику $P_{II}(\delta)$, и так как угол δ мгновенно измениться не может, то отдаваемая генераторами мощность уменьшается до значения $P_{(0)}$, определяемого углом δ_0 на характеристике $P_{II}(\delta)$.

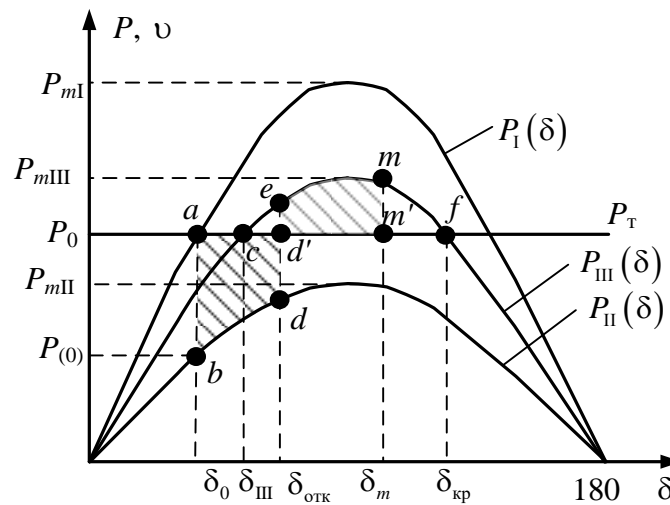


Рис. 13.5. Характеристики мощности трех режимов

Мощность турбины при этом не изменяется вследствие запаздывания ее регуляторов. В результате на валу машины возникает некоторый избыточный момент, обусловленный избытком мощности $\Delta P = P_0 - P_{(0)}$. Под влиянием этого момента ротор машины начинает ускоряться, увеличивая угол δ . Если поврежденная цепь не отключится, то генератор выйдет из синхронизма. Поскольку линия имеет защиту, через определенное время она отключится. Времени $t_{откл}$ соответствует угол отключения $\delta_{откл}$ короткого замыкания.

Отключение КЗ вызывает переход с характеристики мощности аварийного режима $P_{II}(\delta)$ на характеристику $P_{III}(\delta)$ послеаварийного режима. При этом избыточный момент меняет знак, превращаясь из ускоряющего в тормозящий. Ротор, тормозясь, продолжает движение в сторону увеличения угла из-за накопленной в процессе ускорения кинетической энергии. Это движение будет про-

должаться до тех пор, пока площадь торможения $F_{\text{торм}} = F_{d'emn'}$ не станет равной площади ускорения $F_{\text{уск}} = F_{abdd'}$. В точке m скорость ротора становится синхронной. Но движение ротора не прекращается, так как на него действует тормозной избыточный момент, определяемый избытком мощности $\Delta P_{\text{торм}} = P_m - P_0$. Ротор, замедляясь, начинает движение в обратную сторону. В точке c его относительная скорость равна нулю. После точки c ротор по инерции продолжит замедление, из-за потерь колебания ротора будут затухать около нового положения равновесия послеаварийного режима – точки c .

13.2. Предельный угол отключения короткого замыкания

Пользуясь правилом площадей, по [рис. 13.5](#) можно графически найти предельное значение угла $\delta_{\text{откл}}$, при котором устойчивая работа системы сохраняется. Оно определяется равенством площади ускорения $F_{\text{уск}} = F_{abdd'}$ и возможной площади торможения $F_{\text{возм. торм}} = F_{d'ef}$.

Приравнивая к нулю сумму этих площадей, получаем аналитическое выражение для предельного угла отключения:

$$F_{abdd'ef} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{откл.пр}}} (P_0 - P_{m\text{II}} \sin(\delta)) d\delta + \int_{\delta_{\text{откл.пр}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_0 - P_{m\text{III}} \sin(\delta)) d\delta = 0,$$

где $P_{m\text{II}}$, $P_{m\text{III}}$ – амплитуды характеристик мощности при КЗ и отключении поврежденной цепи.

Раскрывая определенные интегралы, запишем:

$$P_0 (\delta_{\text{откл.пр}} - \delta_0) + P_{m\text{II}} (\cos \delta_{\text{откл.пр}} - \cos \delta_0) + P_0 (\delta_{\delta_{\text{кр}}} - \delta_{\text{откл.пр}}) + \\ + P_{m\text{III}} (\cos \delta_{\text{кр}} - \cos \delta_{\text{откл.пр}}) = 0,$$

откуда

$$\cos \delta_{\text{откл.пр}} = \frac{P_0 (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) + P_{m\text{III}} \cos \delta_{\text{кр}} - P_{m\text{II}} \cos \delta_0}{P_{m\text{III}} - P_{m\text{II}}}, \quad (13.1)$$

где все углы выражены в радианах. Критический угол $\delta_{\text{кр}}$ определяется по выражению:

$$\delta_{\text{кр}} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{m\text{III}}}.$$

Однако для практических расчетов этого недостаточно. Чтобы предъявить к выключателям и к релейной защите требования в отношении быстроты отключения, необходимо знать не угол отключения, а тот промежуток времени, в течение которого ротор успевает достигнуть этого угла, т. е. так называемое предельно допустимое время отключения короткого замыкания.

С помощью правила площадей определить время отключения невозможно. Это время может быть определено решением уравнения движения ротора генератора известными методами решения дифференциальных уравнений (например, методом последовательных интервалов).

13.3. Анализ трехфазного короткого замыкания графическим методом

При трехфазном коротком замыкании в точке К ([рис. 13.1](#)) взаимное сопротивление схемы становится бесконечно большим, так как сопротивление шунта $X_{\Delta}^{(n)}$ ([рис. 13.2, б](#)) равно нулю. При этом характеристика мощности аварийного режима совпадает с осью абсцисс ([рис. 13.6](#)).

Ротор генератора начинает свое относительное движение под действием избыточного момента, равного механическому моменту турбины. Дифференциальное уравнение движения ротора при этом принимает вид:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0.$$

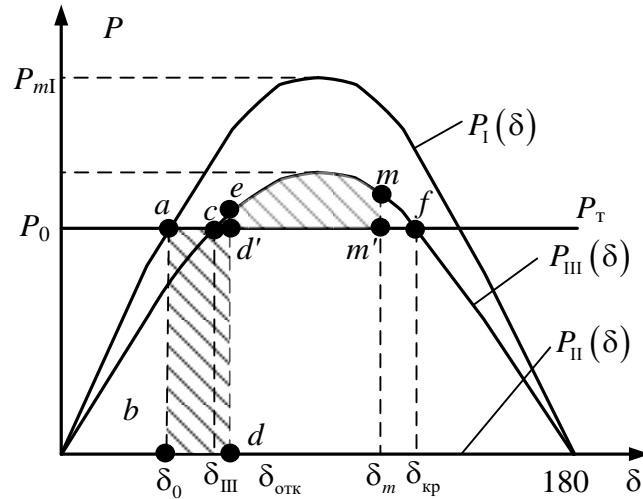


Рис. 13.6. Характеристики мощности при трехфазном замыкании

Это уравнение линейно. Перепишем его в следующем виде:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_0}{T_j}.$$

Отсюда, взяв интеграл от левой и правой частей, получим:

$$\omega = \frac{P_0}{T_j} t + c_1.$$

При $t=0$ относительная скорость ротора $\omega=0$ и, следовательно, $c_1=0$.

Проинтегрировав полученное выражение, имеем:

$$\delta = \frac{P_0}{T_j} \cdot \frac{t^2}{2} + c_2.$$

Постоянная интегрирования c_2 определяется из условий, что при $t=0$ $\delta = \delta_0$, следовательно, $c_2 = \delta_0$. Окончательно зависимость угла от времени будет иметь вид:

$$\delta = \frac{P_0}{T_j} \cdot \frac{t^2}{2} + \delta_0. \quad (13.2)$$

Возрастание угла происходит по квадратической параболе, а время, отвечающее какому-либо значению угла δ , находится из уравнения [\(13.2\)](#):

$$t = \sqrt{\frac{2T_j(\delta - \delta_0)}{P_0}}. \quad (13.3)$$

Предельный угол отключения трехфазного КЗ может быть определен из выражения [\(13.1\)](#), упрощенного условием $P_{mII} = 0$:

$$\cos \delta_{\text{откл.пр}} = \frac{P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{\text{кр}}}{P_{mIII}}.$$

Предельное время отключения при трехфазном коротком замыкании определяется из выражения [\(13.3\)](#):

$$t_{\text{откл.пр}} = \sqrt{\frac{2T_j(\delta_{\text{откл.пр}} - \delta_0)}{P_0}},$$

где t [рад]; T_j [рад]; δ [рад]; P [о. е.].

Пример решения задачи

Задача

В электропередаче, изображенной на [рис. 13.7](#), в точке К происходит двухфазное КЗ на землю. В момент времени t_1 , соответствующий углу $\delta_2 = 40^\circ$, оно переходит в трехфазное, а затем в момент времени t_2 , соответствующий

углу $\delta_2 = 50^\circ$, поврежденная линия отключается. Определить, сохранится ли динамическая устойчивость.

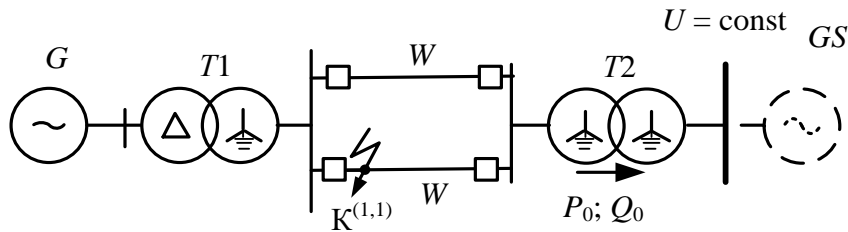


Рис. 13.7. Схема электропередачи к задаче

Исходные данные

Параметры исходного режима и параметры электропередачи при $S_G = 220$ МВ·А и базисном напряжении ступени $S_G = 220$ кВ представлены в [табл. 13.1](#).

Таблица 13.1

Параметры исходного режима и схемы замещения

P_0 , о. е.	Q_0 , о. е.	U_{GS} , о. е.	$X_d'' = X_{G2}$, о. е.	x_{T1} , о. е.	x_{T2} , о. е.	x_w , о. е. (для 2 цепей)	x_{w0} , о. е.	T_{j*6} , о. е.
1	0,2	1	0,295	0,138	0,122	0,244	0,732	8,18

Решение

Определим суммарное реактивное сопротивление и ЭДС генератора в нормальном режиме. Суммарное сопротивление системы в нормальном режиме:

$$x_{c1} = X_d'' + x_{T1} + x_w + x_{T2} = 0,295 + 0,138 + 0,244 + 0,122 = 0,799 \text{ о. е.}$$

ЭДС и угол опережения генератора:

$$E_G = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 x_c}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_c}{U_c} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0,2 \cdot 0,799}{1} \right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 0,799}{1} \right)^2} = 1,41 \text{ о. е.}$$

$$\operatorname{tg}(\delta_0) = \frac{\frac{P_0 x_c}{U_c}}{U_c + \frac{Q_0 x_c}{U_c}} = \frac{1 \cdot 0,799}{1 + \frac{0,2 \cdot 0,799}{1}} = 0,688;$$

$$\delta_0 = \operatorname{arctg}(0,688) = 34,56^\circ.$$

Составим схемы замещения (рис. 13.8) прямой, обратной и нулевой последовательностей для аварийного режима.

Найдем результирующие сопротивления обратной и нулевой последовательностей:

$$x_{\text{рез.2}} = \frac{(x_{G2} + x_{T1.2})(x_{W.2} + x_{T2.2})}{x_{G2} + x_{T1.2} + x_{W.2} + x_{T2.2}} = \frac{(0,295 + 0,138)(0,244 + 0,122)}{0,799} = 0,198 \text{ о. е.};$$

$$x_{\text{рез.0}} = \frac{x_{T1.0}(x_{W.0} + x_{T2.0})}{x_{T1.0} + x_{W.0} + x_{T2.0}} = \frac{0,138(0,244 + 0,122)}{0,138 + 0,244 + 0,122} = 0,119 \text{ о. е.}$$

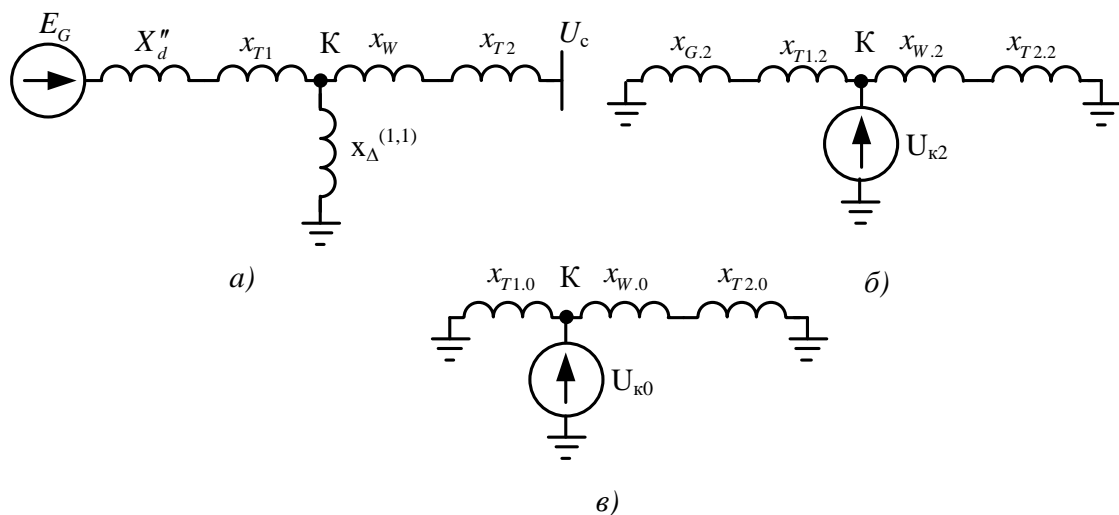


Рис. 13.8. Схема замещения аварийного режима:

а) прямой; б) обратной; в) нулевой последовательностей

Добавочное сопротивление для двухфазного замыкания на землю равно:

$$x_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{x_{\text{рез.2}} x_{\text{рез.0}}}{x_{\text{рез.2}} + x_{\text{рез.0}}} = \frac{0,198 \cdot 0,119}{0,198 + 0,119} = 0,074 \text{ о. е.}$$

Взаимное сопротивление схемы в аварийном режиме находится преобразованием «звезда – треугольник» схемы на [рис. 13.8, а](#).

$$x_{c.ав} = (X'' + x_{T1}) + (x_w + x_{T2}) + \frac{(X''_d + x_{T1})(x_w + x_{T2})}{x_{\Delta}^{(1,1)}};$$

$$x_{c.ав} = 0,799 + \frac{(0,295 + 0,138)(0,244 + 0,122)}{0,074} = 2,232 \text{ о. е.}$$

В послеаварийном режиме отключена одна параллельная ЛЭП, в результате чего сопротивление ЛЭП увеличится вдвое, и суммарное сопротивление системы составит:

$$x_{c.п.ав} = X''_d + x_{T1} + 2x_w + x_{T2} = 0,295 + 0,138 + 2 \cdot 0,244 + 0,122 = 1,043 \text{ о. е.}$$

Амплитуды характеристик мощности для нормального режима:

$$P_{\max 1} = \frac{E_G U_c}{x_{c1}} = \frac{1,41 \cdot 1}{0,799} = 1,763 \text{ о. е.},$$

первого аварийного режима (двухфазное замыкание на землю):

$$P_{\max 2} = P_{\max.ав} = \frac{E_G U_c}{x_{c.ав}} = \frac{1,41 \cdot 1}{2,232} = 0,48 \text{ о. е.},$$

второго аварийного режима (трехфазное замыкание):

$$P_{\max 3} = 0 \text{ о. е.},$$

послеаварийного режима:

$$P_{\max 4} = P_{\max \text{ п.ав}} = \frac{E_G U_c}{x_{\text{с.п.ав}}} = \frac{1,41 \cdot 1}{1,043} = 1,35 \text{ о. е.}$$

Построим характеристики мощности электропередачи (рис. 13.9) и заштрихуем площади ускорения и возможного торможения.

Для определения площадей ускорения и торможения определим углы пересечения послеаварийной характеристики с P_0 .

$$\delta_3 = \arcsin\left(\frac{P_0}{P_{\max 4}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,35}\right) = 47,78^\circ;$$

$$\delta_{\text{кр}} = 180^\circ - \delta_3 = 180^\circ - 47,78^\circ = 132,22^\circ.$$

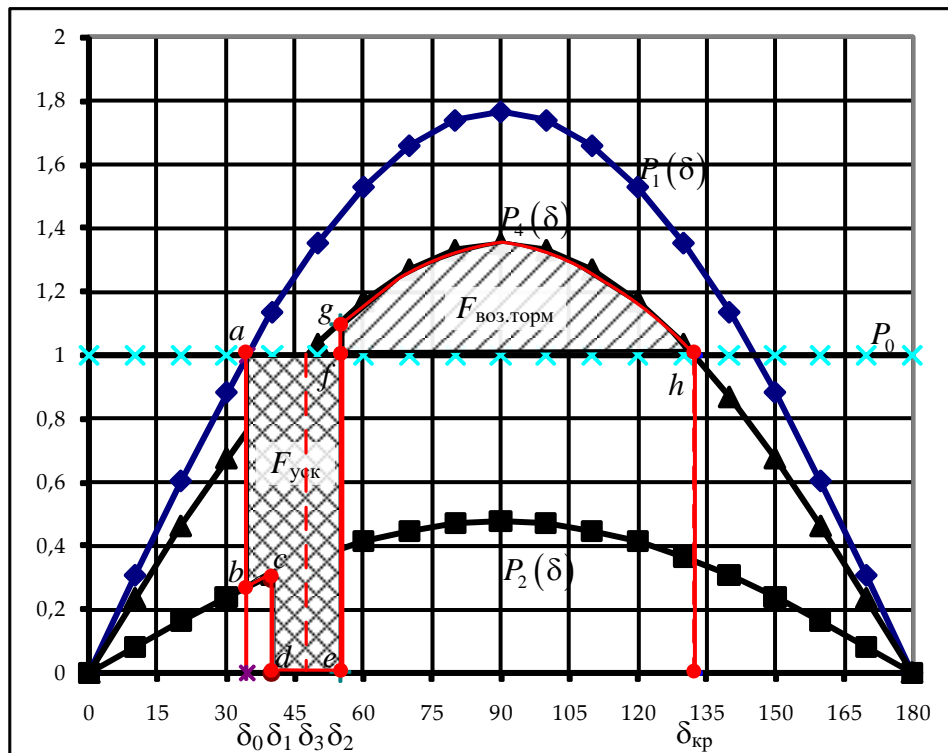


Рис. 13.9. Характеристики мощности

Определим площадь ускорения:

$$f_{\text{уск}} = f_{\text{abcdef}} = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_0 - P_{\max 2} \sin(\delta)) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_0 - 0) d\delta;$$

$$f_{abcdef} = P_0(\delta_1 - \delta_0) + P_{\max 2}(\cos(\delta_1) - \cos(\delta_0)) + P_0(\delta_2 - \delta_1);$$

$$f_{abcdef} = P_0(\delta_2 - \delta_0) + P_{\max 2}(\cos(\delta_1) - \cos(\delta_0));$$

$$f_{abcdef} = 1 \frac{(55^\circ - 34,56^\circ)\pi}{180^\circ} + 0,48(\cos(40^\circ) - \cos(34,56^\circ)) = 0,329.$$

Определим площадь торможения:

$$f_{\text{воз.торм}} = f_{fgh} = \int_{\delta_2}^{\delta_{\text{кр}}} (P_{\max 4} \sin(\delta) - P_0) d\delta;$$

$$f_{fgh} = -P_{\max 4}(\cos(\delta_{\text{кр}}) - \cos(\delta_2)) - P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta_2);$$

$$f_{fgh} = -1,35(\cos(132,22^\circ) - \cos(55^\circ)) - 1(132,22^\circ - 55^\circ) \frac{\pi}{180^\circ} = 0,334.$$

Так как площадь ускорения меньше площади возможного торможения, то устойчивость сохранится.

Контрольные вопросы

1. В чем суть анализа динамической устойчивости графическим методом?
2. Как выглядит схема замещения аварийного режима простейшей энергосистемы при коротком замыкании?
3. При каком КЗ амплитуда мощности угловой характеристики генератора в аварийном режиме имеет наибольшее значение?
4. При каком виде КЗ амплитуда мощности угловой характеристики генератора имеет наименьшее значение? Какова величина этого наименьшего значения?
5. Как анализируется динамическая устойчивость при несимметричных КЗ на линии?

6. Что понимается под предельным значением угла отключения тока КЗ ($\delta_{\text{откл.пр.}}$)?
7. Дайте определение предельно допустимому времени отключения КЗ по динамической устойчивости?
8. Какому виду КЗ соответствует минимальное предельно допустимое время отключения КЗ по динамической устойчивости?
9. Как найти предельное время отключения КЗ по динамической устойчивости?
10. Сформулируйте условие сохранения динамической устойчивости при отключении КЗ в линии.

ГЛАВА 14. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

14.1. Автоматическое повторное включение

Значительная часть коротких замыканий, появляющихся на линиях электропередачи, может исчезнуть, если отключить поврежденный участок от источников питания. В этом случае эффективно применение *автоматического повторного включения* (АПВ) того элемента, который был отключен защитой из-за возникновения короткого замыкания. АПВ называют трехфазным, если отключаются и вновь включаются все три фазы поврежденного элемента, или однофазным (пофазным) (ОАПВ), если отключаются только одна или две поврежденные фазы. АПВ считается *успешным*, если за время отключения короткое замыкание исчезает и после повторного включения может восстановиться нормальная работа, и *неуспешным*, если повторное включение производится на сохранившееся короткое замыкание. Восстановление нормальной работы при успешных и неуспешных АПВ ограничивается возможным нарушением динамической устойчивости энергосистемы.

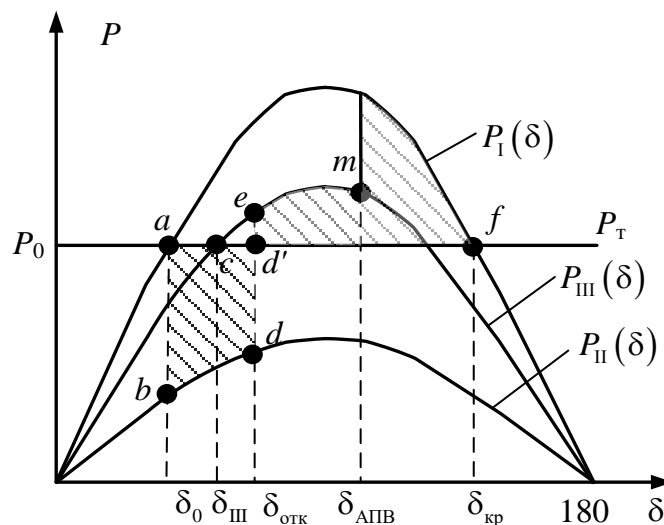


Рис. 14.1. Влияние АПВ на динамическую устойчивость

Успешное АПВ увеличивает площадь возможного торможения, что способствует сохранению динамической устойчивости ([рис. 14.1](#)).

14.2. Отключение части генераторов

Отключение генераторов (ОГ) во время динамического перехода является наиболее распространенным средством сохранения динамической устойчивости простых и сложных электроэнергетических систем. Положительными сторонами ОГ являются высокая эффективность и простота исполнения, ОГ предотвращает существенные отрицательные последствия, что способствует его широкому применению.

Отключение генераторов как средство сохранения динамической устойчивости приводит к длительным, до 10 часов, потерям генераторных мощностей, ограничениям потребителей и уменьшает надежность работы оборудования тепловых электростанций.

На гидроэлектростанциях возврат отключенных генераторов производится достаточно быстро, однако и в этих случаях возможны кратковременные отключения потребителей. Во всех случаях потеря больших генераторных мощностей создает напряженные режимы и увеличивает вероятность появления новых аварийных ситуаций в энергосистемах.

ОГ является универсальным средством, используемым для сохранения динамической устойчивости простых и сложных энергосистем при наличии и отсутствии АПВ линий электропередачи.

При ОГ резко уменьшается эквивалентная мощность турбин и увеличивается эквивалентное сопротивление генераторов электростанций. Уменьшение мощности турбин приводит к увеличению площади возможного торможения генераторов, а увеличение эквивалентного сопротивления способствует снижению этого эффекта за счет уменьшения амплитуды угловой характеристики мощности.

На [рис. 14.2](#) показаны угловые характеристики мощности генераторов энергосистемы для нормального, аварийного и послеаварийного режимов.

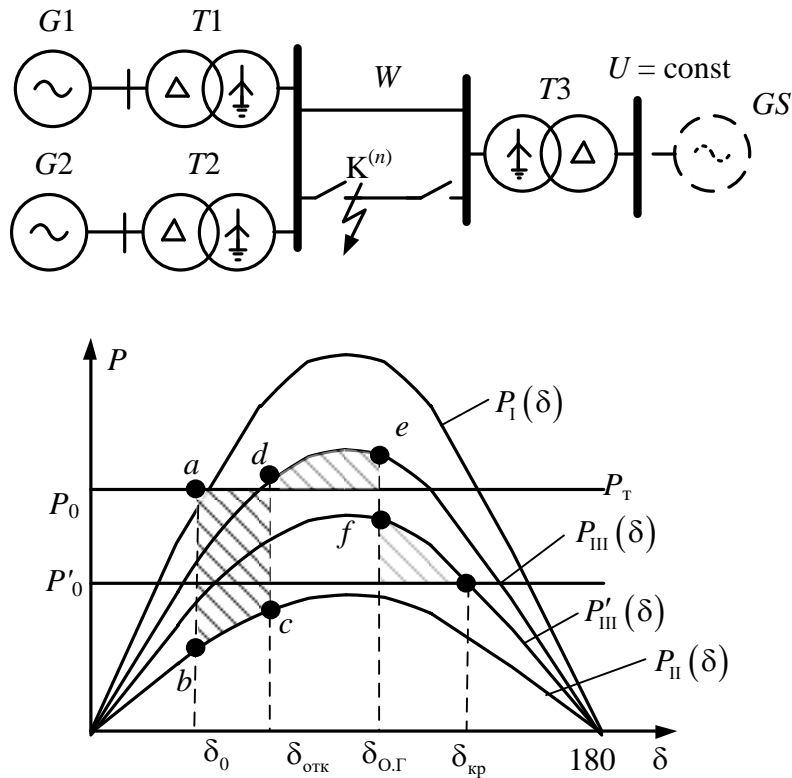


Рис. 14.2. Влияние отключения части генераторов на динамическую устойчивость

Для послеаварийного режима, наступающего после отключения поврежденной цепи, приведены угловые характеристики, соответствующие полному и неполному (после ОГ) составам генераторов. Видно, что площадка возможного торможения в результате отключения части генераторов увеличилась, и динамическая устойчивость энергосистемы сохраняется. При отсутствии ОГ устойчивость не сохраняется.

14.3. Автоматическое регулирование возбуждения

Со снижением напряжения на шинах генератора при коротких замыканиях вступает в действие автоматическое регулирование возбуждения (АРВ). При этом повышается ток в обмотке возбуждения и повышается амплитуда электромагнитной мощности аварийного режима, в результате чего происходит соответствующий переход с угловой характеристики мощности $P_{II}(\delta)$ на характеристику $P'_{II}(\delta)$ (рис. 14.3).

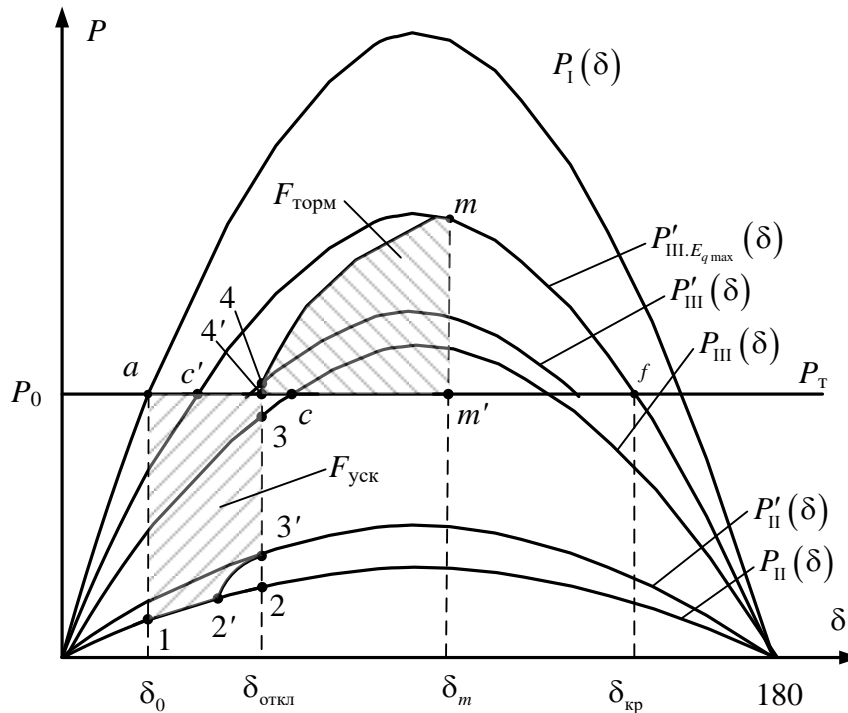


Рис. 14.3. Влияние АРВ на динамическую устойчивость

Участок 2'–3' отражает запаздывание в подъеме E_q . При отключении поврежденной цепи электромагнитная мощность скачком изменяется от точки 3' до точки 4, расположенной на угловой характеристике $P'_{III}(\delta)$, с повышенным значением ЭДС E_q . При дальнейшем увеличении угла ЭДС E_q увеличивается, и изображающая точка выходит на граничную кривую $P_{III E_{q, \max}}(\delta)$, построенную при «потолочном» значении $E_{q, \max}$ (участок 4–5). На участке 5 – m мощность изменяется по граничной кривой. Угол при этом нарастает до тех пор, пока площадка торможения не сравняется с площадкой ускорения.

В данном случае роль АРВ сводится к уменьшению площади ускорения и увеличению площади возможного торможения.

14.4. Автоматическая разгрузка по частоте (АЧР)

При снижении частоты в СЭС уменьшается реактивная мощность, генерируемая источниками, и увеличивается потребление реактивной мощности нагрузкой. Это приводит к понижению напряжения в узлах нагрузки,

а при определенных условиях – к лавине частоты и лавине напряжения, при которых происходит массовое отключение потребителей и нарушение параллельной работы электростанций.

Снижение частоты до опасных пределов можно предотвратить путем:

- 1) ввода вращающегося резерва.
- 2) автоматического отключения некоторой части нагрузки, т. е. АЧР.

14.5. Аварийная разгрузка турбин генераторов

Действие устройства аварийной разгрузки заключается в том, что спустя некоторое время после возникновения КЗ подается сигнал на закрытие задвижки аппарата впуска энергоносителя (воды или пара) в турбину. При этом механическая мощность турбины падает с $P_{0\max}$ до $P_{0\min}$ (рис. 14.4).

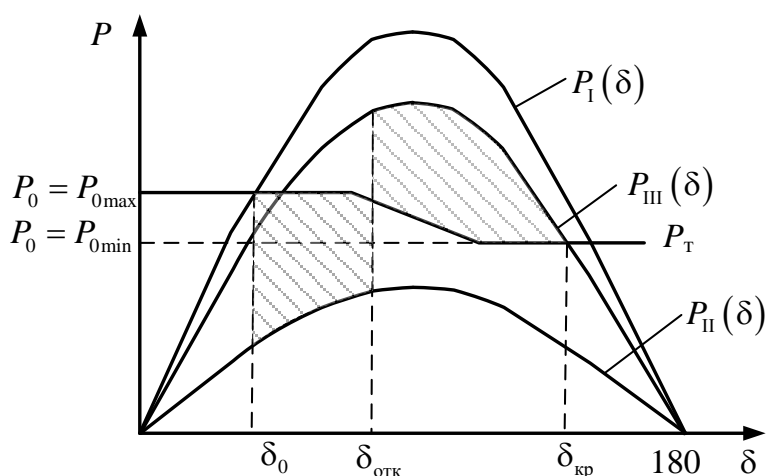


Рис. 14.4. Влияние снижения мощности турбины на динамическую устойчивость

Площадь ускорения $F_{\text{уск}}$ уменьшается, а площадь возможного торможения увеличивается, что приводит к повышению запаса динамической устойчивости СЭС. После ликвидации аварии первичные двигатели автоматически или при участии персонала станции вновь набирают прежнюю мощность.

Контрольные вопросы

1. Как можно повысить динамическую устойчивость электрической системы?
2. За счет чего повышается устойчивость при применении АПВ?
3. Как влияет на устойчивость и надежность энергосистемы отключение части генераторов?
4. Как влияет на устойчивость наличие системы АРВ генератора?
5. Какие недостатки имеются при повышении динамической устойчивости отключением части генераторов?
6. Как сказывается на устойчивости и надежности электрической системы наличие вращающихся резервов?
7. Как влияет на устойчивость энергосистемы аварийная разгрузка турбин генераторов?

ГЛАВА 15. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРУЗКИ

5.1. Вводные замечания

Нагрузка относится к группе силовых элементов электроэнергетической системы. Ее технологические характеристики оказывают непосредственное влияние на режимы энергосистем, в том числе и на устойчивость параллельной работы генераторов электростанций. Однако, поскольку нагрузку в значительной мере составляют синхронные и асинхронные электродвигатели, вопрос об устойчивости параллельной работы касается и самой нагрузки.

Относительно синхронных электродвигателей потеря устойчивости означает нарушение их синхронной работы (выпадение из синхронизма) в виде перехода в асинхронный режим. Для асинхронных электродвигателей следствием потери устойчивости является их останов. Для статических элементов нагрузки, таких как осветительные элементы, батареи статических конденсаторов, шунтирующие реакторы и т. п., вопрос об устойчивости параллельной работы рассматривается лишь в смысле их влияния на устойчивость электродвигателей и энергосистемы в целом.

При анализе статической устойчивости электродвигателей и генераторов важно правильно выбрать математические модели нагрузки. Как правило, в практических расчетах статической устойчивости работы электрических машин нагрузку учитывают в виде статистических характеристик активной и реактивной мощностей по напряжению и частоте.

15.2. Реактор и батарея статических конденсаторов

Активная мощность реакторов и батарей статических конденсаторов определяется потерями. Как правило, она не учитывается.

Статические характеристики реактивной мощности реактора Q_{PU} и батареи статических конденсаторов $Q_{КБУ}$ определяются квадратичными зависимо-

стями ([рис. 15.1](#)):

$$Q_{PU} = \frac{U^2}{X_P};$$

$$Q_{КБУ} = -\frac{U^2}{X_{КБ}}.$$

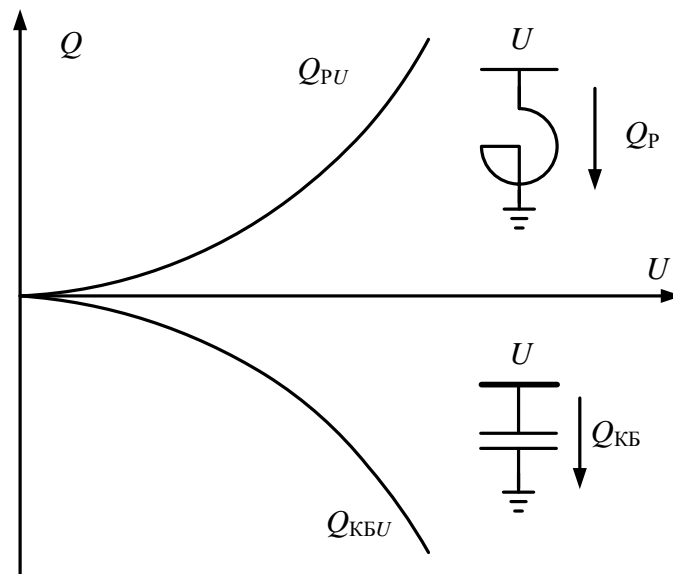


Рис. 15.1. Статические характеристики реактивной мощности реактора Q_{PU} и батареи статических конденсаторов $Q_{КБУ}$

15.3. Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор представляет собой синхронную электрическую машину с регулируемым током возбуждения. Потребляемая синхронным компенсатором активная мощность, расходуемая на преодоление сил трения, по величине мала и в практических расчетах часто не учитывается. Направление и значение реактивной мощности зависят от соотношения между величинами напряжения U в узле подключения и синхронной ЭДС E_q ([рис. 15.2](#)).

Из векторной диаграммы напряжений и тока синхронного компенсатора следует, что

$$I = \frac{U - E_q}{X_d};$$

$$Q_{СКУ} = \frac{U^2 - E_q U}{X_d}.$$

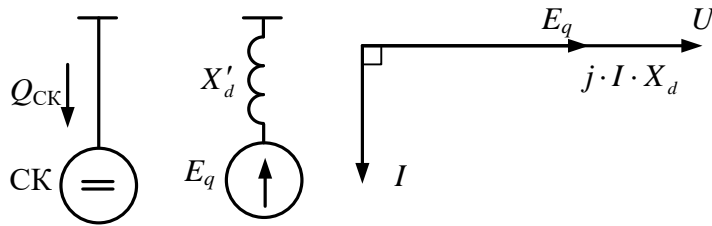


Рис. 15.2. Схемы включения и замещения синхронного компенсатора и его векторная диаграмма

Для примера на [рис. 15.3](#) приведены статические характеристики синхронного компенсатора, вычисленные при следующих условиях:

- 1) $X_d = 1,0$, $E_q = 0,5$;
- 2) $X_d = 1,0$, $E_q = 1,5$.

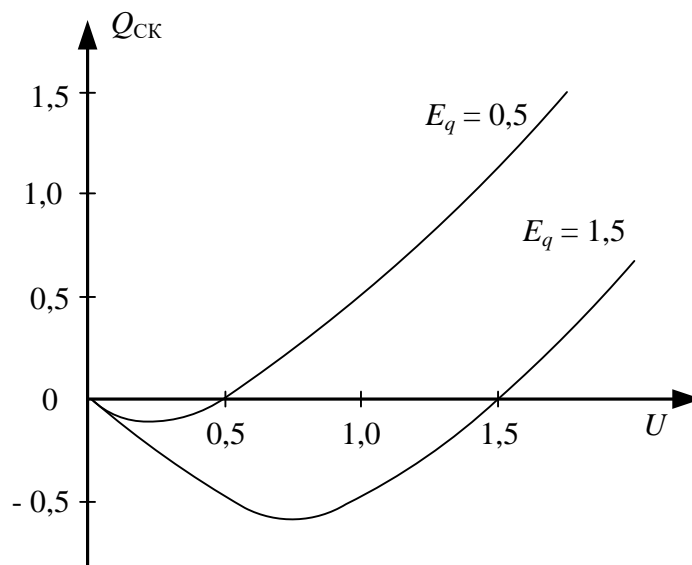


Рис. 15.3. Статические характеристики СК

15.4. Синхронный двигатель

Активная мощность P , потребляемая синхронным двигателем, определяется мощностью приводимого в движение механизма $P_{\text{мех}}(\omega)$ и, если скорость вращения ротора двигателя остается постоянной, то при неучете потерь активной мощности в статорных обмотках зависимость $P_{\text{сд}U}$ представляет собой горизонтальную линию.

Сохранение постоянного значения активной мощности синхронного двигателя при изменениях питающего напряжения осуществляется за счет компенсирующего изменения его внутреннего угла δ_d между векторами напряжения и синхронной ЭДС в соответствии с выражением:

$$P_{\text{сд}} = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta_d.$$

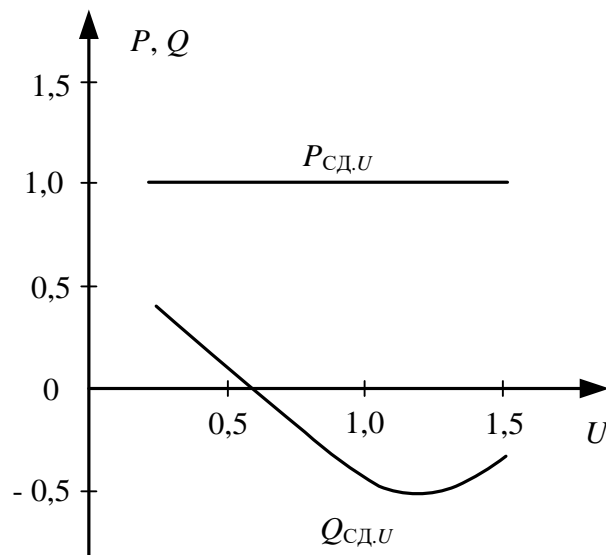


Рис. 15.4. Статические характеристики синхронного двигателя

Реактивную мощность, потребляемую синхронным двигателем, можно вычислить по выражению:

$$Q_{\text{сд}} = \frac{U^2}{X_d} - \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta_d.$$

Однако более удобным для построения статических характеристик является выражение, не содержащее угол δ_d :

$$Q_{\text{сд}} = \frac{U^2}{X_d} - \sqrt{\left(\frac{E_q U}{X_d}\right)^2 - P_{\text{сд}}^2}.$$

На [рис. 15.4](#) приведены статические характеристики $P_{\text{сд}U}$, $Q_{\text{сд}}$ синхронного двигателя для значений $E_q = 2$, $P_{\text{сд}U} = 1$, $X_d = 1$.

15.5. Асинхронный двигатель

Активная мощность $P_{\text{АД}}$, потребляемая двигателем из сети, определяется мощностью приводимого в движение механизма $P_{\text{мех}}$, которая зависит от скорости вращения ротора двигателя и, соответственно, от скольжения:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{мех}}(s).$$

Характеристика активной мощности двигателя определяется параметрами его схемы замещения. В упрощенном виде такая схема приведена на [рис. 15.5](#).

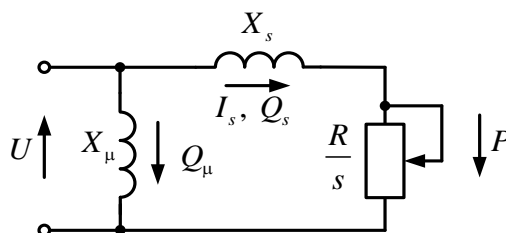


Рис. 15.5. Схема замещения АД

В соответствии со схемой замещения двигателя для электромагнитной мощности P имеем:

$$P = I_s^2 \frac{R}{s} = \frac{U^2}{X_s^2 + \left(\frac{R}{s}\right)^2} \frac{R}{s} = \frac{U^2 s R}{X_s^2 s^2 + R^2}.$$

Электромагнитная мощность асинхронного двигателя является функцией напряжения и скольжения. Обычно построение характеристик этой мощности производится в функции скольжения при фиксированных значениях напряжения (рис. 15.6).

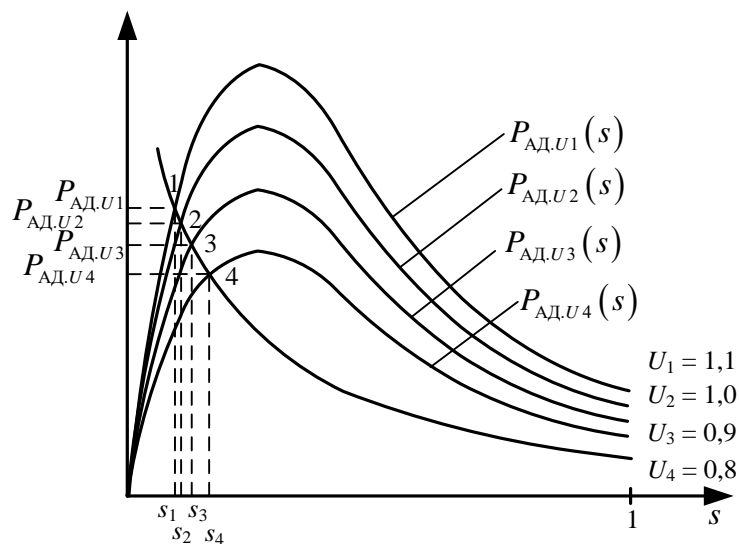


Рис. 15.6. Характеристики активной мощности АД при различных напряжениях

В общем случае активная мощность асинхронного двигателя зависит от напряжения. Однако, если $P_{\text{мех}}(s) = \text{const}$, то и $P_{\text{АД},U} = \text{const}$.

Соответственно схеме замещения реактивная мощность асинхронного двигателя представляет собой сумму двух составляющих:

$$Q_{\text{АД},U} = Q_{\mu} + Q_s = \frac{U^2}{X_{\mu}} + I_s^2 X_s = \frac{U^2}{X_{\mu}} + \frac{U^2 s^2 X_s}{X_s^2 s^2 + R^2}.$$

Статическая характеристика реактивной мощности по напряжению изображена на [рис. 15.7](#).

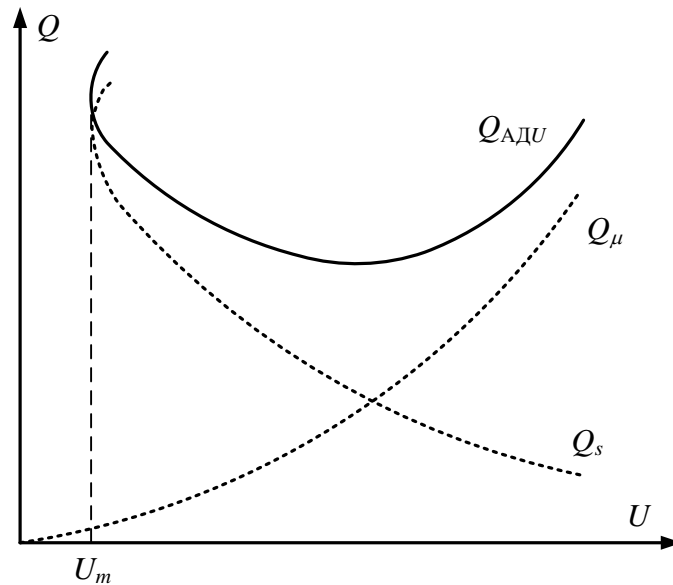


Рис. 15.7. Характеристики реактивной мощности АД

Следует отметить, что ветвь статической характеристики Q_{ADU} , расположенная выше точки m , расчетом вычисляется, но на практике не реализуется. При снижении напряжения до величины U_m , соответствующей точке m , двигатель останавливается. Чтобы получить часть характеристики на интервале значений напряжений ниже U_m , нужно проводить построение для остановленного двигателя, то есть при скольжении, равном единице.

15.6. Коэффициенты крутизны и регулирующие эффекты нагрузки

Регулирующие эффекты статических характеристик — это численные значения частных производных мощностей по соответствующим параметрам, выраженные в относительных единицах, когда в качестве базисных величин принимаются значения параметров режима P_0 , Q_0 , U_0 , f_0 в рассматриваемых точках статических характеристик:

$$H_{PU} = \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{U_0}{P_0}; \quad H_{Pf} = \frac{\partial P}{\partial f} \cdot \frac{f_0}{P_0}; \quad H_{QU} = \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot \frac{U_0}{Q_0}; \quad H_{Qf} = \frac{\partial Q}{\partial f} \cdot \frac{f_0}{Q_0}.$$

Он показывает степень снижения активной и реактивной мощностей нагрузки от уменьшения напряжения на ее выводах.

Регулирующий эффект во всех точках статической характеристики нагрузки, заданной постоянным активным сопротивлением, получается одинаковым по величине. Учитывая, что производные по напряжению должны быть вычислены в относительных единицах при значениях напряжения и мощности в рассматриваемых точках, получим:

$$H_{PU} = \frac{\partial P}{\partial U} \cdot \frac{U_0}{P_0} = \frac{\partial}{\partial U} \left(\frac{U^2}{R_H} \right) \frac{U_0}{P_0} = 2 \frac{U}{R_H} \cdot \frac{U_0}{P_0} = 2 \frac{U^2}{R_H P_0} = 2.$$

Понятие «регулирующий эффект нагрузки» широко используется при решении задач устойчивости энергосистем.

Пример решения задачи

Задача

К шинам подстанции напряжением 6 кВ подключен асинхронный двигатель ([рис. 15.8, а](#)) мощностью 875 кВт. Параметры асинхронного двигателя, отнесенные к номинальному напряжению и мощности, указаны на схеме замещения ([рис. 15.8, б](#)).

Построить характеристику потребляемой двигателем реактивной мощности при изменении напряжения на шинах подстанции и определить критическое напряжение, при котором произойдет опрокидывание двигателя, при условии, что механическая мощность постоянна. Построить зависимость активной мощности в функции скольжения при разных напряжениях на шинах.

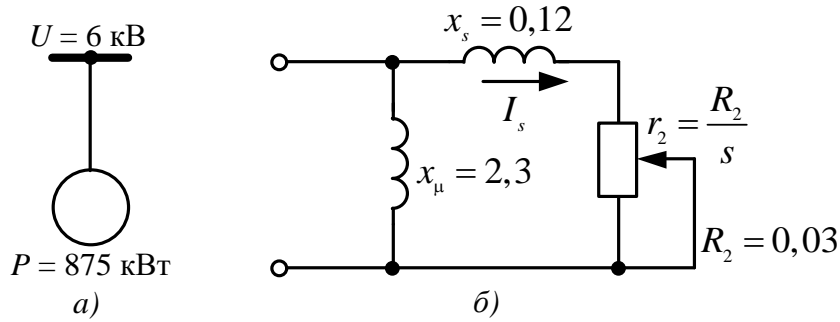


Рис. 15.8. Схема подключения асинхронного двигателя а) и его схема замещения б)

Решение

Ввиду большой мощности напряжение на шинах подстанции можно считать независимым от режима двигателя. Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, определяется по формуле:

$$P = I_s^2 \frac{R_2}{s} = \frac{U^2 R_2 s}{(s x_s)^2 + R_2^2}. \quad (15.1)$$

Учитывая, что $P = P_{\text{мех}} = 1$, из выражения (15.1), задаваясь скольжением s , находим соответствующие напряжение и ток I_s по выражениям:

$$U = \sqrt{\frac{P_{\text{мех}} \left((s x_s)^2 + R_2^2 \right)}{R_2 s}};$$

$$I_s^2 = P_{\text{мех}} \frac{s}{R_2}.$$

Из схемы замещения по полученным значениям U и I_s^2 находим потребляемую реактивную мощность двигателя:

$$Q = Q_{\mu} + Q_s = \frac{U^2}{x_{\mu}} + I_s^2 x_s.$$

Сведем расчеты в таблицу.

Таблица 15.1

Результаты расчетов $Q(U)$

s	0,04	0,045	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,6	0,8	1
$P_{\text{мех}}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U	0,877	0,830	0,790	0,590	0,496	0,490	0,494	0,517	0,581	0,649	0,714
I^2	1,333	1,5	1,667	3,333	6,667	8,333	10	13,33	20	26,67	33,33
Q_{μ}	0,334	0,299	0,271	0,151	0,107	0,104	0,106	0,116	0,147	0,183	0,222
Q_s	0,16	0,18	0,2	0,4	0,8	1	1,2	1,6	2,4	3,2	4
Q	0,494	0,479	0,471	0,551	0,907	1,104	1,306	1,716	2,547	3,383	4,222

По данным [табл. 15.1](#) построим график зависимости реактивной мощности от напряжения ([рис. 15.9](#)).

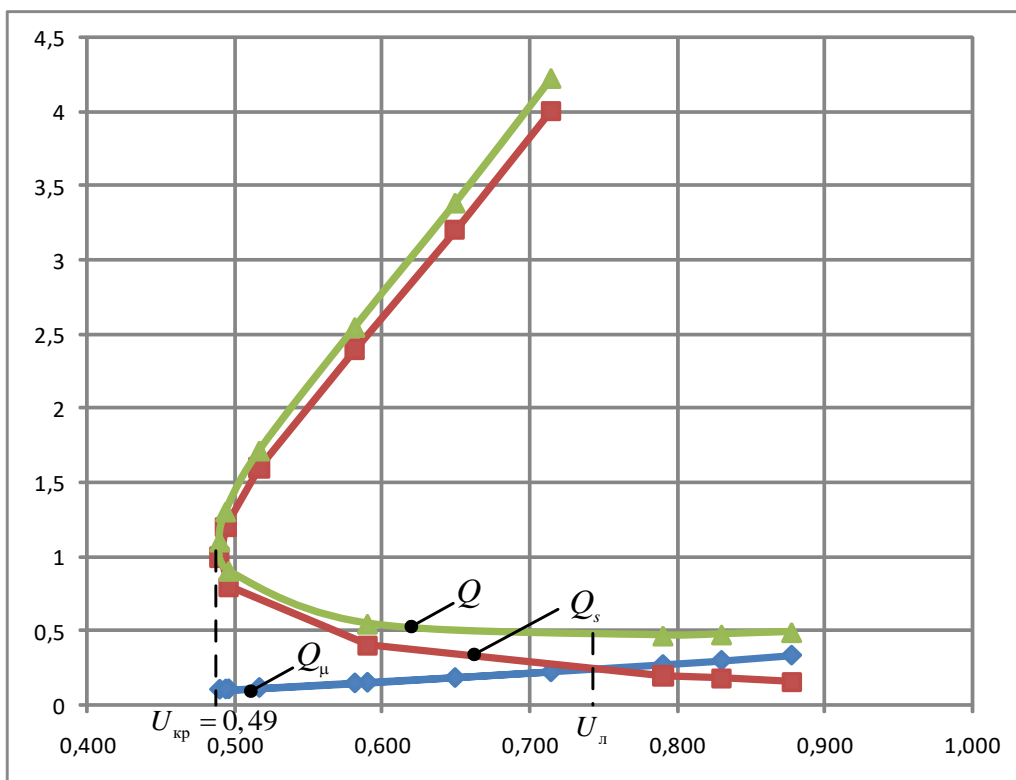


Рис. 15.9. Статическая характеристика реактивной мощности двигателя по напряжению

На рисунке видно, что при снижении напряжения от номинального до $U_{\text{л}}$ происходит снижение потребляемой реактивной мощности, что соответствует положительному регулируемому коэффициенту нагрузки. Дальнейшее сниже-

ние напряжения приводит к росту потребляемой реактивной мощности, что может способствовать повышению потерь напряжения в линиях и дальнейшему лавинообразному снижению напряжения вплоть до критического. Данное явление называется лавиной напряжения, а напряжение $U_{л}$ – напряжением лавины.

Изменяя скольжение от 0 до 1, по выражению (15.1) построим зависимости активной мощности двигателя от скольжения при различных постоянных напряжениях ($U = 1, U = 1,1, U = 0,9, U = 0,8, U = 0,7, U = 0,49$). Результаты расчетов представлены в табл. 15.2.

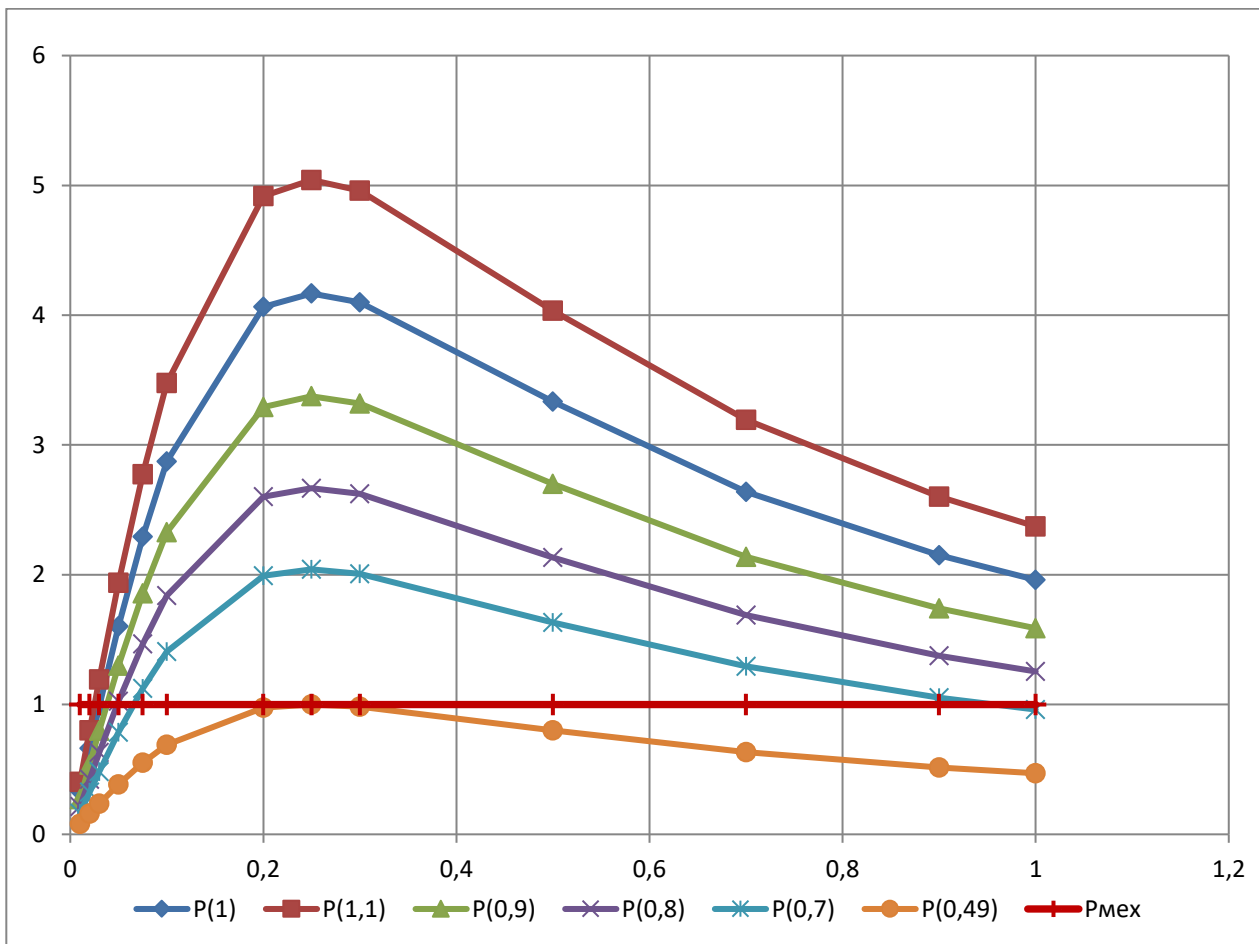


Рис. 15.10. Характеристики активной мощности при различных напряжениях

На рис. 15.10 построены зависимости активной мощности двигателя от скольжения при различных постоянных напряжениях по данным табл. 15.2.

Результаты расчетов $P(s)$

s	0,01	0,02	0,03	0,05	0,075	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,7	0,9	1
P_1	0,333	0,662	0,986	1,603	2,294	2,874	4,065	4,167	4,098	3,333	2,64	2,149	1,961
$P_{1,1}$	0,403	0,802	1,193	1,939	2,775	3,477	4,919	5,042	4,959	4,033	3,194	2,600	2,373
$P_{0,9}$	0,27	0,537	0,799	1,298	1,858	2,328	3,293	3,375	3,32	2,7	2,138	1,741	1,588
$P_{0,8}$	0,213	0,424	0,631	1,026	1,468	1,839	2,602	2,667	2,623	2,133	1,689	1,375	1,255
$P_{0,7}$	0,163	0,325	0,483	0,785	1,124	1,408	1,992	2,042	2,008	1,633	1,293	1,053	0,961
$P_{0,49}$	0,080	0,159	0,237	0,385	0,551	0,690	0,976	1,000	0,984	0,8	0,634	0,516	0,471

Контрольные вопросы

1. Дайте определение статической характеристики мощности нагрузки.
2. Какой вид имеют статические характеристики нагрузки батареи статических конденсаторов?
3. Какой вид имеет статическая характеристика нагрузки шунтирующего реактора?
4. Запишите уравнение статической характеристики по реактивной мощности синхронного компенсатора.
5. Как влияет возбуждение компенсатора на его статическую характеристику?
6. Какой вид имеют статические характеристики по активной и реактивной мощностям синхронного двигателя?
7. Какой вид имеет статическая характеристика асинхронного двигателя?
8. Дайте определение регулируемому эффекту нагрузки.
9. В чем проявляется нарушение устойчивости нагрузки?

ГЛАВА 16. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛА НАГРУЗКИ

16.1. Первичный критерий устойчивости

Асинхронные двигатели составляют подавляющую часть промышленной нагрузки, и поэтому анализ условий сохранения их устойчивой работы имеет большое практическое значение.

Нормальный установившийся режим двигателя определяется пересечением характеристики мощности механизма $P_{\text{мех}}$ и характеристики электромагнитной мощности $P_{\text{АД}}(s)$ (рис. 16.1).

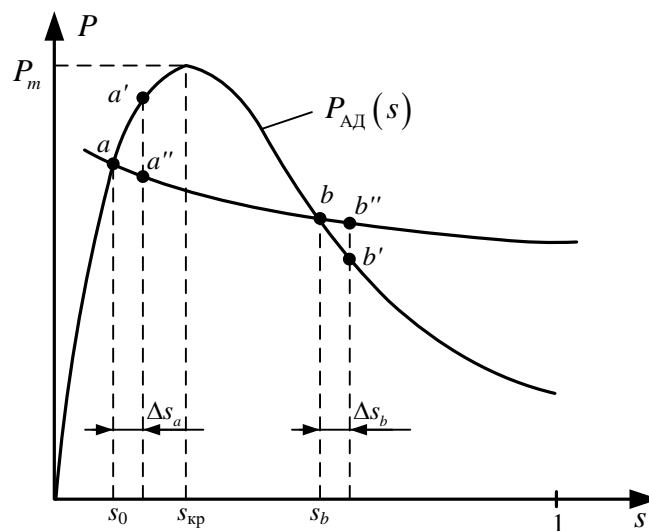


Рис. 16.1. Установившийся режим работы двигателя

Максимум мощности двигателя, или так называемый опрокидывающий момент $M_{\text{max}} = P_{\text{м}}$ (в о. е.) достигается при критическом скольжении $s_{\text{кр}} = \frac{R'_2}{2X_s}$:

$$M_{\text{max}} = P_{\text{м}} = \frac{U^2}{2X_s}.$$

Установившийся режим возможен в двух точках пересечения характеристики мощности и тормозного момента: a и b . В точке a с увеличением сколь-

жения двигателя на Δs вращающий момент возрастает на ΔP , а тормозной уменьшается, на валу двигателя возникает ускоряющий избыточный момент, под влиянием которого скорость двигателя повышается, а скольжение уменьшается, в результате чего восстанавливается первоначальный режим работы двигателя в точке a .

В точке b с увеличением скольжения возникает тормозящий избыточный момент, что обуславливает дальнейший рост скольжения вплоть до остановки двигателя.

Критерием статической устойчивости двигателя является положительный знак избыточного момента $dP_{\text{изб}} = dP - dP_{\text{мех}}$ при увеличении скольжения, т. е.

$$\frac{dP_{\text{изб}}}{ds} = \frac{d(P - P_{\text{мех}})}{ds} = \frac{dP}{ds} - \frac{dP_{\text{мех}}}{ds} > 0. \quad (16.1)$$

При $P_{\text{мех}} = \text{const}$ критерий (16.1) упрощается до вида:

$$\frac{dP}{ds} > 0,$$

который широко используется для оценки статической устойчивости групп асинхронных двигателей (эквивалентного двигателя).

При нормальном напряжении на выводах двигателя значение максимальной мощности $P_{\text{м}}$ примерно вдвое превышает $P_{\text{ном}}$ двигателя, что обеспечивает достаточный запас устойчивости.

С уменьшением напряжения на выводах двигателя значение опрокидывающего момента быстро снижается по квадратичной зависимости. Максимальная мощность $P_{\text{м}}$ может приблизиться к номинальной при снижении напряжения примерно на 30%. Это приводит к остановке двигателя и даже его вращению в обратную сторону под действием активного момента нагрузки. Такое явление называется опрокидыванием двигателя.

16.2. Вторичные критерии устойчивости нагрузки

Формальным признаком устойчивости АД при постоянстве $P_{\text{мех}}$ является положительный знак производной вращающего момента двигателя по скольжению $\frac{dP}{ds} > 0$. Однако вычисление этой производной возможно лишь при условии представления множества двигателей нагрузки одним эквивалентным двигателем. Определение параметров эквивалентного двигателя часто затруднительно. Это заставляет искать другие решения, позволяющие оценить устойчивость нагрузки по ее статическим характеристикам.

Статические характеристики комплексной нагрузки дают зависимость P и Q потребителей, входящих в состав нагрузки, включая АД, от напряжения в точках включения нагрузки.

Использование этих характеристик не исключает из рассмотрения скольжение двигателей, характер изменения которого позволяет судить об устойчивости двигателей.

Следует напомнить, что при построении статических характеристик нагрузки каждому значению напряжения на выводах двигателя соответствует свое значение скольжения, следовательно, зависимости $P = f(U)$ и $Q = f(U)$ отражают также определенные изменения скольжения двигателей.

К наиболее распространенным вторичным признакам устойчивости нагрузки, основанных на статических характеристиках, относятся $\frac{dE}{dU} \geq 0$ и $\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$.

Первым рассмотрим признак $\frac{dE}{dU} \geq 0$, где буквой E обозначена ЭДС (напряжение) источника питания.

Для определения критического напряжения по условию $\frac{dE}{dU} = 0$ строится расчетная зависимость $E(U)$ с учетом статических характеристик нагрузки.

Для этого задается серия значений напряжения, по статическим характеристикам для этих значений определяются значения активной и реактивной мощностей нагрузки и вычисляются значения ЭДС источника питания. В частности, при отсутствии в схеме замещения поперечных ветвей значения ЭДС E могут быть вычислены по формуле:

$$E = \sqrt{\left(U + \frac{P_{\text{HU}}R + Q_{\text{HU}}X}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_{\text{HU}}X - Q_{\text{HU}}R}{U} \right)^2},$$

где P_{HU} , Q_{HU} – активная и реактивная мощности нагрузки, определяемые для напряжения U по статическим характеристикам; R , X – активное и реактивное сопротивления связи источника с нагрузочным узлом.

На плоскости (E, U) вместе с зависимостью $E(U)$ также проводится прямая $E_0 = \text{const}$, соответствующая исследуемому нормальному режиму комплексной нагрузки (рис. 16.2). При устойчивой работе нагрузки эта прямая имеет две точки пересечения или хотя бы одну точку касания с кривой $E(U)$.

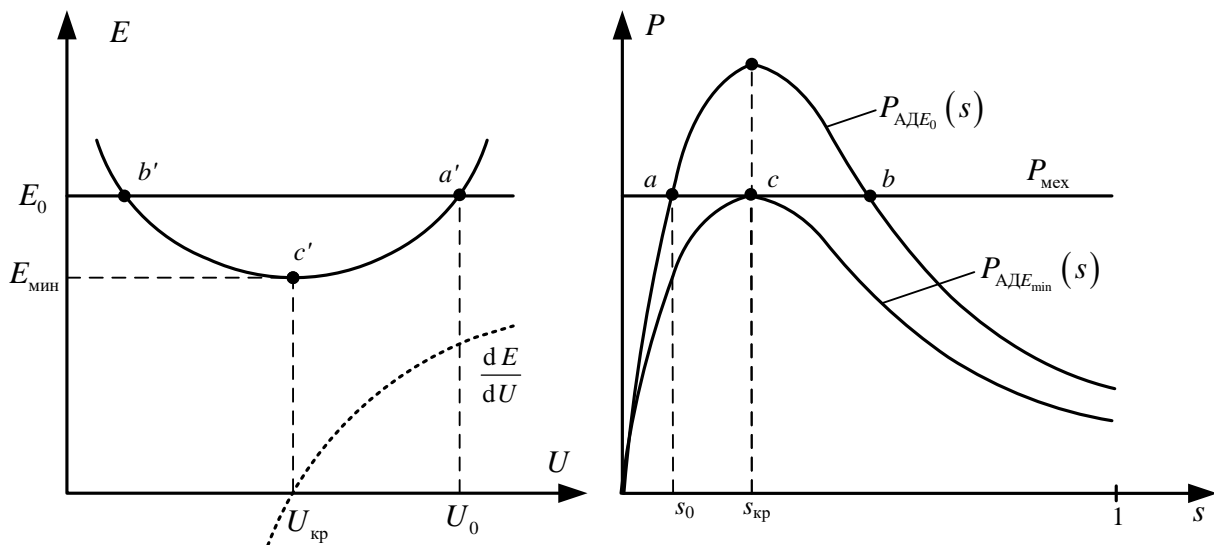


Рис. 16.2. Определение устойчивости узла нагрузки по признаку $\frac{dE}{dU} \geq 0$

В точке a производная $\frac{dE}{dU}$ положительная.

В точке b производная $\frac{dE}{dU}$ отрицательная.

Каждой точке соответствует свое скольжение двигателей нагрузки, возрастающее с уменьшением напряжения U .

Если обратиться к соответствующей характеристике мощности $P = f(s)$ (рис. 16.2), то можно сделать вывод: точка a соответствует меньшему скольжению и является точкой устойчивого режима работы нагрузки, точка b – неустойчивого. Предельный режим в точке c , когда $\frac{dE}{dU} = 0$.

Построение характеристик, связывающих U с E , достаточно просто решает задачу и при большем числе нагрузок в системе.

Одни и те же расчеты позволяют установить значения напряжения на всех нагрузках при различных ЭДС генераторов. Построив графики зависимости этих напряжений от ЭДС, можно установить момент возникновения неустойчивости той из нагрузок, для которой критическое значение ЭДС получается наивысшим.

Вторым рассмотрим признак:

$$\frac{d\Delta Q}{dU} = \frac{d(Q_{\text{ген}U} - Q_{\text{HU}})}{dU} \leq 0.$$

Построим статические характеристики реактивной мощности от напряжения для нагрузки Q_{HU} и генератора $Q_{\text{ген}U}$ (рис. 16.3).

Характеристика мощности генератора может быть вычислена при неизменной ЭДС генератора E_0 в зависимости от напряжения при условии, что активная мощность генератора изменяется в соответствии с активной мощностью нагрузки $P_{\text{ген}} = P_{\text{H}}$, а $P_{\text{наг}}$ следует за напряжением согласно статической характеристике $P_{\text{HU}} = f(U)$.

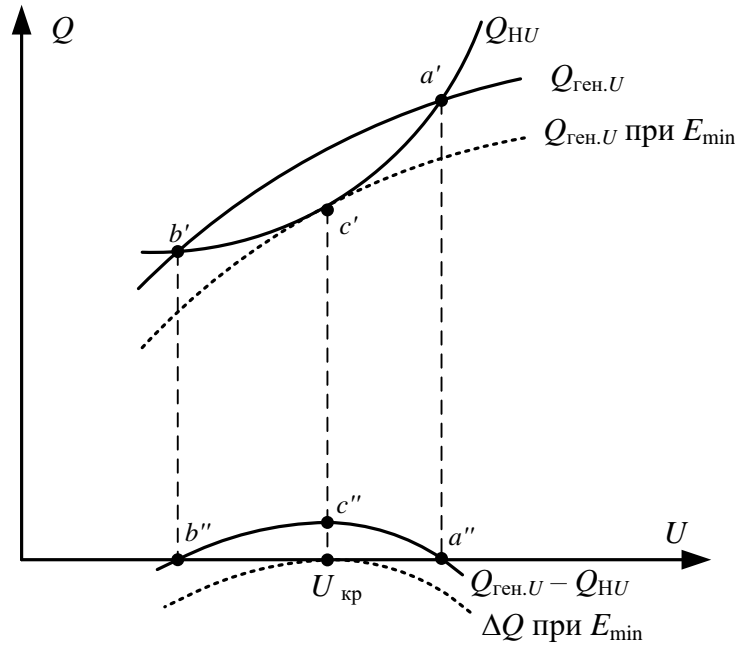


Рис. 16.3. Определение устойчивости узла нагрузки по признаку $\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$

Построенные графики имеют две точки пересечения – точку a и точку b , в которых балансируются $P_{ген}$ и P_H , $Q_{ген}$ и Q_H . Эти точки совпадают с одноименными точками a и b на характеристике вращающего момента двигателя, в которых $M_{АД}$ и $M_{мех}$ балансируются при $E = E_0$, следовательно, точка a определяет устойчивый режим работы двигателя (соответствует большому напряжению); точка b – неустойчивый.

Этот критерий $\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$ удобно использовать при расчетах устойчивости нагрузки в системе, состоящей из группы электростанций, объединенных общей узловой точкой.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называется опрокидыванием двигателя?
2. Как выглядит схема замещения асинхронного двигателя?
3. Чему равен опрокидывающий момент асинхронного двигателя?

4. Как влияет на характеристику мощности асинхронного двигателя снижение напряжения?
5. Сформулируйте первичный (основной) критерий устойчивости асинхронного двигателя.
6. Назовите вторичные критерии устойчивости нагрузки.
7. Как определяются границы устойчивости по критерию $\frac{dE}{dU} \geq 0$?
8. Как определяются границы устойчивости по критерию $\frac{d\Delta Q}{dU} \leq 0$?
9. Дайте понятие критического напряжения нагрузки.

ГЛАВА 17. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ

17.1. Вводные замечания

Двигатели нагрузки при больших возмущениях оказывают влияние не только на режим ее работы, но и на функционирование системы, питающей нагрузку. Можно выделить два типа возмущений, характерных для систем электроснабжения:

1. Снижение напряжения на зажимах двигателя, вызванное:
 - коротким замыканием в распределительной сети;
 - кратковременным прекращением питания двигателей;
 - пуском двигателей.

Предположим, что напряжение при этом изменяется скачкообразно, как это показано на [рис. 17.1, а](#). Очевидно, что при отключении двигателя от сети $U_1 = 0$.

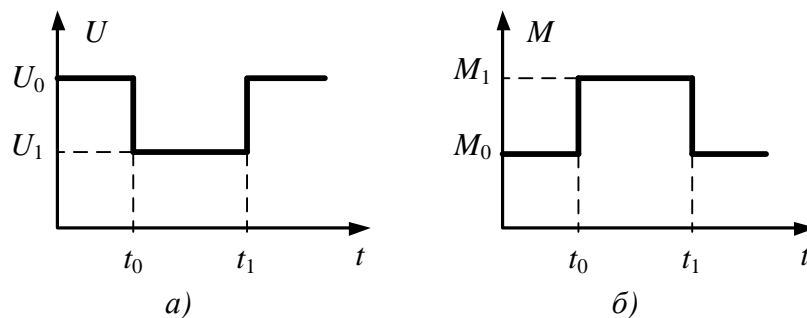


Рис. 17.1. Изменение напряжения на зажимах двигателя (а) и механического момента (б)

2. Изменение механического момента на валу двигателя, связанное с изменением режима работы приводимого механизма.

Предположим также, что это изменение происходит скачком в моменты времени t_0 и t_1 так, как это показано на [рис. 17.1, б](#). В обоих случаях в момент времени t_1 возмущение прекращается, а механический момент или напряжение восстанавливают свои прежние значения.

17.2. Динамическая устойчивость асинхронного двигателя

Снижение напряжения на зажимах двигателя или рост механического момента на его валу вызывает появление избыточного тормозящего момента ΔM (рис. 17.2). Как при снижении напряжения, так и при увеличении механического момента (последний превосходит максимальное значение электромагнитного момента $M_{\text{мех}} > M_{\text{max}}$) скольжение двигателя будет увеличиваться, и он опрокинется. Чтобы этого не произошло, надо своевременно восстановить напряжение или уменьшить механический момент. Если прежнее значение напряжения или момента будет восстановлено при скольжении s_1 , (рис. 17.2), то на вал двигателя будет действовать ускоряющий избыточный момент ΔM_1 , который вернет двигатель в устойчивый режим работы со скольжением s_0 .

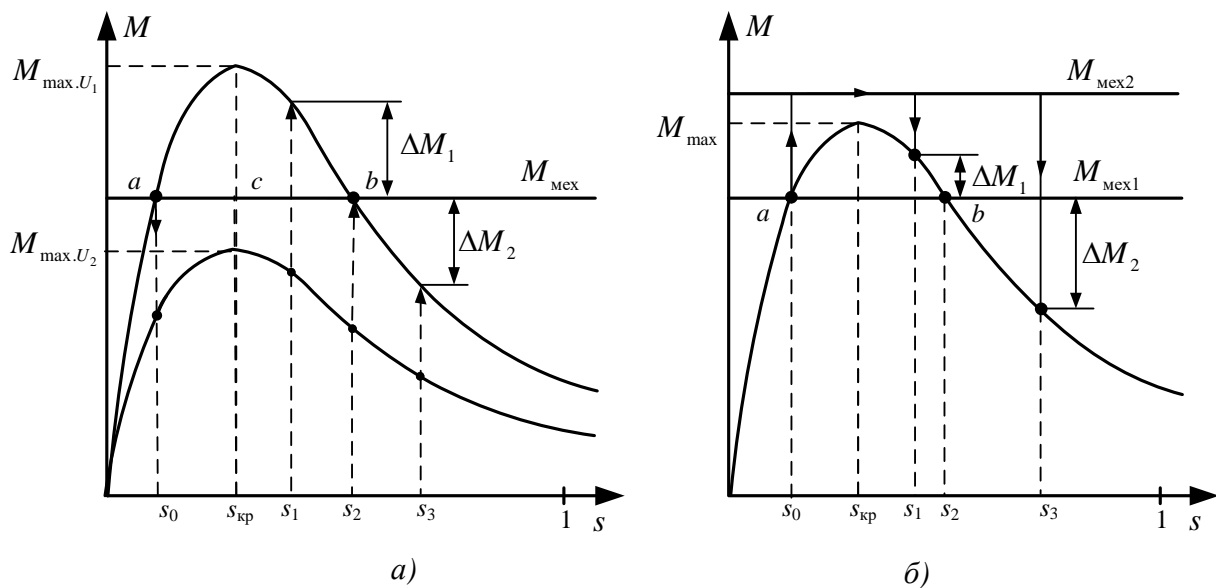


Рис. 17.2. К расчету динамической устойчивости асинхронного двигателя:

а) снижение напряжения; б) увеличение механического момента

Если восстановление напряжения или момента произойдет при скольжении s_3 , то избыточный момент ΔM_2 будет иметь тормозной характер, и двигатель опрокинется.

Чтобы определить время, в течение которого будет достигнуто то или иное значение скольжения, необходимо решить уравнение движения ротора двигателя.

При возникновении избыточного момента на валу двигателя ускорение ротора прямо пропорционально избыточному моменту, обратно пропорционально моменту инерции и может быть записано в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta M}{J}, \quad (17.1)$$

где $\Delta M = M_{\text{АД}} - M_{\text{мех}}$ – разность электромагнитного момента двигателя и момента сопротивления приводимого механизма; J – момент инерции, причем

$$J = J_{\text{АД}} + J_{\text{мех.пр}}, \quad J_{\text{АД}} \text{ – момент инерции двигателя, } J_{\text{мех.пр}} = J_{\text{мех}} \left(\frac{\omega_{\text{НОМ.Мех}}}{\omega_{\text{НОМ.АД}}} \right)^2 \text{ – при-}$$

веденный момент механизма с учетом разных номинальных скоростей вращений; ω – угловая скорость вращения двигателя, которая может быть выражена через скольжение следующим образом:

$$\omega = (1 - s) \omega_{0,\text{НОМ}}. \quad (17.2)$$

Подставляя уравнение (17.2) в (17.1) и выражая ΔM в относительных номинальных единицах двигателя, получим:

$$\Delta M_{*\text{НОМ}} = -\frac{ds}{dt} \frac{\omega_{0,\text{НОМ}}}{M_{\text{НОМ}}} J = -T_J \frac{ds}{dt}, \quad (17.3)$$

где $T_J = J \frac{\omega_{0,\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}}}$, а $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность двигателя.

Уравнение (17.3) описывает движение ротора двигателя при больших возмущениях и называется уравнением движения ротора асинхронного двигателя. Это уравнение не линейно, его решение может быть получено с помощью любого из методов численного интегрирования. Наиболее просто это решение получается, если разбить ось абсцисс функции $\Delta M = f(s)$ на ряд равных интервалов Δs (рис. 17.3). Тогда уравнение движения на любом интервале будет иметь вид:

$$\Delta M_i = T_i \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i}.$$

Время от момента нарушения режима до конца любого n -го интервала определится как

$$t = T_J \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s}{\Delta M_i}.$$

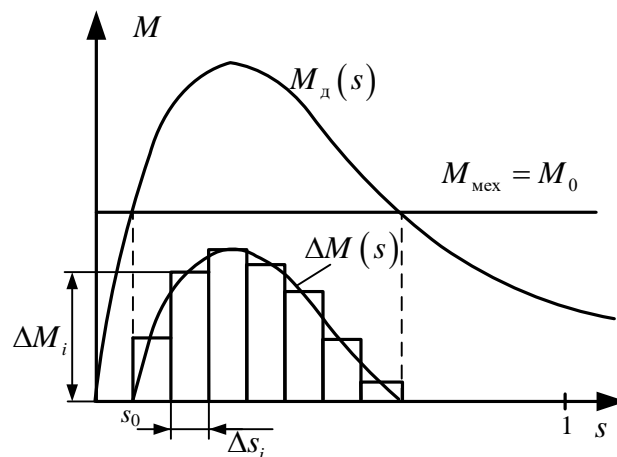


Рис. 17.3. К решению уравнения движения ротора двигателя

Точность решения зависит от величины Δs и возрастает с ее уменьшением.

Получив, таким образом, зависимость $s(t)$, можно определить скольжение, соответствующее времени t_1 (рис. 17.3). Зная это значение, можно судить о динамической устойчивости двигателя.

17.3. Динамическая устойчивость синхронного двигателя

Предположим, что двигатель снабжен АРВ пропорционального типа. Тогда он может быть представлен сопротивлением X'_d , и ЭДС E' . Характеристика мощности двигателя без учета второй гармоники имеет синусоидальный характер (характеристика $P_1(\delta)$ на [рис. 17.4](#)).

При уменьшении напряжения на зажимах двигателя рабочая точка перемещается на характеристику мощности, соответствующую новому режиму (точка b на характеристике 2, [рис. 17.4, а](#)). При этом на валу двигателя возникает тормозной избыточный момент $\Delta M_{\text{торм}}$, угол δ начинает увеличиваться, а тормозной момент уменьшается и становится равным нулю в точке c . Кинетическая энергия, запасенная ротором двигателя при его движении от точки b к точке c (величина ее пропорциональна площади abc), не позволит ротору остановиться в точке нового устойчивого равновесия c . Угол δ будет увеличиваться до тех пор, пока площадь cde не станет равной площади abc . Точка d соответствует максимальному углу отклонения оси ротора от своего первоначального положения (δ_0).

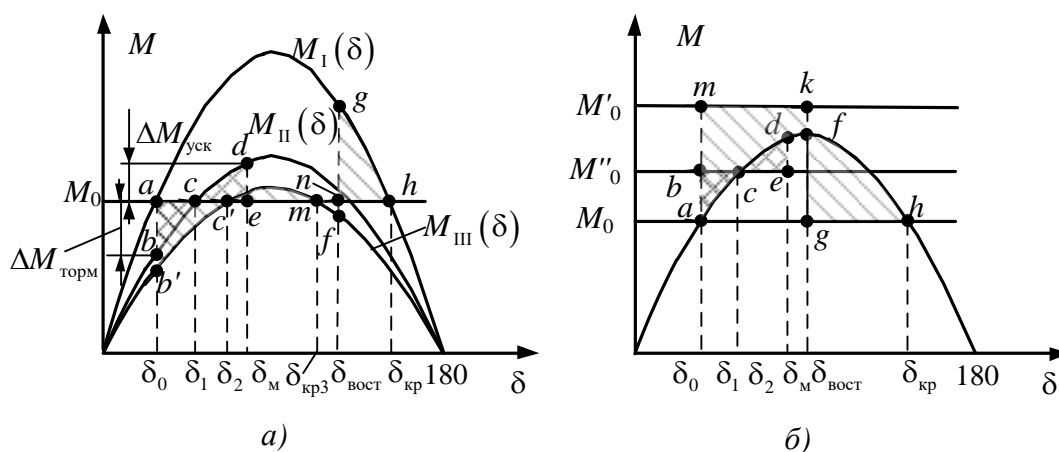


Рис. 17.4. К анализу динамической устойчивости синхронного двигателя:

a) снижение напряжения (характеристики момента при номинальном напряжении $M_I(\delta)$ и при пониженных напряжениях $M_{II}(\delta)$, $M_{III}(\delta)$); *б)* наброс механического момента

В точке d скорость вращения ротора становится равной синхронной, но, поскольку на вал двигателя действует избыточный ускоряющий момент $\Delta M_{\text{уск}}$, ротор начинает двигаться в сторону точки c . Около нее возникают затухающие колебания.

Рассмотренное снижение напряжения (ему соответствует характеристика $M_{\text{II}}(\delta)$) не нарушает устойчивости двигателя, и он может нормально работать при пониженном напряжении (с меньшим запасом статической устойчивости). Если характеристика мощности располагается так, что максимальный угол отклонения ротора превышает критическое значение $\delta_{\text{кр3}}$ (характеристика $M_{\text{III}}(\delta)$), на валу двигателя возникает избыточный тормозной момент и его устойчивость нарушается (он останавливается). В этом случае для сохранения устойчивости необходимо восстановление напряжения U_0 на зажимах двигателя в момент времени, соответствующий углу $\delta_{\text{вост}}$.

При этом происходит переход рабочей точки на характеристику $M_1(\delta)$, новая площадь торможения ngh будет достаточной для прекращения торможения двигателя и возвращения его в устойчивое рабочее состояние. По правилу площадей можно определить предельное значение угла $\delta_{\text{вост}}$, при котором восстановление прежнего значения напряжения обеспечит сохранение динамической устойчивости.

При набросе механического момента двигателя до значения M_0'' (рис. 17.4, б) на валу возникает избыточный тормозной момент $\Delta M_{\text{торм}}$, вызывающий относительное движение ротора в сторону увеличения угла δ . После того как угол ротора превысит значение δ_1 , на валу двигателя появляется избыточный ускоряющий момент. В точке d относительная скорость ротора становится равной нулю, и двигатель под действием избыточного ускоряющего момента начинает движение в сторону уменьшения угла δ . В результате затухающих колебаний около точки c двигатель переходит в новый режим работы с углом δ_1 .

При большем набросе механического момента (до величины M'_0) динамическая устойчивость, в отличие от предыдущего случая, не сохранится. При любом значении угла δ избыточный момент будет иметь тормозной характер, и двигатель выпадет из синхронизма. В этом случае сохранение устойчивости возможно, если произойдет восстановление механического момента до его прежнего значения в какой-то точке f . На валу двигателя возникает ускоряющий избыточный момент, пропорциональный отрезку fg . Устойчивость двигателя сохранится, если площадь торможения $amkf$ будет меньше или, по крайней мере, равна предельно возможной площади ускорения fgh . В случае равенства этих площадей угол восстановления механического момента является предельным. Его значение может быть найдено из равенства площадей ускорения и торможения:

$$F_{amkf} = F_{fgh}.$$

Контрольные вопросы

1. Какие резкие изменения режима работы системы электроснабжения и механизма могут нарушить устойчивость узла нагрузки?
2. Как оценивается динамическая устойчивость асинхронного двигателя при снижении напряжения?
3. Как оценивается динамическая устойчивость синхронного двигателя при снижении напряжения?
4. Каковы возможные причины снижения напряжения на зажимах двигателя?

ГЛАВА 18. ПУСК И САМОЗАПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ

18.1. Пуск двигателей

Пуск двигателя – это процесс перехода двигателя и рабочих механизмов из неподвижного состояния ($\omega = 0$) в состояние вращения с нормальной скоростью ($\omega = \omega_{\text{ном}}$).

Процессы, протекающие при пуске синхронных и асинхронных двигателей, а также их схемы пуска очень похожи и отличаются лишь тем, что у синхронного двигателя на последней стадии пуска включается возбуждение. Пуск двигателей является нормальным переходным режимом, который рассматривается с точки зрения обеспечения нормальной работы системы электроснабжения. При этом решаются такие задачи, как определение тока двигателей, напряжения на их зажимах при пуске, возможность группового пуска двигателей и т. п.

Во время пуска двигатель потребляет значительно большее количество энергии, чем в нормальном режиме, что сопровождается увеличением пускового тока. Кратность пускового тока по отношению к номинальному достигает 5–8 для двигателей с короткозамкнутым ротором.

Условия пуска двигателей определяются механическим моментом, который должен быть создан двигателем в начальный момент пуска. Выделяют легкие, нормальные и тяжелые условия пуска.

Легкие условия возникают, когда начальный момент вращения двигателя

$$M_{\text{мех.нач}} = (0,1-0,4)M_{\text{ном}}.$$

Нормальные условия возникают при

$$M_{\text{мех.нач}} = (0,5-0,75)M_{\text{ном}}.$$

Тяжелые условия пуска – это такие условия, при которых

$$M_{\text{мех.нач}} \geq M_{\text{ном}},$$

где $M_{\text{ном}}$ – номинальный момент двигателя.

Существующие способы пуска двигателей в основном сводятся к следующим трем ([рис. 18.1](#)):

- а) автотрансформаторному пуску;
- б) реакторному;
- в) прямому.

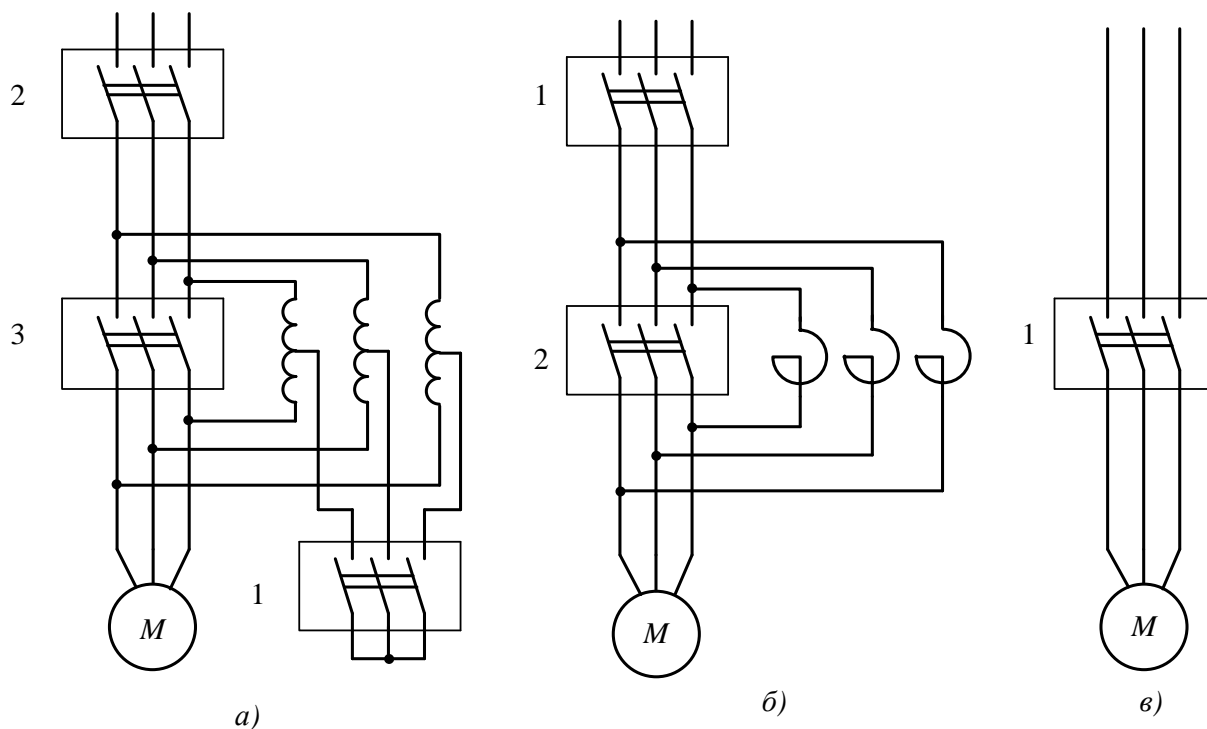


Рис. 18.1. Схемы пуска двигателей

Автотрансформаторный пуск осуществляется по схеме, показанной на [рис. 18.1](#), а. Сначала включается нулевой выключатель 1, затем выключатель 2, присоединяющий автотрансформатор к сети. Так как двигатель подключен к пониженному через автотрансформатор напряжению, то он разгоняется, потребляя сравнительно небольшой ток. После того как двигатель достигнет ско-

рости, близкой к синхронной, включается возбуждение, и двигатель входит в синхронизм; выключатель 1 отключается, и включается шунтирующий выключатель 3, который подает на двигатель нормальное напряжение.

У синхронных двигателей при легком пуске возбуждение на двигатель подается до включения выключателя 3; при тяжелом пуске возбуждение подключается после включения шунтирующего выключателя, то есть после подачи на двигатель полного напряжения сети.

Пуск через автотрансформатор имеет серьезный недостаток, поскольку наличие пускового автотрансформатора является дополнительной причиной возникновения аварий. Кроме того, такая установка довольно дорога и обладает недостатками в эксплуатации, так как создает толчки при переключениях автотрансформатора. Все это привело к тому, что автотрансформаторный пуск применяется крайне редко.

Реакторный пуск осуществляется по схеме, показанной на [рис. 18.1, б](#). Пусковой реактор ограничивает величину пускового тока и снижает напряжение на двигателе при пуске за счет падения напряжения в реакторе. В начале пуска шунтирующий выключатель 2 отключен. С помощью выключателя 1 двигатель подключается к сети через реактор. По мере разгона двигателя ток снижается. Это приводит к уменьшению падения напряжения в реакторе, и, следовательно, напряжение на двигателе повышается. При достижении подсинхронной скорости двигатель получает возбуждение и входит в синхронизм, после чего выключателем 2 шунтируется реактор.

Сопротивление реактора определяется следующим образом:

$$x_p = U_{\text{ном}} \left(\frac{1}{I_{\text{пуск.мин}}} - \frac{1}{I_{\text{пуск.мах}}} \right),$$

где $I_{\text{пуск.мин}}$ – величина, до которой ограничивается пусковой ток с помощью реактора; $I_{\text{пуск.мах}}$ – пусковой ток двигателя при номинальном напряжении на его зажимах.

Реальный пусковой ток $I_{\text{пуск}}$ может быть определен как доля максимального тока $I_{\text{пуск.маx}}$, пропорциональная напряжению $U_{\text{д}}$ на выводах двигателя:

$$I_{\text{пуск}} = U_{\text{д}} \frac{I_{\text{пуск.маx}}}{U_{\text{ном}}}.$$

Для определения $U_{\text{д}}$ воспользуемся уравнением связи между этим напряжением и напряжением сети $U_{\text{с}}$ в точке подключения реактора:

$$U_{\text{с}} = U_{\text{д}} + I_{\text{пуск}} X_{\text{р}} = U_{\text{д}} + U_{\text{д}} \frac{I_{\text{пуск.маx}}}{U_{\text{ном}}} X_{\text{р}}.$$

Откуда

$$U_{\text{д}} = \frac{U_{\text{с}}}{1 + \frac{I_{\text{пуск.маx}}}{U_{\text{ном}}} X_{\text{р}}}.$$

Пусковой ток при этом:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{с}}}{X_{\text{р}} + X_{\text{Ад}}} = \frac{U_{\text{с}}}{X_{\text{р}} + U_{\text{ном}} / I_{\text{пуск.маx}}}.$$

Момент при реакторном пуске снижается:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}U_{\text{ном}}} \left(\frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{ном}}} \right)^2.$$

Схему реакторного пуска применяют при необходимости значительного снижения тока в сети и при достаточности для пуска небольшого превышения пускового момента над статическим моментом механизма.

Прямой пуск осуществляется согласно схеме на [рис. 18.1](#), в. Двигатель включается на полное напряжение сети с помощью выключателя 1. Под действием асинхронного момента двигатель достигает подсинхронной скорости, после чего подается возбуждение, и двигатель входит в синхронизм.

Расчет режима пуска производится с целью определения времени пуска, допустимости нагрева обмоток, характера изменения напряжений в питающей сети.

Расчет времени пуска. Рассмотрим общий подход к расчету времени пуска двигателя. Процесс движения ротора двигателя описывается дифференциальным уравнением:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = \Delta M = M_d - M_{\text{мех}}. \quad (18.1)$$

При решении этого уравнения необходимо учитывать характер зависимостей $M_d = f(s)$ и $M_{\text{мех}} = f(s)$. Универсальным способом решения уравнения, обеспечивающим решение при любых зависимостях моментов, является способ последовательных интервалов.

На [рис. 18.2](#) разность $\Delta M = M_d - M_{\text{мех}} = \varphi(s)$ разбита на n равных интервалов по скольжению:

$$\Delta s_1 = \Delta s_2 = \dots = \Delta s_n.$$

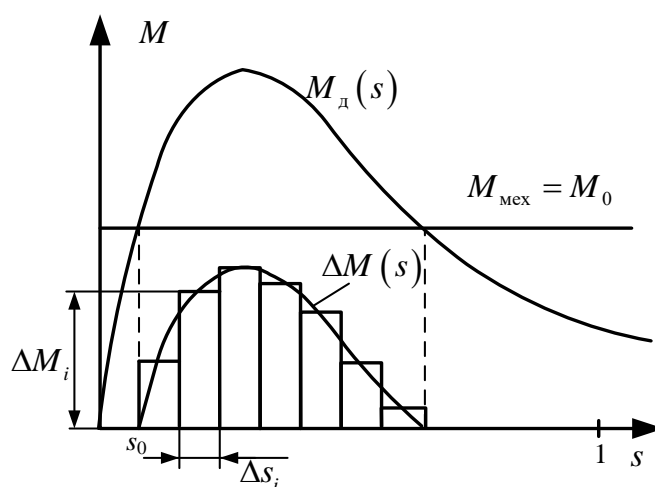


Рис. 18.2. К расчету времени пуска

Уравнение движения (18.1) на любом интервале будет иметь вид:

$$T_j \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} = \Delta M_i,$$

где ΔM_i – среднее значение избыточного момента на i -м интервале.

Время от момента пуска до конца любого i -го интервала:

$$t_{\text{пуска}} = T_j \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i}.$$

18.2. Самозапуск двигателей

Самозапуск – это процесс восстановления нормального режима работы двигателей после кратковременного отключения источника питания. Задача самозапуска заключается в том, чтобы не допустить массового отключения электродвигателей. Самозапуск отличается от пуска тем, что:

- одновременно пускается целая группа двигателей;
- в момент восстановления питания какая-то часть или все двигатели вращаются с некоторой скоростью;
- самозапуск происходит под нагрузкой.

По условиям самозапуска механизмы делятся на две группы:

1. Механизмы, имеющие постоянный момент сопротивления и при кратковременном прекращении питания быстро теряющие скорость (шаровые мельницы, транспортеры, прокатные станы, подъемные краны и т. п.).

2. Механизмы, имеющие вентиляторные характеристики момента (центробежные насосы, вентиляторы, дымососы, центрифуги и др.). Самозапуск этой группы проходит легче, чем механизмов первой группы, так как момент сопротивления механизмов снижается при уменьшении скорости.

Для обеспечения успешного самозапуска определяют суммарную мощность электродвигателей, которые могут быть запущены после перерыва питания. В соответствии с полученным значением выделяются те двигатели, отключение которых недопустимо по условиям технологического процесса или правилам техники безопасности. Суммарная неотключаемая мощность электродвигателей определяется при условии, что остаточное напряжение в режиме самозапуска обеспечивает вращающий момент, превышающий момент механизма.

Расчет самозапуска предполагает решение нескольких задач:

1. Рассчитывается момент вращения двигателей при пониженном напряжении и проверяется его превышение над моментами механизмов.
2. Устанавливается температура дополнительного нагрева двигателей из-за увеличения времени разгона.

Скольжение двигателей к моменту самозапуска может быть определено численным интегрированием уравнения движения ротора двигателя. Рассматривая самозапуск асинхронных двигателей, предположим, что питание двигателей осуществляется по схеме (рис. 18.3).

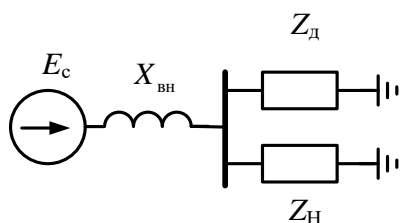


Рис. 18.3. Схема замещения питания двигателей

Напряжение на зажимах двигателей при самозапуске:

$$U_{\text{д}} = \frac{E_{\text{с}} Z_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}} + X_{\text{вн}}}, \quad (18.2)$$

где $Z_{\text{экв}} = \frac{Z_{\text{д}} Z_{\text{н}}}{Z_{\text{д}} + Z_{\text{н}}}$, причем $Z_{\text{д}}$ – сопротивление эквивалентного двигателя, замещающего все n подключенных двигателей; $X_{\text{вн}}$ – внешнее сопротивление.

Сопротивление эквивалентного двигателя в момент самозапуска:

$$Z_{\text{д}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{сз}}}, \quad (18.3)$$

где $S_{\text{сз}}$ – суммарная мощность двигателей, самозапуск которых будет успешным; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение двигателей.

Подставляя (18.3) в (18.2), найдем мощность $S_{\text{сз}}$:

$$S_{\text{сз}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_{\text{H}} X_{\text{ВН}}} \left(\frac{E_{\text{с}}}{U_{\text{д}}} Z_{\text{H}} - (Z_{\text{H}} + X_{\text{ВН}}) \right). \quad (18.4)$$

Мощность самозапуска связана с номинальной мощностью следующим образом (при КПД двигателей, равном 1):

$$S_{\text{сз}} = S_{\text{НОМ}} K_s, \quad (18.5)$$

где K_s – кратность пускового тока двигателя при скольжении $s_{\text{сз}}$:

$$K_s = \frac{K \sqrt{1 - s_{\text{кр}}^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{сз}}} \right)^2}}.$$

где K – кратность пускового тока.

Подставляя (18.5) в (18.4), получаем выражение для мощности, которую можно назвать неотключаемой мощностью двигателей при самозапуске:

$$S_{\text{неоткл}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Z_{\text{H}} X_{\text{ВН}} K_s} \left[\frac{E_{\text{с}}}{U_{\text{д}}} Z_{\text{H}} - (Z_{\text{H}} + X_{\text{ВН}}) \right].$$

Самозапуск синхронных двигателей обладает рядом особенностей по сравнению с асинхронными. Если после кратковременного перерыва питания двигатель не выпал из синхронизма или не был отключен, то происходит самозапуск. Если двигатель выпадает из синхронизма и к моменту восстановления напряжения работает как асинхронный с определенным скольжением, то процесс его самозапуска нужно рассматривать как пуск асинхронного двигателя, но осуществляемый от достигнутого скольжения. При этом возбужденный двигатель включается на шины нагрузки без дополнительных сопротивлений в цепи статора.

Задачами расчета самозапуска являются:

- 1) проверка влияния самозапуска на режим работы потребителей, находящихся в электрической близости;
- 2) расчет остаточного напряжения на зажимах двигателей;
- 3) расчет момента двигателя;
- 4) определение времени пуска и перегрева двигателя.

Контрольные вопросы

1. На какие классы разделяются условия пуска двигателей, определяемые механической нагрузкой?
2. Как осуществляется автотрансформаторный пуск двигателя?
3. Как осуществляется реакторный пуск двигателя?
4. Назовите недостатки автотрансформаторного пуска двигателя.
5. В каких случаях применяется автотрансформаторный пуск двигателя?
6. Как найти пусковой ток и пусковой момент при автотрансформаторном пуске двигателя?
7. С какой целью проводится расчет пуска двигателей?
8. Как рассчитывается время пуска двигателя?
9. В чем отличие самозапуска двигателя от его пуска?
10. Какие задачи решает расчет самозапуска двигателей?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах : учебное пособие / Ю. А. Куликов. – Новосибирск : НГТУ ; Москва : Мир, Издательство АСТ, 2003. – 283 с. – ISBN 5-7782-0324-1 (НГТУ), ISBN 5-03-003506-6 (Мир), ISBN 5-17-018761-0 (АСТ). – Текст : непосредственный.
2. Латушкина, Л. Л. Электромагнитные переходные процессы. Курс лекций : учебное пособие / сост. Л. Л. Латушкина. – Красноярск : КГТУ, 2006. – 128 с. – Текст : непосредственный.
3. Латушкина, Л. Л. Электромеханические переходные процессы : учебное пособие / Л. Л. Латушкина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т; ХТИ – филиал СФУ, 2010. – 128 с. – Текст : непосредственный.
4. Папков, Б. Г. Электроэнергетические системы и сети. Токи короткого замыкания : учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / Б. Г. Папков, В. Ю. Вуколов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во Юрайт, 2017. – 353 с. – ISBN 978-5-9916-8148-3. – Текст : непосредственный.
5. Переходные процессы в системах электроснабжения : учебник / В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк, Л. И. Несен и др. ; под ред. В. Н. Винославского. – Киев : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 422 с. – ISBN 5-11-001185-0. – Текст : непосредственный.
6. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учеб. для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов ; под ред. И. П. Крюčkова. – 2-е изд., стереот. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. – 416 с. – ISBN 978-5-383-00413-5. – Текст : непосредственный.
7. Расчет токов короткого замыкания. – Текст : электронный // onCAD : [сайт]. – URL: <https://oncad.ru/kz> (дата обращения 27.10.2020).
8. Хрущев, Ю. В. Электроэнергетические системы и сети. Электромеханические переходные процессы : учебное пособие для прикладного бакалавриата / Ю. В. Хрущев, К. И. Заповедников, А. Ю. Юшков. – Москва : Юрайт, 2017. – 153 с. – ISBN 978-5-534-02713-6. – Текст : непосредственный.