

Федеральное агентство по образованию
ГОУ высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники и электрооборудования

РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания к курсовому и дипломному
проектированию для студентов специальности
«Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений» (181300)

Новокузнецк
2004

УДК 621/34(075)
В60

Рецензент:
кандидат технических наук,
профессор кафедры «Автоматизированный
электропривод и промышленная электроника»
ГОУ ВПО «СибГИУ»
П.Н. Кунинин

В60 Расчёт токов короткого замыкания в системах электроснабжения. Метод. указ. / Сост.: В.С. Князев, Г.С. Свирская: ГОУ ВПО «СибГИУ». – Новокузнецк, 2004. – 38 с.

Изложены рекомендации и указания по выполнению раздела курсового и дипломного проектов: «Расчёт токов короткого замыкания».

Приведены примеры расчёта различных видов короткого замыкания в системах электроснабжения низкого (до 1000В) и высокого (выше 1кВ) напряжений.

Предназначены для студентов специальности «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (181300)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Токи короткого замыкания	5
1. Расчёт токов КЗ в энергосистемах выше 1 кВ	9
1.1. Расчёт токов трёхфазного короткого замыкания в системах бесконечно большой мощности	9
1.2. Расчёт токов трёхфазного КЗ в системах ограниченной мощности.....	12
1.3. Ударный ток при коротком замыкании.	13
1.4. Наибольшее действующее значение тока КЗ за первый период от начала процесса КЗ.....	14
1.5. Учёт подпитки мест КЗ от электродвигателей.....	14
1.6. Расчёт токов двухфазного КЗ	15
Пример 1	17
Пример 2	19
2. Расчёт токов КЗ в энергосистемах до 1000В	22
2.1. Расчёт токов трёхфазного КЗ	22
2.2. Расчёт токов однофазного КЗ	23
Пример 3	25
Список литературы	29
Приложение 1	30
Приложение 2	37

ВВЕДЕНИЕ

Для электроустановок характерны четыре режима: нормальный, аварийный, послеаварийный и ремонтный, причём аварийный режим является кратковременным режимом, а остальные – продолжительными режимами.

Электрооборудование выбирается по параметрам продолжительных режимов и проверяется по параметрам кратковременных режимов, определяющим из которых является режим короткого замыкания (КЗ).

По режиму КЗ электрооборудование проверяется на электродинамическую и термическую стойкости, а коммутационные аппараты – также на коммутационную способность.

Методические указания имеют своей целью пояснить сущность физических процессов, происходящих при различных видах коротких замыканий в системах электроснабжения. Предназначены для студентов – энергетиков при выполнении ими расчётов токов короткого замыкания (ТКЗ) с целью выбора и проверки по режиму КЗ электрооборудования системы электроснабжения (проводников и электрических аппаратов). Включают в себя методы расчёта токов симметричных и несимметричных КЗ в электроустановках напряжением свыше 1кВ и до 1000В. Приведены практические примеры расчётов ТКЗ в энергосистемах.

ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Коротким замыканием называют всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или с землёй, при этом токи в аппаратах и проводниках, примыкающих к месту электрического соединения (иначе – точке КЗ), резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного (нормального) режима.

К основным причинам возникновения коротких замыканий следует отнести:

- нарушение изоляции электрического оборудования, которые вызываются старением изоляционных материалов;
- недостаточно тщательный уход за оборудованием;
- механические повреждения изоляции (например, повреждение кабеля при выполнении земляных работ);
- ошибочные действия обслуживающего персонала с высоковольтными выключателями и разъединителями;
- перекрытие голых токоведущих частей животными и птицами.

Наряду с КЗ случайного характера в системе имеют место также преднамеренные КЗ, вызываемые действием установленных короткозамыкателей понижающих подстанций; последние создают преднамеренные КЗ с целью быстрых отключений ранее возникших повреждений.

Расчёт токов короткого замыкания необходим для выбора аппаратов и проводников, их проверки по условиям термической и электродинамической стойкости при КЗ, для определения параметров срабатывания, проверки чувствительности и согласования действия устройств релейной защиты электроустановок 0,4 – 220 кВ. В результате расчета токов короткого замыкания определяются токи, протекающих по участкам сети и остаточные напряжения в момент короткого замыкания в расчетных точках.

Выбор расчётных точек производится на основе анализа схемы электроснабжения с целью нахождения наиболее неблагоприятных условий повреждений, определяющих выбор аппаратов и проводников. Как правило, расчетными точками являются выводы высшего напряжения понижающих трансформаторов, участки между выводами низшего напряжения трансформаторов и реакторами, сборные шины распределительных устройств, выводы электроприёмников, выводы выключателей отходящих линий. На стороне до 1000В расчётными точками являются шины 0,4 кВ за трансформатором, шины распределительных шкафов, выводы электроприёмников.

Учитывая дискретный характер изменения параметров электрооборудования, расчёт токов КЗ для его проверки производится приближённым практическим методом, с принятием ряда допущений, при этом погрешность расчётов токов КЗ не должна превышать 5 %.

При выполнении расчётов токов КЗ практическим методом, как правило, не учитывают [Л.7]:

- 1) сдвиг по фазе ЭДС генераторов и изменение частоты вращения роторов синхронных машин (СМ);
- 2) ток намагничивания трансформаторов;
- 3) насыщение магнитных систем генераторов, трансформаторов, электродвигателей;
- 4) ёмкостную проводимость воздушных и кабельных линий;
- 5) различие значений сверхпереходных сопротивлений по продольной и поперечной осям СМ;
- 6) возможную несимметрию трёхфазной системы;
- 7) влияние неподвижной нагрузки на токи КЗ;
- 8) подпитку места КЗ со стороны электродвигателей напряжением до 1кВ при расчёте токов КЗ в сети напряжением выше 1кВ.

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

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

Кроме теплового действия, токи короткого замыкания вызывают между проводниками большие механические усилия, которые особенно велики в начальной стадии процесса КЗ, когда ток достигает максимума. При недостаточной прочности проводников и их креплений они могут быть разрушены при КЗ.

Глубокое снижение напряжения и резкое искажение его симметрии, которые возникают при КЗ, вредно отражаются на работе потребителей. Так уже при понижении напряжения на 30-40% в течение 1сек и более достаточно загруженные двигатели промышленного предприятия могут остановиться. Оставаясь включенными в сеть, остановившиеся двигатели могут вызвать дальнейшее снижение напряжения в сети, т.е. полное нарушение нормального электроснабжения не только данного предприятия, но и за его пределами (ряд же производств вообще не допускает никаких, даже кратковременных, перерывов в подаче энергии).

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

В трёхфазных системах с заземлённой нейтралью различают следующие основные виды КЗ в одной точке (в скобках условное обозначение

КЗ и многолетняя аварийная статистика по союзным и зарубежным системам при глухозаземлённой нейтрали) [Л.2]:

- 1) трёхфазное (обозначение: $K^{(3)}$, относительная вероятность: 5%);
- 2) двухфазное (обозначение: $K^{(2)}$, вероятность: 10%);
- 3) однофазное на землю (обозначение: $K^{(1)}$, вероятность: 65%),
(в системах с глухозаземлённой нейтралью);
- 4) двухфазное на землю, т.е. замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием той же точки на землю ($K^{(1,1)}$, вероятность: 20%).

Трёхфазное КЗ является симметричным, т.к. при нём все фазы остаются в одинаковых условиях. Напротив, все другие КЗ являются несимметричными.

Ток КЗ представляется суммой периодической и аperiodической слагающих. В большинстве случаев принимается, что периодическая составляющая тока КЗ от источника $i_{пт}$ не изменяется во времени, а аperiodическая составляющая $i_{ат}$ всегда постоянно затухает по экспоненте с постоянной времени T_a . При КЗ вблизи линейных выводов электрогенератора (электродвигателя) обе составляющие тока в цепи статора затухают: периодическая составляющая $i_{пт}$ – с постоянной времени $T_{пн}$, а аperiodическая $i_{ат}$ – с постоянной времени T_a .

Для выбора аппаратов и проводников и проверки их по условиям КЗ рассчитывают:

- 1) $I_{nm0} = \sqrt{2} \cdot I'' = \sqrt{2} \cdot I_{п0}$ – наибольшее начальное значение периодической составляющей тока КЗ ($I_{п0} = I''$ – сверхпереходный ток, начальное действующее значение периодической составляющей тока);
- 2) $I_{пт}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени t вплоть до момента размыкания повреждённой цепи;
- 3) i_{a0} – начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ;
- 4) $i_{ат}$ – значение аperiodической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени t вплоть до момента размыкания повреждённой цепи;
- 5) i_y – ударный ток КЗ;
- 6) I_y – действующее значение полного тока за первый период переходного процесса.

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

Обычно в месте замыкания образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю. Электрическая дуга возникает или с самого начала произошедшего повреждения (перекрытие или пробой изоляции), или через некоторое время, когда перегорит элемент, вызвавший замыкание. При замыкании между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги. Когда токи достаточно велики (сотни ампер и более), сопротивление дуги приблизительно постоянно и по своему характеру почти чисто активное.

В ряде случаев переходные сопротивления могут быть столь малы, что практически ими можно пренебречь. Такие замыкания называют **металлическими**. Естественно при прочих равных условиях ток при металлическом замыкании больше, чем при наличии переходного сопротивления. Поэтому, когда требуется найти возможные наибольшие величины токов, исходят из наиболее тяжёлых условий, считая, что в месте замыкания отсутствуют какие-либо переходные сопротивления.

Для выбора аппаратов по отключающей способности, по электродинамической и электротермической стойкости к токам КЗ рассчитываются токи трехфазных КЗ в месте установки аппаратов. На генераторном напряжении электрических станций – трёхфазное или двухфазное в зависимости от того, какое из них приводит к большему нагреву. Для проверки коэффициентов чувствительности релейной защиты в сетях 10 (6) кВ – токи двухфазных КЗ в конце защищаемого участка сети. Для выбора аппаратов по коммутационной способности – по большему из значений, полученных для случаев трёхфазного и однофазного КЗ на землю (в сетях с большими токами КЗ на землю). Для проверки эффективности отключения однофазных КЗ в четырёхпроводных сетях до 1 кВ – токи однофазных КЗ в конце защищаемого участка. Для одиночных кабелей – токи трёхфазных КЗ в начале кабеля, для пучка из двух и более кабелей, включённых в параллель, – токи трёхфазных КЗ за пучком.

1. РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ВЫШЕ 1 КВ

В электроустановках напряжением выше 1000В при расчёте токов КЗ учитывают индуктивные сопротивления генераторов, синхронных компенсаторов, синхронных и асинхронных двигателей, силовых трансформаторов и автотрансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий. Активные сопротивления следует учитывать только для воздушных линий с проводами малых площадей сечений и стальными проводами, а также для протяжённых кабельных сетей малых сечений с большим активным сопротивлением.

1.1. Расчёт токов трёхфазного короткого замыкания в системах бесконечно большой (неограниченной) мощности.

Под электрической системой неограниченной мощности следует понимать такую относительно мощную систему, напряжение на шинах которой при КЗ практически не изменяется.

В практических расчётах за систему с неограниченной мощностью принимают такую, для которой выполняются условия:

$$\Sigma X_{\text{расч. (ист. пит.)}} \leq 0,1 \cdot Z_{\text{рез. (цепи КЗ)}} .$$

Также за систему неограниченной мощности принимают участок системы электроснабжения электрически значительно удалённый от генерирующих источников [Л.6]:

$$Z_{* \text{ рез(цепи КЗ)}} \geq 3 .$$

Удалённая от расчётной точки КЗ часть электроэнергетической системы (большая удалённость от генерирующих источников энергии – наличие трансформаций и соединительных элементов с большими сопротивлениями) представляется в виде источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением. ЭДС этого источника следует принимать равным среднему номинальному напряжению сети, связывающей удалённую и остальную часть электроэнергетической системы, а его результирующее эквивалентное сопротивление X_c определяется, исходя из известного тока от системы при КЗ ($I_{\text{КЗ}} = I_c$) в какой-либо узловой точке сети:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_c} .$$

Если для этой сети в качестве базисного напряжения принято соответствующее среднее номинальное напряжение, то в относительных единицах имеем:

$$X_{*c} = \frac{I_{\phi}}{I_c}.$$

Расчёт токов трёхфазного КЗ при питании от системы неограниченной мощности производится в следующей последовательности:

1. По расчётной схеме составляется схема замещения.

Расчётная схема для определения токов КЗ представляет собой схему в однолинейном исполнении, в которую введены генераторы, компенсаторы, синхронные и асинхронные двигатели, оказывающие влияние на ток КЗ, а также элементы систем электроснабжения (линии, трансформаторы, реакторы и т. д.), связывающие источники электроэнергии с местом КЗ. На расчётной схеме показываются расчётные точки КЗ, выбор которых зависит от цели расчётов токов КЗ.

На схеме замещения все элементы цепи КЗ заменены индуктивными сопротивлениями (в сетях до 1000В – индуктивными и активными) и соединены в той последовательности, которая имеется на расчётной схеме, при этом трансформаторные связи заменяются электрическими. Элементы систем электроснабжения, связывающие источники электроэнергии с местом КЗ, вводят в схему замещения сопротивлениями, а источники электроэнергии – сопротивлениями и ЭДС. Сопротивления и ЭДС схемы замещения должны быть приведены к одной ступени напряжения (основная ступень). В практических расчётах за основную ступень удобно принимать ступень, где определяются токи КЗ. На схеме замещения каждое сопротивление имеет цифровое обозначение в виде дроби: в числителе – порядковый номер сопротивления, а в знаменателе – расчётное значение его. Параметры элементов схемы замещения можно выражать в именованных или относительных единицах.

Обычно в сетях напряжением выше 1кВ применяют для расчёта токов КЗ относительные единицы, а в сетях до 1000В – именованные единицы.

При составлении схемы замещения в относительных единицах значения ЭДС и сопротивлений элементов схемы выражают в долях выбранных значений базовых величин (E_* , X_*).

2. Принимаются базисные условия.

В качестве базовых величин принимаются базовая (базисная) мощность S_6 и базовое (базисное) напряжение U_6 .

За базисную мощность принимается суммарная мощность генераторов (если мощности генераторов известны), мощность короткого замыкания на входе СЭС или принимается $S_6 = 100$ МВА ($S_6 = 1000$ МВА) при неизвестной мощности генераторов.

Для основной ступени, для которой производится расчёт токов короткого замыкания принимается $U_{\delta} = U_{cp}$. Среднее значение напряжения ступени электрической цепи U_{cp} берётся на 5% выше номинального напряжения сети [Л.9]:

$$U_{cp} = 0,23\text{кВ}; 0,4; 0,525; 0,69; 3.15\text{кВ}; 6,3\text{кВ}; 10,5\text{кВ}; 15,75\text{кВ}; 21\text{кВ}; 37\text{кВ}.$$

Тогда базисные (базовые) токи и сопротивления на основной ступени определяются по выражениям (МВ·А, кВ, кА, Ом):

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}}; \quad X_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\delta}} = \frac{U_{cp} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot S_{\delta}} = \frac{U_{cp}^2}{S_{\delta}}.$$

3. Определяются значения сопротивлений отдельных элементов цепи КЗ (по формулам и паспортным данным или по справочным данным) в именованных единицах или относительных единицах, приведённых к базисным условиям.

4. Определяются результирующие сопротивления цепи КЗ путём преобразования схемы замещения и приведения её к одному результирующему сопротивлению ($X *_{рез(цепи КЗ)}$ или $Z *_{рез(цепи КЗ)}$).

5. Находится отношение сопротивлений источников питания $\Sigma X_{расч.ИП}$ к полному результирующему сопротивлению цепи КЗ $Z_{рез.(цепи КЗ)}$; по значению отношения определяется вид системы (неограниченная или ограниченная) и алгоритм дальнейшего расчёта.

6. Определяются результирующие сопротивления цепи КЗ с учётом мощности системы (если базисная мощность не равна суммарной мощности генераторов системы электроснабжения).

7. Определяются необходимые значения токов КЗ.

Для проверки аппаратуры системы электроснабжения необходимо, как правило, определить следующие значения токов для режима КЗ:

- ток I'' – действующее значение сверхпереходного периодического тока в начальный момент КЗ;
- токи $I_{0,1}$, $I_{0,2}$ – действующее значение периодических токов соответственно через 0,1сек и через 0,2сек после начала процесса КЗ;
- ток I_{∞} – действующее значение установившегося периодического тока при КЗ;
- ток i_y – ударный ток;
- ток I_y – наибольшее действующее значение тока КЗ за первый период от начала процесса КЗ.

В процессе КЗ при питании от системы неограниченной мощности напряжение на шинах электростанции считается неизменным в любой момент времени КЗ. Тогда и значения периодических токов КЗ в любой момент времени КЗ остаются постоянными.

Токи КЗ в этом случае определяются по формуле:

$$I_{КЗ} = I'' = I_{0,1} = I_{0,2} = I_{\infty} = \frac{I_{\delta}}{X_{*рез}} = \frac{I_{\delta}}{Z_{*рез}} .$$

Мощность КЗ определится:

$$S_{КЗ} = \frac{S_{\delta}}{X_{*рез}} = \frac{S_{\delta}}{Z_{*рез}}, \quad S_{КЗ} = \sqrt{3} \cdot U_{\delta} \cdot I_{КЗ} .$$

1.2. Расчёт токов трёхфазного короткого замыкания в системах ограниченной мощности.

В случае, когда отношение результирующего сопротивления источников питания $\Sigma X_{расч.ИП}$ к полному результирующему сопротивлению $Z_{рез.(цепи КЗ)}$ цепи КЗ составляет более 10% , такие системы относятся к системам ограниченной мощности. Система ограниченной мощности характеризуется непостоянством напряжения на шинах электростанции при КЗ (формулой $I'' = I_{0,1} = I_{0,2} = I_{\infty}$ пользоваться нельзя).

В таких системах для определения периодических значений токов КЗ в различные моменты времени процесса КЗ пользуются кривыми затухания (метод расчётных кривых) [Л.1, Л.6, Л.8].

Для практических расчётов пользуются, как правило, кривыми:

для времени $t = 0$ – определение сверхпереходного тока I'' ;

для времени $t = 0,1$ – определение значения тока $I_{0,1}$;

для времени $t = 0,2$ – определение значения тока $I_{0,2}$;

для времени $t = \infty$ – определение установившегося тока КЗ I_{∞} .

Указания к расчёту:

1. На кривых соответственно нанесены обозначения 0; 0,1; 0,2 и ∞ .

2. С помощью кривых (по значениям $Z_{*рез}$ или $X_{*рез}$) определяются периодические значения токов КЗ в различные моменты времени в относительных единицах – I_{*t} .

3. Значения токов КЗ в именованных единицах определяются:

$$I_{КЗ,t} = I_{*t} \cdot I_{\delta} ,$$

где I_{*t} – относительное значение тока КЗ для любого момента времени, определяемое по кривым.

1.3. Расчёт ударного тока при коротком замыкании.

Ударным током называют наибольшее возможное мгновенное значение тока короткого замыкания. Ударный ток определяется по формуле:

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I''.$$

Коэффициент k_y называется ударным коэффициентом. Значение ударного коэффициента зависит от постоянной времени цепи КЗ T_a , которая в свою очередь определяется отношением индуктивного и активного сопротивлений цепи КЗ. Значение ударного коэффициента в общем случае следует определять по формуле [Л.4]:

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0,5 \cdot \pi + \varphi_k}{X_{рез.КЗ} / R_{рез.КЗ}}} = 1 + e^{-\frac{0,5 \cdot \pi + \varphi_k}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_a}} = 1 + e^{-0,01 \cdot \frac{0,5 \cdot \pi + \varphi_k}{\pi \cdot T_a}},$$

где $T_a = \frac{L_k}{R_k} = \frac{X_k}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_k} = \frac{X_{рез.КЗ}}{314 \cdot R_{рез.КЗ}}$, с.; $\varphi_k = \arctg\left(\frac{X_{рез.КЗ}}{R_{рез.КЗ}}\right)$, рад.

В тех случаях, когда $\frac{X_{рез.КЗ}}{R_{рез.КЗ}} \geq 5$, ударный коэффициент допустимо определять по формуле:

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

Значение ударного коэффициента зависит от характера сопротивления цепи КЗ (изменяется в пределах: $1 \leq k_y < 2$). При КЗ на зажимах генераторов ударный коэффициент $k_y \approx 2$ (на выводах турбогенератора $k_y = 1,91$). В цепях электроустановок напряжением выше 1кВ с преобладанием индуктивного сопротивления (в тех случаях, когда не учитывается активное сопротивление) ударный коэффициент принимается равным 1,8. В сетях до 1000В из-за значительного активного сопротивления элементов происходит быстрое затухание апериодической составляющей тока КЗ и значение k_y много меньше (на шинах цеховых ТП ударный коэффициент $k_y \approx 1,3 \div 1,4$, а для более удалённых точек $k_y \approx 1$).

1.4. Определение наибольшего действующего значения тока КЗ за первый период от начала процесса КЗ.

Под действующим значением тока КЗ в произвольный момент времени понимают среднеквадратическое значение тока КЗ за период рабочей частоты ($f = 50$ Гц), середина которого есть рассматриваемый момент времени.

Наибольшее действующее значение тока КЗ имеет место за первый период переходного процесса (от начала процесса КЗ) и определяется по формуле:

$$I_y = I'' \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = k_\infty \cdot I''; \quad k_\infty = \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2}.$$

При ударном коэффициенте $K_y = 1,8$ коэффициент $K_\infty = 1,52$.

1.5. Учёт подпитки мест КЗ от электродвигателей.

Учёт подпитки мест КЗ от синхронных или асинхронных электродвигателей производится в тех случаях, когда электродвигатели непосредственно связаны с точкой КЗ и находятся в зоне малой удалённости.

Влияние электродвигателей напряжением больше 1кВ на токи КЗ не учитывают при единичной мощности до 100 кВт, если электродвигатели удалены от точки КЗ одной ступенью трансформации или через обмотки сдвоенного реактора. Не учитывают влияние электродвигателей на токи КЗ при любой мощности, если они удалены от места КЗ двумя или более ступенями трансформации или если ток КЗ от них может поступать к месту КЗ через элементы сети, имеющие существенное сопротивление (длинные линии, кабели, трансформаторы, реакторы и т. д.).

Периодическая составляющая тока КЗ от электродвигателя, удалённого от точки КЗ на внешнее сопротивление $X_{*внешн}$ определится:

$$I_{n0\text{двиг}} = I''_{\text{двиг}} = \frac{E''}{X_{*двиг} + X_{*внешн}} \cdot I_\delta.$$

Если двигатели подключены к точке КЗ кабельными линиями не более 300м и отсутствуют другие элементы, начальное значение периодической составляющей тока КЗ от двигателя определяется без учёта внешнего сопротивления [Л.1, с.209]:

$$I_{n0\text{двиг}} = I''_{\text{двиг}} = \frac{E''}{X_{*двиг}} \cdot I_\delta = \frac{E''}{X''_d} \cdot I_{ном}.$$

Здесь: E'' , X''_d - сверхпереходная ЭДС и сопротивление двигателя по каталожным данным (в о.е.); $X_{*внешн}$ и $X_{*двиг}$ - внешнее сопротивление и сопротивление двигателя в относительных единицах, приведённых к базисным условиям; $I_{ном}$ - номинальный ток двигателя, I_δ - базисный ток.

Апериодическая составляющая и ударный ток от двигателей:

$$i_{a\text{двиг}} = \sqrt{2} \cdot I_{n0\text{двиг}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a\text{двиг}}}}; \quad i_{y\text{двиг}} = k_{y,d} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0\text{двиг}}; \quad k_{y,d} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{a\text{двиг}}}}.$$

При отсутствии данных для двигателей можно принять [Л.1, Л.7]:
 для АД: $T_{a \text{ двиг}} = 0,04\text{с}$ ($k_{y.d} \approx 1,6$); для СД: $T_{a \text{ двиг}} = 0,06\text{с}$ ($k_{y.d} \approx 1,8$).

Результирующие значения сверхпереходного и ударного токов в случае подпитки точки КЗ от электродвигателей определяются:

$$I_{\Sigma}'' = I_{\text{суст}}'' + I_{\text{двиг}}'' ; \quad i_{y\Sigma} = i_{y \text{ суст.}} + i_{y \text{ двиг}} .$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока при сложной разветвлённой схеме замещения определяется методом наложения составляющих от каждой радиальной ветви схемы замещения или путем преобразования схемы замещения относительно точки КЗ к простейшему виду и определения результирующей эквивалентной ЭДС ($E_{*эК}''$) и результирующего эквивалентного сопротивления ($X_{*эК}$):

$$I_{n0} = \frac{E_{*эК}''}{X_{*эК}} \cdot I_{\sigma} ,$$

I_{σ} – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчётная точка КЗ.

1.6. Расчёт токов двухфазного короткого замыкания.

Двухфазное короткое замыкание является несимметричным КЗ. Для расчёта токов при двухфазном КЗ применяется метод симметричных составляющих. На основании метода симметричных составляющих несимметричное двухфазное КЗ заменяется условно симметричным, т.е. приводится к трёхфазным КЗ для всех последовательностей. Особенностью двухфазного КЗ является отсутствие составляющих нулевой последовательности.

Для динамических потребителей (электрогенераторов и электродвигателей) сопротивления прямой и обратной последовательностей имеют разные значения, для остальных элементов системы электроснабжения они равны. Тогда на основании метода симметричных составляющих для двухфазного КЗ без учёта динамических потребителей имеем равенство результирующих сопротивлений цепи КЗ для прямой (при трёхфазном КЗ) и обратной последовательностей:

$$X_{*1 \text{ рез.}}^{(3)} = X_{*2 \text{ рез.}}^{(2)} = X_{* \text{ рез.}(цепиКЗ)} .$$

Значение сверхпереходного тока при двухфазном КЗ определится:

$$I''^{(2)} = I_{\kappa}^{(2)} = \frac{E''^{(2)}}{2 \cdot X_{* \text{ рез.}(цепиКЗ)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot E''^{(3)}}{2 \cdot X_{* \text{ рез.}(цепиКЗ)}} ,$$

где $X_{*рез.(цепиКЗ)}$ – результирующее сопротивление цепи КЗ, найденное для трёхфазного КЗ, $E''^{(2)}$ – сверхпереходная междуфазная ЭДС (линейная ЭДС), $E''^{(3)}$ – сверхпереходная фазная ЭДС.

Значение сверхпереходного тока при трёхфазном КЗ в этой же точке системы электроснабжения определится:

$$I''^{(3)} = I_{\kappa}^{(3)} = \frac{E''^{(2)}}{\sqrt{3} \cdot X_{*рез.(цепиКЗ)}} = \frac{E''^{(3)}}{X_{*рез.(цепиКЗ)}}.$$

Отношение значений сверхпереходного и ударного токов при двухфазном КЗ к значениям токов при трёхфазном КЗ равно:

$$\frac{I^{(2)''}}{I^{(3)''}} = \frac{i_y^{(2)}}{i_y^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866.$$

Таким образом, сверхпереходный ток и ударный ток при трёхфазном КЗ в $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155$ раза больше значений токов при двухфазном КЗ.

При КЗ в удалённой точке ($X_{*расч}^{(3)} \geq 3$) имеем: $I_{\infty} = I''$. Тогда величина установившегося тока КЗ при двухфазном КЗ в удалённой точке определится: $I_{\infty}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\infty}^{(3)} = 0,866 \cdot I_{\infty}^{(3)}$.

Экспериментально установлено, что установившийся ток при двухфазном КЗ на генераторном напряжении электростанции всегда больше, чем при трёхфазном КЗ ($I_{\infty}^{(2)} > I_{\infty}^{(3)}$) в силу влияния реакции статора генератора, а при сопротивлении $X_{*расч}^{(3)} = 0,6$ имеет место равенство: ($I_{\infty}^{(2)} = I_{\infty}^{(3)}$).

Таким образом, при расчётах токов КЗ со значением расчётного сопротивления цепи КЗ $X_{*расч}^{(3)} > 0,6$ находят установившийся ток при трёхфазном КЗ ($I_{\infty}^{(2)} < I_{\infty}^{(3)}$), а при $X_{*расч}^{(3)} < 0,6$ определяют установившийся ток двухфазного КЗ ($I_{\infty}^{(2)} > I_{\infty}^{(3)}$).

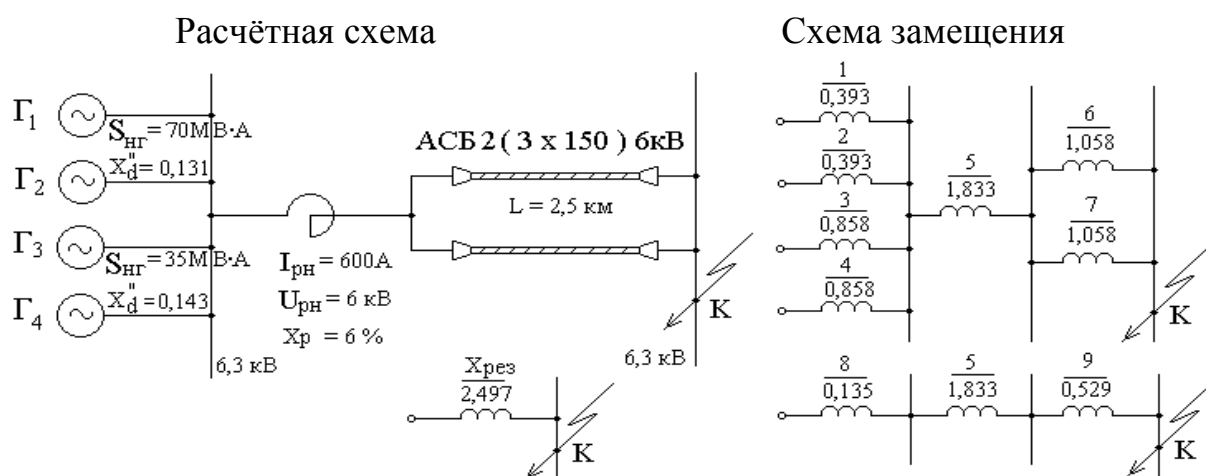
Для определения установившегося тока двухфазного КЗ при питании от системы с ограниченной мощностью пользуются теми же расчётными кривыми затухания, что и для определения токов при трёхфазном КЗ. По оси сопротивлений откладывают значение $2 \cdot X_{*расч}^{(3)}$ и для этого значения по кривой при $t = \infty$ определяют относительное значение установившегося периодического тока трёхфазного КЗ $I_{*\infty}^{(3)}$.

Относительное значение установившегося периодического тока двухфазного КЗ в именованных единицах определится:

$$I_{\infty}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_{\delta}.$$

Пример 1.

Рассчитать токи КЗ для схемы электроснабжения:



1. По расчётной схеме составляем схему замещения.
2. Принимаем базисные условия и определяем базисный ток:

$$S_{\sigma} = \sum S_{н.г.} = 2 \cdot 70 + 2 \cdot 35 = 210 \text{ МВ}\cdot\text{А}; \quad U_{\sigma} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}} = \frac{210}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 19,25 \text{ кА}.$$

3. Определяем сопротивления элементов цепи КЗ в относительных единицах, приведённых к базисным.

- 1) для генераторов:

$$X_{*1} = X_{*2} = X_d'' \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{н.г.}} = 0,131 \cdot \frac{210}{70} = 0,393;$$

$$X_{*3} = X_{*4} = X_d'' \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{н.г.}} = 0,143 \cdot \frac{210}{35} = 0,858.$$

- 2) для реактора:

$$X_{*5} = \frac{X_p\% \cdot I_{\sigma.p.} \cdot U_{нр}}{100 \cdot I_{нр} \cdot U_{\sigma.p.}} = \frac{6 \cdot 19,25 \cdot 6,0}{100 \cdot 0,6 \cdot 6,3} = 1,833;$$

- 3) для кабеля:

$$X_{*6} = X_{*7} = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{cp.лэп}^2} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{210}{6,3^2} = 1,058.$$

Активное сопротивление кабеля в именованных единицах (Ом) определится (удельная проводимость для алюминия $\gamma = 32 \text{ м} / \text{Ом}\cdot\text{мм}^2$):

$$R = \frac{\ell}{\gamma \cdot S} = \frac{2500}{32 \cdot 150} = 0,521 \text{ Ом}.$$

В относительных единицах активное сопротивление кабеля равно:

$$R_{*6} = R \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{cp.\text{ЛЭП}}^2} = 0,521 \cdot \frac{210}{6,3^2} = 2,757.$$

4. Преобразуя схему замещения, получим новую схему и определим сопротивления:

$$\frac{1}{X_{*8}} = \frac{1}{X_{*1}} + \frac{1}{X_{*2}} + \frac{1}{X_{*3}} + \frac{1}{X_{*4}} = \frac{2}{0,393} + \frac{2}{0,858} = 5,089 + 2,331 = 7,42;$$

$$X_{*8} = \frac{1}{7,42} = 0,135; \quad X_{*9} = \frac{X_{*6}}{2} = \frac{1,058}{2} = 0,529.$$

5. После сложения всех сопротивлений окончательно имеем схему замещения с результирующими (суммарными) сопротивлениями:

результирующее индуктивное сопротивление цепи КЗ:

$$X_{*рез} = X_{*8} + X_{*5} + X_{*9} = 0,135 + 1,833 + 0,529 = 2,497 \approx 2,50;$$

результирующее активное сопротивление цепи КЗ:

$$R_{*рез} = \frac{R_{*6}}{2} = \frac{2,757}{2} = 1,379.$$

6. Определим отношение результирующих активного сопротивления к индуктивному сопротивлению:

$$\frac{R_{*рез}}{X_{*рез}} = \frac{1,397}{2,497} = 0,552 > \frac{1}{3}.$$

Так как это отношение $> 1/3$, то при расчёте токов КЗ активное сопротивление следует учитывать. Тогда полное сопротивление определится:

$$Z_{*рез} = \sqrt{X_{*рез}^2 + R_{*рез}^2} = \sqrt{2,497^2 + 1,379^2} = 2,852.$$

7. Определим мощность системы (ограниченная или неограниченная) путём деления суммарного сопротивления генераторов на сопротивление цепи КЗ, т.е. находим соотношение:

$$\frac{X_{*рез(сум.мт.)}}{Z_{*рез}} = \frac{X_{*8}}{Z_{*рез}} = \frac{0,135 \cdot 100\%}{2,852} = 4,734\%.$$

Полученное отношение $< 10\%$, следовательно, мощность источника неограниченная. Тогда значения токов КЗ определяются:

$$I_{к.з.} = \frac{I_{\bar{o}}}{Z_{*рез}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}} \cdot Z_{*рез}};$$

$$I'' = I_{0,1} = I_{0,2} = I_{\infty} = \frac{19,25}{2,852} = 6,75 \text{ кА}.$$

Мощность короткого замыкания определится:

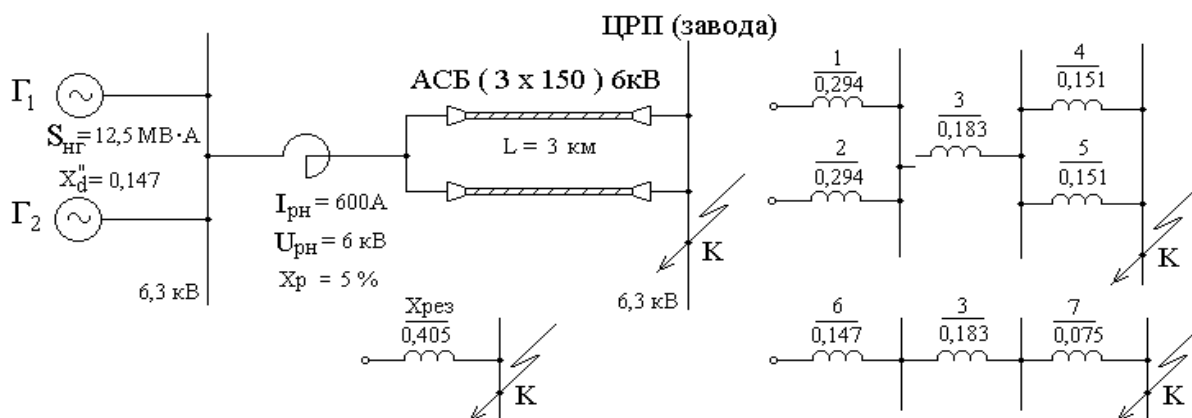
$$S_{КЗ} = \frac{S_{\bar{o}}}{Z_{*рез}} = \frac{210}{2,852} = 73,63 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Пример 2.

Рассчитать токи КЗ на шинах ЦРП завода, питающегося от электростанции по кабельной линии. На электростанции установлены турбогенераторы с АРВ.

Расчётная схема

Схема замещения



1. По расчётной схеме составляем схему замещения.
2. Принимаем базисные условия и определяем базисный ток:

$$S_{\sigma} = 2 \cdot S_{НГ} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad U_{\sigma} = 6,3 \text{ кВ};$$

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 2,3 \text{ кА}.$$

3. Определяем сопротивления элементов схемы в относительных единицах, приведённых к базисным условиям:

1) генераторов

$$X_{*1} = X_{*2} = X_d'' \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{Н.Г.}} = 0,147 \cdot \frac{25}{12,5} = 0,294;$$

2) реактора ($I_{\sigma.p.} = I_{\sigma} = 2,3 \text{ кА}$; $U_{\sigma.p.} = U_{\sigma} = 6,3 \text{ кВ}$)

$$X_{*3} = \frac{X_p\% \cdot I_{\sigma.p.} \cdot U_{НП}}{100 \cdot I_{НП} \cdot U_{\sigma.p.}} = \frac{5 \cdot 2,3 \cdot 6,0}{100 \cdot 0,6 \cdot 6,3} = 0,183;$$

3) кабелей

$$X_{*4} = X_{*5} = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{ср.ЛЭП}^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{25}{6,3^2} = 0,151.$$

4. Преобразуя схему замещения, получим новую схему и определим сопротивления элементов:

$$X_{*6} = \frac{X_{*1}}{2} = \frac{0,294}{2} = 0,147; \quad X_{*7} = \frac{X_{*4}}{2} = \frac{0,151}{2} = 0,075.$$

5. После сложения всех сопротивлений окончательно имеем схему замещения с результирующим сопротивлением цепи КЗ:

$$X_{*рез} = X_{*6} + X_{*3} + X_{*7} = 0,147 + 0,183 + 0,075 = 0,405.$$

6. Рассчитываем активное сопротивление кабеля:

Активное сопротивление кабеля в именованных единицах (Ом) определится (удельная проводимость для алюминия $\gamma = 32 \text{ м / Ом}\cdot\text{мм}^2$):

$$R = \frac{\ell}{\gamma \cdot S} = \frac{3000}{32 \cdot 150} = 0,620 \text{ Ом}.$$

В относительных единицах активное сопротивление кабеля равно:

$$R_* = R \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{cp.ЛЭП}^2} = 0,620 \cdot \frac{25}{6,3^2} = 0,391.$$

Результирующее активное сопротивление цепи КЗ определится:

$$R_{*рез} = \frac{R_*}{2} = \frac{0,391}{2} = 0,195.$$

7. Определим отношение результирующих активного сопротивления к индуктивному:

$$\frac{R_{*рез}}{X_{*рез}} = \frac{0,195}{0,405} = 0,48.$$

Так как это отношение $> 1/3$, то при расчёте токов КЗ активное сопротивление следует учитывать. Тогда полное сопротивление определится:

$$Z_{*рез} = \sqrt{X_{*рез}^2 + R_{*рез}^2} = \sqrt{0,405^2 + 0,195^2} = 0,449 \approx 0,45.$$

8. Определим мощность системы (ограниченная или неограниченная) путём деления суммарного сопротивления генераторов на результирующее сопротивление цепи КЗ. Имеем:

$$\frac{X_{*рез(уст.мощ.)}}{Z_{*рез}} = \frac{X_{*6}}{Z_{*рез}} = \frac{0,147 \cdot 100\%}{0,45} = 33\%.$$

Полученное отношение $> 10 \%$, следовательно, мощность системы ограниченная. Тогда значения токов КЗ следует определять по кривым затухания.

Так как $Z_{*рез} = 0,405 < 0,6$, то установившееся значение тока КЗ следует определять при двухфазном КЗ (как имеющее большее значение, чем при трёхфазном КЗ).

8. Значения токов КЗ для различных моментов времени, определённые по кривым затухания в относительных единицах:

$$\left. \begin{array}{l} I_*'' = 2,20 \\ I_{*0,1} = 1,90 \\ I_{*0,2} = 1,79 \\ I_{*\infty} = 1,95 \end{array} \right\} \text{ для трёхфазного КЗ } (Z_{*рез} = 0,45);$$

$$I_{*\infty}^{(3)} = 1,24 \quad \text{для двухфазного КЗ } (2 \cdot Z_{*рез} = 0,90).$$

В именованных единицах значения токов при трёхфазном КЗ определяются:

$$I'' = I_*'' \cdot I_{\sigma} = 2,20 \cdot 2,3 = 5,06 \text{ кА};$$

$$I_{0,1} = I_{*0,1} \cdot I_{\sigma} = 1,90 \cdot 2,3 = 4,37 \text{ кА};$$

$$I_{0,2} = I_{*0,2} \cdot I_{\sigma} = 1,79 \cdot 2,3 = 4,12 \text{ кА};$$

$$I_{\infty}^{(3)} = I_{*\infty} \cdot I_{\sigma} = 1,95 \cdot 2,3 = 4,49 \text{ кА}.$$

Установившийся ток при двухфазном КЗ:

$$I_{\infty}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot 1,24 \cdot 2,3 = 4,94 \text{ кА}$$

9. Значение ударного тока КЗ определится по формуле:

$$i_y = \kappa_y \cdot \sqrt{2} \cdot I''.$$

Постоянная времени цепи КЗ:

$$T_a = \frac{L}{R} = \frac{X_{рез}}{\omega \cdot R_{рез}} = \frac{0,405}{314 \cdot 0,195} = 0,0066.$$

Так как $\frac{X_{рез}}{R_{рез}} = \frac{0,405}{0,195} = 2,1 < 5$, тогда $\varphi_k = \arctg \frac{X_{рез}}{R_{рез}} = \arctg \frac{0,405}{0,195} = 1,122$ рад

и ударный коэффициент для цепи КЗ определится:

$$\kappa_y = 1 + e^{-0,01 \cdot \frac{0,5 \cdot \pi + \varphi_k}{\pi \cdot T_a}} = 1 + e^{-0,01 \cdot \frac{0,5 \cdot \pi + 1,122}{\pi \cdot 0,0066}} = 1 + 0,273 = 1,273;$$

(по упрощённой формуле имеем: $\kappa_y = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}} = 1 + e^{\frac{0,01}{0,0066}} = 1 + 0,22 = 1,22$).

Значение ударного тока:

$$i_y = \kappa_y \cdot \sqrt{2} \cdot I'' = 1,273 \cdot \sqrt{2} \cdot 5,06 = 9,11 \text{ кА}.$$

2. Расчёт токов короткого замыкания в энергосистемах до 1000В

В случае питания электрических сетей напряжением до 1кВ от понижающих трансформаторов при расчёте токов КЗ следует исходить из условия, что подведённое к трансформатору напряжение неизменно и равно номинальному напряжению [Л.9].

При расчёте токов КЗ в установках до 1000 В необходимо учитывать:

- индуктивные и активные сопротивления элементов цепи КЗ: силовых трансформаторов с вторичным напряжением до 1кВ, сборных шин и шин присоединённых к ним, шинопроводов, кабелей, сопротивлений расцепителей, автоматических выключателей НН, первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока НН, активные сопротивления различных контактных соединений – болтовых соединений шин, зажимов и разъёмных контактов аппаратов и др. (в некоторых случаях следует также учитывать переходные сопротивления в точке КЗ, сопротивление дуги в точке КЗ и изменение сопротивлений в результате нагрева токами КЗ);
- индуктивные сопротивления питающей системы напряжением выше 1кВ.

Расчёт ведётся в именованных единицах.

2.1. Расчёт токов трёхфазного короткого замыкания.

При трёхфазном КЗ в установках до 1000 В значение периодической слагающей тока КЗ определяется по формуле:

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{cp} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} \text{ , А} \quad \text{или} \quad I_K^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} \text{ , кА} \text{ ,}$$

где U_{cp} – линейное напряжение сети, равное 400В;

$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}$ – полное сопротивление цепи КЗ, мОм;

$R_{\Sigma} = R_T + R_{ш} + R_{1к} + R_{2к} + R_{ав} + R_{пк}$ – активные сопротивления цепи КЗ, мОм;

$X_{\Sigma} = X_c + X_T + X_{ш} + X_{1к} + X_{2к} + X_{ав}$ – индуктивные сопротивления цепи КЗ, мОм;

X_c – индуктивное сопротивление внешней системы до питающего трансформатора 6-10 / 0,4 кВ, мОм;

R_T , X_T – активное и индуктивное сопротивления питающего трансформатора, мОм;

$R_{ш}$, $X_{ш}$ – активное и индуктивное сопротивления шинопровода 0,4кВ, включая шины основных секций, мОм;

$R_{1к}$, $X_{1к}$ – активное и индуктивное сопротивления индивидуального кабеля, мОм;

$R_{2к}, X_{2к}$ – активное и индуктивное сопр-я группового кабеля, мОм;
 $R_{ав}, X_{ав}$ – активное и индуктивное сопротивления токовых катушек
 расцепителей автоматических выключателей (трансформаторов тока), мОм;
 $R_{пк}$ – переходные сопротивление неподвижных контактных соеди-
 нений и подвижных контактов, мОм;

Сопротивления всех элементов цепи КЗ (мОм) должны быть при-
 ведены к одной ступени напряжения $U_{ст.КЗ}$, обычно к напряжению той
 ступени, где рассматривается КЗ:

$$X_{расч} = X \cdot \frac{U_{ст.КЗ}^2}{U_H^2} = X \cdot \left(\frac{U_б}{U_H} \right)^2.$$

Здесь: $U_б$ – базисное напряжение, равное $U_{ср.Н}$ той ступени напря-
 жения, где рассматривается КЗ; $X_{расч}$ – расчётное сопротивление, приве-
 дённое к базисному напряжению (мОм); X – то же, но при номинальном
 напряжении U_H .

При расчёте тока КЗ в установках до 1000 В подпитка места КЗ от
 электродвигателей не учитывается, если их мощность составляет менее
 20% номинальной мощности питающего трансформатора или если сопро-
 тивление, связывающее их и точку КЗ $Z_к > 1,5 \cdot Z_T$, где Z_T – сопро-
 тивление трансформатора. Во всех других случаях влияние асинхронных
 электродвигателей, подключенных к месту КЗ на величины I'' , i_y и I_y
 рекомендуется учитывать [Л.8, с.111].

Влияния АД, присоединённых непосредственно к месту КЗ, при-
 ближённо можно учесть согласно выражениям:

$$\begin{aligned} I'' &= I_K^{(3)} + 4 \cdot I_{дв}; \\ i_y &= i_{y.c} + i_{дв.} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_K^{(3)} + (6 \div 7) \cdot I_{дв}; \\ I_y &= I_{y.c} + I_{y.дв.} = k_{\infty} \cdot I_K^{(3)} + (5 \div 6) \cdot I_{дв}, \end{aligned}$$

где $I_{дв}$ – значение суммарного номинального тока двигателей:

$$I_{ном.дв.} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \eta_{ном} \cdot \cos \varphi_{ном}}.$$

2.2. Расчёт токов однофазного короткого замыкания:

При однофазных КЗ симметрия токов и напряжений трёхфазной
 системы нарушается. На основании метода симметричных составляющих
 несимметричное однофазное короткое замыкание заменяется условно
 симметричным, т. е. приводится к симметричному трёхфазному для сим-
 метричных составляющих. При однофазных КЗ ток состоит из трёх со-
 ставляющих – прямой (I_1), обратной (I_2) и нулевой последовательности (I_0).
 Тогда сопротивления элементов СЭС состоят из сопротивлений прямой
 (R_1, X_1, Z_1), обратной (R_2, X_2, Z_2) и нулевой последовательности
 (R_0, X_0, Z_0). При отсутствии электрических машин сопротивления прямой и обрат-

ной последовательности равны между собой ($R_1 = R_2$, $X_1 = X_2$) и равны значениям для элементов СЭС при трёхфазном КЗ. Сопротивления нулевой последовательности обычно значительно больше сопротивлений прямой и обратной последовательности, так как ею создаётся пульсирующее магнитное поле и появляются бóльшие падения напряжения, чем при нормальных токах нагрузки той же величины. В практических расчётах принимается для трёхжильных кабелей: $R_{0к} = 10 \cdot R_{1к}$, $X_{0к} = 4 \cdot X_{1к}$; для шинопроводов: $R_{0ш} = 10 \cdot R_{1ш}$, $X_{0ш} = 8,5 \cdot X_{1ш}$ [Л.7, с.141]. Значения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей для силовых трансформаторов (для трёхстержневых трансформаторов, имеющих схему соединения обмоток Δ/Y_n , применяемых в настоящее время, сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению прямой последовательности; для трансформаторов, имеющих схему соединения обмоток Y/Y_n , применение которых сокращается, сопротивления нулевой последовательности значительно превосходят сопротивления прямой последовательности) для кабелей марок и типов, встречающихся наиболее часто в системах электроснабжения, приводятся в справочной литературе [Л.6 - Л.8, Приложение 2 (указания “СибГИПРОМЕЗа”)].

Ток однофазного КЗ определится по формуле:

$$I_K^{(1)} = \frac{3 \cdot U_\phi \cdot 10^3}{Z_\Sigma} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot 10^3}{Z_\Sigma}, \text{ А}; \quad I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{Z_\Sigma}, \text{ кА},$$

где U_n – линейное напряжение сети, В; Z_Σ – полное результирующее сопротивление цепи КЗ $Z_\Sigma = \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}$, мОм.

Результирующее сопротивление цепи КЗ определится:

$$Z_\Sigma = \sqrt{\left[2 \cdot (R_T + R_{ш} + R_{1к} + R_{2к}) + 3 \cdot (R_{ав} + R_{нк}) + R_{T0} + R_{ш0} + R_{1к0} + R_{2к0}\right]^2 + \dots} \\ \dots + \left[2 \cdot (X_c + X_T + X_{ш} + X_{1к} + X_{2к}) + 3 \cdot X_{ав} + X_{T0} + X_{ш0} + X_{1к0} + X_{2к0}\right]^2, \text{ мОм.}$$

Здесь:

X_c – индуктивное сопротивление внешней системы до питающего трансформатора 6-10 / 0,4кВ, мОм;

R_T, X_T – активное и индуктивное сопротивления питающего трансформатора, мОм;

$R_{ш}, X_{ш}$ – активное и индуктивное сопротивления шинопровода 0,4кВ, включая шины основных секций, мОм;

$R_{1к}, X_{1к}$ – активное и индуктивное сопротивления кабеля распределительной сети, мОм;

$R_{2к}, X_{2к}$ – активное и индуктивное сопротивления кабеля питающей сети, мОм;

$R_{ав}, X_{ав}$ – активное и индуктивное сопротивления токовых катушек расцепителей автоматических выключателей (трансформаторов тока), мОм;

$R_{пк}$ – переходные сопротивление неподвижных контактных соединений и подвижных контактов, мОм;

$R_{т0}, X_{т0}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности питающего трансформатора, мОм;

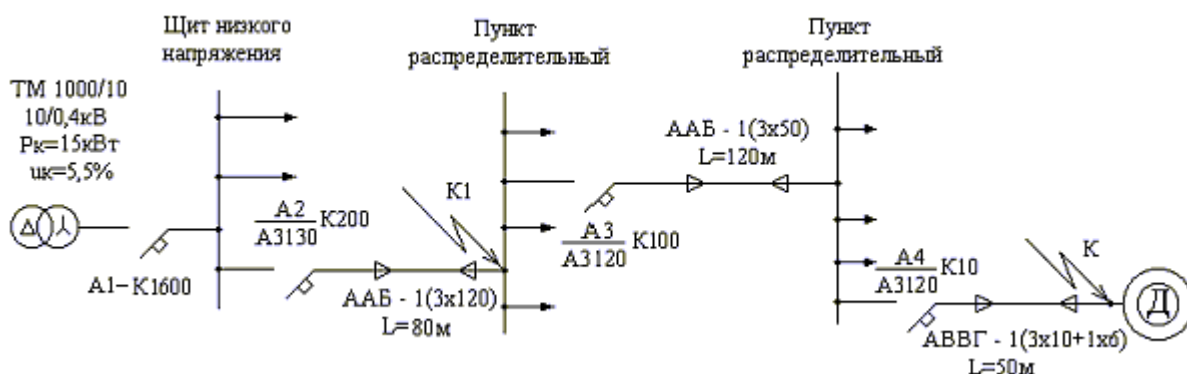
$R_{ш0}, X_{ш0}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинопроводов 0,4кВ, включая шины основных секций, мОм;

$R_{1к0}, X_{1к0}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабеля распределительной сети, мОм;

$R_{2к0}, X_{2к0}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабеля питающей сети, мОм.

Пример 3.

Определить методом симметричных составляющих величину периодической составляющей тока однофазного КЗ и сравнить её с током трёхфазного КЗ.



1. Определяем сопротивления элементов цепи для прямой (обратной) и нулевой последовательностей.

1) Индуктивное сопротивление внешней системы до питающего трансформатора 10 / 0,4кВ ($S_{к.з} = 100\text{МВ}\cdot\text{А}$) [$S_{к.з} \approx 100 \cdot S_{ном\text{ тр.}}$]:

$$X_c = \frac{U_6^2}{S_{к.з}} = \frac{400^2}{100 \cdot 10^6} = 1,60 \cdot 10^{-3} = 1,60 \text{ мОм.}$$

2) Активное и индуктивное сопротивления питающего трансформатора ($R_{т1} = R_{т2} = R_t$; $X_{т1} = X_{т2} = X_t$) [Л. 7, табл.2.50]:

$$\begin{aligned} R_t &= 1,9 \text{ мОм} & ; & & R_{т0} &= 1,9 \text{ мОм} & ; \\ X_t &= 8,6 \text{ мОм} & ; & & X_{т0} &= 8,6 \text{ мОм} & . \end{aligned}$$

3) Сопротивления шинпровода 0,4кВ.

По справочникам находим удельные активное и индуктивное сопротивления шинпровода 0,4кВ. При среднегеометрическом расстоянии между фазами 15см для плоских медных шин размерами 80x10 (мм) удельные активное и индуктивное сопротивления при переменном токе для токов прямой и обратной последовательности равны [Л. 6, с.675]:

$$r_{ш} = r_{ш1} = r_{ш2} = 0,0323 \text{ Ом/км}, \quad x_{ш} = x_{ш1} = x_{ш2} = 0,126 \text{ Ом/км}.$$

Для нулевой последовательности [Л. 7, с.141]:

$$r_{ш0} = 10 \cdot r_{ш1} = 0,323 \text{ Ом/км} = 0,323 \text{ мОм/м};$$

$$x_{ш0} = 8,5 \cdot x_{ш1} = 1,071 \text{ Ом/км} = 1,071 \text{ мОм/м}.$$

При известной суммарной длине шинпроводов активное и индуктивное сопротивления шинпровода токам прямой (обратной) и нулевой последовательностей определяются ($\ell = 3\text{м}$):

$$R_{ш} = r_{ш} \cdot \ell = 0,0323 \cdot 3 = 0,0969 \text{ мОм};$$

$$R_{ш0} = r_{ш0} \cdot \ell = 0,323 \cdot 3 = 0,969 \text{ мОм};$$

$$X_{ш} = x_{ш} \cdot \ell = 0,126 \cdot 3 = 0,378 \text{ мОм};$$

$$X_{ш0} = x_{ш0} \cdot \ell = 1,071 \cdot 3 = 3,213 \text{ мОм}.$$

4) Активные и индуктивные сопротивления всех кабелей.

По справочникам находим удельные активное и индуктивное сопротивления индивидуальных кабелей токам прямой (обратной) и нулевой последовательностей (Приложение 2):

$$r_{1к1} = 0,32 \text{ мОм/м}; \quad r_{2к1} = 0,769 \text{ мОм/м}; \quad r_{3к1} = 3,84 \text{ мОм/м};$$

$$r_{1к0} = 0,92 \text{ мОм/м}; \quad r_{2к0} = 1,64 \text{ мОм/м}; \quad r_{3к0} = 5,90 \text{ мОм/м};$$

$$x_{1к1} = 0,057 \text{ мОм/м}; \quad x_{2к1} = 0,06 \text{ мОм/м}; \quad x_{3к1} = 0,088 \text{ мОм/м};$$

$$x_{1к0} = 0,157 \text{ мОм/м}; \quad x_{2к0} = 0,257 \text{ мОм/м}; \quad x_{3к0} = 1,811 \text{ мОм/м}.$$

Активные и индуктивные сопротивления кабелей прямой (обратной) и нулевой последовательности:

$$R_{1к} = r_{1к1} \cdot \ell_1 = 0,32 \cdot 80 = 25,60 \text{ мОм};$$

$$R_{1к0} = r_{1к0} \cdot \ell_1 = 0,92 \cdot 80 = 73,60 \text{ мОм};$$

$$X_{1к} = x_{1к1} \cdot \ell_1 = 0,057 \cdot 80 = 4,56 \text{ мОм};$$

$$X_{1к0} = x_{1к0} \cdot \ell_1 = 0,157 \cdot 80 = 12,56 \text{ мОм};$$

$$R_{2к} = r_{2к1} \cdot \ell_2 = 0,769 \cdot 120 = 92,28 \text{ мОм};$$

$$R_{2к0} = r_{2к0} \cdot \ell_2 = 1,64 \cdot 120 = 196,80 \text{ мОм};$$

$$X_{2к} = x_{2к1} \cdot \ell_2 = 0,06 \cdot 120 = 7,20 \text{ мОм};$$

$$X_{2к0} = x_{2к0} \cdot \ell_2 = 0,257 \cdot 120 = 30,84 \text{ мОм};$$

$$R_{3к} = r_{3к1} \cdot \ell_3 = 3,84 \cdot 50 = 192,00 \text{ мОм};$$

$$R_{3к0} = r_{3к0} \cdot \ell_3 = 5,90 \cdot 50 = 295,00 \text{ мОм};$$

$$X_{3к} = x_{3к1} \cdot \ell_3 = 0,088 \cdot 50 = 4,40 \text{ мОм};$$

$$X_{3к0} = x_{3к0} \cdot \ell_3 = 1,811 \cdot 50 = 90,55 \text{ мОм}.$$

5) Активные и индуктивные сопротивления автоматических выключателей (включая сопротивления токовых катушек расцепителей и переходные сопротивления подвижных контактов) [Л.7, табл.2.54]:

$$\begin{aligned} R_{ав1} &= 0,14 \text{ мОм}, & X_{ав1} &= 0,08 \text{ мОм} & (I_{НОМ} &= 1600\text{А}); \\ R_{ав2} &= 1,10 \text{ мОм}, & X_{ав2} &= 0,50 \text{ мОм} & (I_{НОМ} &= 200\text{А}); \\ R_{ав3} &= 2,15 \text{ мОм}, & X_{ав3} &= 1,20 \text{ мОм} & (I_{НОМ} &= 100\text{А}); \\ R_{ав4} &= 7,00 \text{ мОм}, & X_{ав4} &= 4,50 \text{ мОм} & (I_{НОМ} &= 50\text{А}). \end{aligned}$$

Суммарные сопротивления автоматов:

$$\begin{aligned} R_{ав} &= R_{ав1} + R_{ав2} + R_{ав3} + R_{ав4} = 0,14 + 1,10 + 2,15 + 7,00 = 10,39 \text{ мОм}; \\ X_{ав} &= X_{ав1} + X_{ав2} + X_{ав3} + X_{ав4} = 0,08 + 0,50 + 1,20 + 4,50 = 6,28 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

6) Определяем результирующие активное и индуктивное сопротивления для однофазного КЗ в точке К:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= 2 \cdot (R_T + R_{ш} + R_{1к} + R_{2к} + R_{3к}) + R_{Т0} + R_{ш0} + R_{1к0} + R_{2к0} + R_{3к0} + 3 \cdot R_{ав} = \\ &= 2 \cdot (1,9 + 0,0969 + 25,6 + 92,28 + 192,0) + 1,9 + 0,969 + 73,6 + \\ &+ 196,8 + 295,0 + 3 \cdot 10,39 = 1223,19 \text{ мОм}; \\ X_{\Sigma} &= 2 \cdot (X_c + X_T + X_{ш} + X_{1к} + X_{2к} + X_{3к}) + X_{Т0} + X_{ш0} + X_{1к0} + X_{2к0} + X_{3к0} + 3 \cdot X_{ав} = \\ &= 2 \cdot (1,60 + 8,6 + 0,378 + 4,56 + 7,2 + 4,4) + 8,6 + 3,213 + 12,56 + 30,84 \\ &+ 90,55 + 3 \cdot 6,28 = 218,08 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

7) Определяем ток однофазного КЗ в точке К

$$I_K^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot 10^3}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3}{\sqrt{1223,19^2 + 218,08^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3}{1242,48} = 557,61 \approx 558 \text{ А}.$$

2. Определяем результирующие активное и индуктивное сопротивления и ток однофазного КЗ в точке К₁:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma 1} &= 2 \cdot (R_T + 1/3 \cdot R_{ш} + R_{1к}) + R_{Т0} + 1/3 \cdot R_{ш0} + R_{1к0} + 3 \cdot (R_{ав1} + R_{ав2}) = \\ &= 2 \cdot (1,9 + 1/3 \cdot 0,0969 + 25,6) + 1,9 + 1/3 \cdot 0,969 + 73,6 + 3 \cdot (0,14 + 1,10) = \\ &= 134,61 \text{ мОм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\Sigma 1} &= 2 \cdot (X_c + X_T + 1/3 \cdot X_{ш} + X_{1к}) + X_{Т0} + 1/3 \cdot X_{ш0} + X_{1к0} + 3 \cdot (X_{ав1} + X_{ав2}) = \\ &= 2 \cdot (1,6 + 8,6 + 1/3 \cdot 0,378 + 4,56) + 8,6 + 1/3 \cdot 3,213 + 12,56 + 3 \cdot (0,08 + 0,50) = \\ &= 53,74 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

$$I_{K1}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot 10^3}{\sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + X_{\Sigma 1}^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3}{\sqrt{134,61^2 + 53,74^2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3}{144,94} = 4780 \text{ А} = 4,78 \text{ кА}.$$

3. Пренебрегая сопротивлением внешней сети, проверим действие защитных аппаратов при однофазных КЗ в наиболее удалённой точке линии при условии выполнения требований ПУЭ.

Ток однофазного КЗ в точке К определён и составляет:

$$I_K^{(1)} = 558 \text{ A}.$$

Допустимая кратность тока КЗ по отношению к номинальному току комбинированного расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратозависимую от тока характеристику (по отношению к току уставки теплового элемента) равна $K_{31} = 3$ [для автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем – $K_{31} = 1,27$].

Тогда имеем:

для автомата А1 $3 \times 1600 = 4800 > 558 \text{ A}$ – надёжность действия автомата А1 при однофазном КЗ в точке К не обеспечивается;

для автомата А2 $3 \times 200 = 600 > 558 \text{ A}$ – надёжность действия автомата А2 при однофазном КЗ в точке К обеспечивается с учётом погрешности расчёта;

для автомата А3 $3 \times 100 = 300 < 558 \text{ A}$ – надёжность действия автомата А3 для защиты при однофазном КЗ в точке К обеспечивается;

для автомата А4 $3 \times 10 = 30 < 558 \text{ A}$ – надёжность действия защиты при однофазном КЗ в точке К обеспечивается.

4. Расчёт токов трёхфазного КЗ

1) Для точки К:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= R_T + R_{ш} + R_{1к} + R_{2к} + R_{3к} + R_{ав} = \\ &= 1,9 + 0,0969 + 25,60 + 92,28 + 192,0 + 10,39 = 322,27 \text{ мОм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= X_c + X_T + X_{ш} + X_{1к} + X_{2к} + X_{3к} + X_{ав} = \\ &= 1,6 + 8,6 + 0,378 + 4,56 + 7,20 + 4,40 + 6,28 = 33,02 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

$$I_K^{(3)} = \frac{U \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{322,27^2 + 33,02^2}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 323,96} = 712,9 \text{ A}.$$

Отношение значений токов трёхфазного и однофазного замыканий:

$$\frac{I_K^{(3)}}{I_K^{(1)}} = \frac{712,9}{557,61} = 1,278 \cong 1,3.$$

2) Для точки К1:

$$\begin{aligned}R_{\Sigma 1} &= R_T + 1/3 \cdot R_{ш} + R_{1к} + R_{ав1} + R_{ав2} = \\ &= 1,9 + 1/3 \cdot 0,0969 + 25,60 + 0,14 + 1,10 = 28,772 \text{ мОм}; \\ X_{\Sigma 1} &= X_c + X_T + 1/3 \cdot X_{ш} + X_{1к} + X_{ав1} + X_{ав2} = \\ &= 1,6 + 8,6 + 1/3 \cdot 0,378 + 4,56 + 0,08 + 0,50 = 15,466 \text{ мОм}.\end{aligned}$$

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{U \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + X_{\Sigma 1}^2}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{28,772^2 + 15,466^2}} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 32,665} = 7070 \text{ А} = 7,07 \text{ кА}.$$

Отношение значений токов трёхфазного и однофазного замыканий:

$$\frac{I_{к1}^{(3)}}{I_{к1}^{(1)}} = \frac{7070}{4780} = 1,48 \approx 1,5.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебник для вузов. /Б.И. Кудрин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1978. – 415 с.
4. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2001. – 152.с.
5. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах. / Ю.А. Куликов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с.
6. Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередачи и сетей. / Под ред. Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.Л. Самовера. Изд. 2-е, Перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 696 с.
7. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
8. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. / Под общ. ред. А.А. Фёдорова и Г.В. Сербиновского. В 2-х кн. Кн.1. Проектно-расчётные сведения. М.: Энергия, 1973. – 520 с.
9. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. – СПб.: Деан, 1999. – 924с.
10. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах. / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1968. – 496 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Определение сопротивлений элементов цепи КЗ в именованных и относительных единицах, приведённых к базисным условиям

Расчётные формулы для определения сопротивлений элементов системы электроснабжения в именованных и в относительных единицах ($X_{*б.л}$, $X_{*б.тр}$ и т.д.) определяются паспортными данными и параметрами элементов.

I. Синхронный генератор, синхронный и асинхронный двигатели, система электроснабжения.

Необходимость учёта СГ возникает при подключении на генераторном напряжении РП к ТЭЦ.

Для расчёта должны быть известны: $S_{ном}$, $U_{ном}$, сверхпереходное индуктивное сопротивление X_d'' , сверхпереходная ЭДС E'' . Сверхпереходное сопротивление находят по каталогам и заводским формулярам или по формулам. Электродвигатели напряжением выше 1кВ рассматриваются аналогично генераторам. При отсутствии каталожных или заводских данных принимаются средние значения индуктивных сопротивлений и ЭДС элементов расчётной схемы [в относительных единицах]:

№		X_d''	E_*''
1	Источник неограниченной мощности	0	1,00
2	Турбогенератор (до 100 МВт)	0,125	1,08
3	Турбогенератор (более 100 МВт)	0,20	1,13
4	Гидрогенераторы с успокоительной (демпферной) обм.	0,20	1,13
5	Гидрогенераторы без демпферной обмотки	0,27	1,18
6	Синхронный компенсатор (режим перевозбуждения)	0,16	1,2
7	Синхронный электродвигатель	0,20	1,1
8	Асинхронный электродвигатель	0,20	0,9
9	Обобщённая нагрузка	0,35	0,85
10	Энергосистема	X_{*c}	1,00

Если доаварийным режимом является холостой ход, то нагрузка в схеме отсутствует, а ЭДС всех генераторов и синхронных компенсаторов принимается равной единице ($E_*'' = 1$).

Фазное значение ЭДС E'' определяется приближённым выражением (в именованных единицах):

$$E'' = U_{ном} \pm I_{ном} \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi_{ном} ,$$

где $\varphi_{ном}$ - угол между $U_{ном}$ и $I_{ном}$ в доаварийном режиме; знак минус принимается для асинхронных двигателей и синхронных компенсаторов в

режиме недовозбуждения, что соответствует потреблению реактивного тока из сети.

В именованных единицах сверхпереходная ЭДС определяется по номинальному напряжению $U_{ном}$ как:

$$E'' = k \cdot U_{ном},$$

где коэффициент $k = E_*''$ (берётся из таблицы).

Если необходимые данные об энергосистеме отсутствуют, расчёты производят по предельному току отключения $I_{отк}$ выключателей, установленных на шинах связи с энергосистемой. Ток отключения приравнивается току КЗ I_k , и отсюда определяют сопротивление системы X_c .

Сопротивления энергосистемы в именованных и в относительных единицах определяются [Л.1, с.200; Л.7, с.121]:

$$X_c = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{U_{cp}^2}{S_k}, \text{ Ом}; \quad X_{*б.с} = \frac{X_c}{X_b} = \frac{S_b}{S_k} = \frac{S_b}{S_{отк}}; \quad \text{или} \quad X_{*б.с} = \frac{I_b}{I_k} = \frac{I_b}{I_{отк}}.$$

Здесь: S_k – мощность трёхфазного КЗ на шинах источника питания; $S_{отк}$ – мощность отключения по каталогу выключателя, установленного на присоединении подстанции предприятия к системе; I_k – заданный ТКЗ энергосистемы, приведённый к напряжению U_{cp} .

Сверхпереходное сопротивление X_d'' в паспорте электродвигателя в отличие от генераторов не указывается и определяется по кратности его пускового тока к номинальному:

$$X_d'' = \frac{I_{ном}}{I_{пуск}} = \frac{I_{ном}}{k_n \cdot I_{ном}} = \frac{1}{k_n}.$$

Сопротивления синхронных и асинхронных двигателей в именованных и относительных единицах определяются:

$$X_D = X_d'' \cdot \frac{(E'')^2}{S_{ном}}, \text{ Ом}; \quad X_{*б.Д} = X_d'' \cdot \frac{S_b}{S_{ном}}. \quad (*)$$

Активное сопротивление синхронных и асинхронных двигателей в именованных и относительных единицах определится через постоянную времени двигателей и круговую частоту ($T_{a,дв}$, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 100 \cdot \pi$):

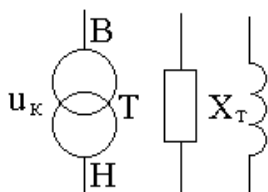
$$R_D = \frac{X_D}{\omega \cdot T_{a,дв}}, \text{ Ом}; \quad R_{*б.Д} = \frac{X_{*б.Д}}{\omega \cdot T_{a,дв}}.$$

Обобщённой нагрузкой принято называть смешанную нагрузку, состоящую из нагрузок на освещение, питание электродвигателей, печей, выпрямителей и т. п. Средние расчётные параметры такой нагрузки даны в таблице и отнесены к среднему номинальному напряжению ступени трансформации в месте подключения нагрузки и полной мощности нагрузки (МВА). Определение сопротивления обобщённой нагрузки производится аналогично формулам (*).

ЭДС источников электропитания, если им является энергосистема с удалёнными от точки КЗ генераторами определится [Л.7, с.123]: $E_*'' = 1$.

II. Силовые трансформаторы.

1) трансформатор двухобмоточный



К расчётным паспортным параметрам относятся:

$$S_{\text{ном}}, U_{\text{нВ}}, U_{\text{нН}}, u_k\%, P_{\text{кн}}.$$

Трансформатор с напряжением (НН) выше 1кВ (при $S_{\text{нт}} \geq 1000\text{кВ}\cdot\text{А}$)

$$(R_T = 0, X_T\% \cong u_k\%).$$

$$X_T = \frac{u_k\% \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.Т}}} = \frac{u_k\% \cdot U_{\delta}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.Т}}}, \text{ Ом}; \quad X_{* \delta.Т} = X_T \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{u_k\% \cdot S_{\delta}}{100 \cdot S_{\text{ном.Т}}}.$$

Трансформатор с напряжением (НН) до 1кВ (при $S_{\text{нт}} \leq 630\text{кВ}\cdot\text{А}$)

$$Z_T = \frac{u_k\% \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.Т}}} = \frac{u_k\% \cdot U_{\delta}^2}{100 \cdot S_{\text{ном.Т}}}, \text{ Ом}.$$

Для потерь при опыте КЗ [Л.1, Л.7]: $P_{\text{к}} = 3 \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot R_T = 3 \cdot \left[\frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср}}} \right]^2 \cdot R_T$,

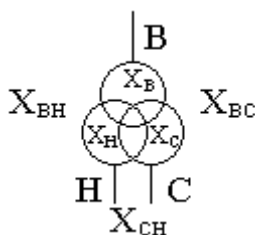
тогда $R_T = \frac{P_{\text{к}} \cdot U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2}, \text{ Ом}; \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \text{ Ом}.$

В относительных единицах: $Z_{* \delta.Т} = \frac{u_k\% \cdot S_{\delta}}{100 \cdot S_{\text{ном.Т}}} = Z_T \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср.ном}}^2},$

$$R_{* \delta.Т} = R_T \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{P_{\text{к}} \cdot S_{\delta}}{S_{\text{ном}}^2}, \quad X_{* \delta.Т} = X_T \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \sqrt{Z_{* \delta.Т}^2 - R_{* \delta.Т}^2}.$$

Поскольку активное сопротивление трансформаторов сравнительно невелико, обычно принимают $Z_T \approx X_T$. Рекомендуется учитывать R_T для трансформаторов мощностью $S_{\text{ном}} = 630\text{кВ}\cdot\text{А}$ и менее [Л.1].

2) трансформатор трёхфазный трёхобмоточный



Для расчёта должны быть задано:

$$S_{\text{ном}}, U_{\text{номВ}}, U_{\text{номС}}, U_{\text{номН}}, u_{\text{кВС}}\%, u_{\text{кВН}}\%, u_{\text{кСН}}\%, P_{\text{к}}.$$

Для трёхобмоточных трансформаторов значения $u_k\%$ даются для каждой пары обмоток $u_{\text{кВН}}, u_{\text{кСН}}, u_{\text{кВС}}$, отнесённые к номинальной мощности трансформатора, за которую принимается наибольшая номинальная мощность первичной обмотки (для трёхобмоточного трансформатора за $S_{\text{ном}}$ следует принимать наибольшую номинальную мощность обмотки независимо от соотношения между номинальными мощностями его отдельных обмоток).

Индуктивные сопротивления между обмотками трёхобмоточного трансформатора определяются из выражений (в о. е.; $X\% = u_k\%$ при $R = 0$):

$$X_{* \text{ВН}} = X_{* \text{В}} + X_{* \text{Н}}; \quad X_{* \text{СН}} = X_{* \text{С}} + X_{* \text{Н}}; \quad X_{* \text{ВС}} = X_{* \text{В}} + X_{* \text{С}}.$$

Индуктивные сопротивления отдельных обмоток, приведённые к базисной мощности S_{δ} (в о.е.):

$$X_{* \delta . B} = \frac{1}{200} \cdot (X_{BC}^{\%} + X_{BH}^{\%} - X_{CH}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{1}{200} \cdot (u_{\kappa BC}^{\%} + u_{\kappa BH}^{\%} - u_{\kappa CH}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}};$$

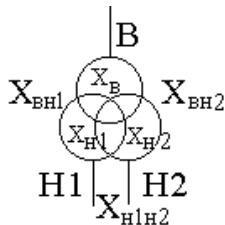
$$X_{* \delta . C} = \frac{1}{200} \cdot (X_{BC}^{\%} + X_{CH}^{\%} - X_{BH}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{1}{200} \cdot (u_{\kappa BC}^{\%} + u_{\kappa CH}^{\%} - u_{\kappa BH}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}};$$

$$X_{* \delta . H} = \frac{1}{200} \cdot (X_{BH}^{\%} + X_{CH}^{\%} - X_{BC}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{1}{200} \cdot (u_{\kappa BH}^{\%} + u_{\kappa CH}^{\%} - u_{\kappa BC}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}}.$$

$X_{BC}^{\%}, X_{BH}^{\%}, X_{CH}^{\%}$ - индуктивные сопротивления каждой пары обмоток трёхобмоточного трансформатора, % ;

$X_{* \delta . B}, X_{* \delta . C}, X_{* \delta . H}$ - приведённые к базисной мощности сопротивления отдельных обмоток, о. е.

3) трансформатор двухобмоточный трёхфазный с расщеплённой на две части обмоткой низшего напряжения



К расчётным паспортным параметрам относят:

$S_{номВ}$ (или $S_{номН1(Н2)}$); $S_{номН1(Н2)} = 0,5S_{номВ}$, $U_{номВВ}$, $U_{номН1(Н2)}$, $u_{\kappa BH1(Н2)}^{\%}$, $u_{\kappa H1(Н2)}^{\%}$, P_{κ} .

Согласно Л.6 имеем:

$$X_{* \delta . B} = \frac{1}{200} \cdot (X_{BH1}^{\%} + X_{BH2}^{\%} - X_{H1-H2}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{1}{200} \cdot (2 \cdot u_{\kappa BH1}^{\%} - u_{\kappa H1-H2}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}};$$

$$X_{* \delta . H1} = X_{* \delta . H2} = \frac{1}{200} \cdot (X_{BH1}^{\%} + X_{H1-H2}^{\%} - X_{BH2}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}} = \frac{1}{200} \cdot (u_{\kappa H1-H2}^{\%}) \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{ном}}.$$

$X_{BH1}^{\%}, X_{BH2}^{\%}, X_{H1-H2}^{\%}$ - индуктивные сопротивления каждой пары обмоток трансформатора, в %, равные $u_{\kappa}^{\%}$ ($X_{BH1}^{\%} = X_{BH2}^{\%}$);

$X_{* \delta . B}, X_{* \delta . H1}, X_{* \delta . H2}$ - приведённые к базисной мощности сопротивления отдельных обмоток, о. е.

Или [Л.7]:

$$X_B = \frac{u_{\kappa BB}^{\%} \cdot U_{ср.ном}^2}{100 \cdot S_{ном.Т}} \cdot \left(1 - \frac{K_p}{4}\right), \text{ Ом}; \quad X_{H1} = X_{H2} = \frac{u_{\kappa BB}^{\%} \cdot U_{ср.ном}^2 \cdot K_p}{100 \cdot S_{ном.Т} \cdot 2}, \text{ Ом};$$

$$X_{*B} = \frac{u_{\kappa BB}^{\%} \cdot S_{\delta}}{100 \cdot S_{ном.Т}} \cdot \left(1 - \frac{K_p}{4}\right); \quad X_{*H1} = X_{*H2} = \frac{u_{\kappa BB}^{\%} \cdot S_{\delta} \cdot K_p}{100 \cdot S_{ном.Т} \cdot 2}.$$

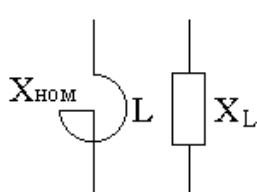
где коэффициент расщепления $K_p = 4 \cdot \left(\frac{u_{\kappa BH1}^{\%}}{u_{\kappa BH}^{\%}} - 1\right)$.

Для однофазных трансформаторов коэффициент расщепления $K_p \approx 4$, а для трёхфазных трансформаторов $K_p \approx 3,5$.

Здесь $u_{кВН}^{\%}$ – напряжение КЗ при параллельном соединении ветвей расщеплённых обмоток Н1-Н2, отнесённых к полной номинальной мощности трансформатора; $u_{кВН1}^{\%} = u_{кВН2}^{\%}$ – при закороченной расщеплённой обмотке Н1 или Н2, отнесённое к номинальной мощности одной ветви, равной $0,5 \cdot S_H$ от полной мощности трансформатора.

III. Реакторы

1) Реактор токоограничивающий одинарный (обычный).

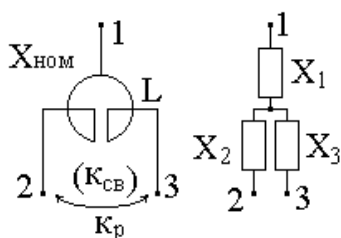


$$X_L = X_{НОМ}, Ом; \quad X_{* \delta, P} = \frac{X_p^{\%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta} \cdot U_{H.P}}{\sqrt{3} \cdot I_{H.P} \cdot U_{\delta, P}^2} = \frac{X_p^{\%} \cdot I_{\delta, P} \cdot U_{H.P}}{100 \cdot I_{H.P} \cdot U_{\delta, P}},$$

$$X_{* \delta, P} = X_{НОМ} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta, P}^2}, \quad \text{где } X_p^{\%} \text{ - индуктивное сопротивление}$$

реактора в процентах (берётся из каталога; $X^{\%} = X \cdot 100$); $U_{\delta, P}$, $I_{\delta, P}$ – базисные значения тока и напряжения реактора ($U_{\delta, P} = U_{ср, ном}$); для реактора базисный ток должен быть определён при среднем (базисном) напряжении той электрической ступени, на которой установлен реактор; $I_{H.P}$, $U_{H.P}$ – номинальные значения напряжения и тока реактора (берутся из каталога – [Л.7]); $X_{НОМ}$ – номинальное индуктивное сопротивление бетонного реактора (берётся из каталога – [Л.6]).

2) Реактор токоограничивающий сдвоенный.



$$X_1 = -K_p \cdot X_{НОМ}, Ом; \quad X_2 = X_3 = (1 + K_p) \cdot X_{НОМ}, Ом.$$

$$X_{*1} = -K_p \cdot X_{НОМ} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ср, ном}^2} = -K_{св} \cdot X_{*H.P} \cdot \frac{S_{\delta} \cdot U_{H.P}}{\sqrt{3} \cdot I_{H.P} \cdot U_{ср, ном}^2};$$

$$X_{*2} = X_{*3} = (1 + K_p) \cdot X_{НОМ} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ср, ном}^2} = (1 + K_{св}) \cdot X_{*H.P} \cdot \frac{S_{\delta} \cdot U_{H.P}}{\sqrt{3} \cdot I_{H.P} \cdot U_{ср, ном}^2}.$$

$U_{H.P}$ – номинальное напряжение реактора, кВ; $I_{H.P}$ – номинальный ток реактора, кА; $K_{ср} = K_p$ – коэффициент связи (расщепления) ветвей реактора, равный в среднем 0,5 для изготавливаемых реакторов; $X_{*H.P} = X_{*}$ – индуктивные сопротивления ветвей реактора по схеме замещения.

При питании в точке 1 при КЗ в точке 2 индуктивное результирующее сопротивление реактора (сквозная реактивность) определится [Л.6]:

$$X_{*рез} = X_{*1} + X_{*2} = -K_{св} \cdot X_{*} + (1 + K_p) \cdot X_{*} = X_{*} = X_{НОМ} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ср, ном}^2}.$$

IV. Линии электропередачи, трёхжильные кабели ($U_n = U_{ср.н}$)

$$X_{ЛЭП} = X_0 \cdot \ell ; R_{ЛЭП} = R_0 \cdot \ell , Ом ;$$

$$X_{*б.ЛЭП} = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_б}{U_{ср.ЛЭП}^2} ; R_{*б.ЛЭП} = R_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_б}{U_{ср.ЛЭП}^2} ,$$

где R_0 , X_0 – удельные реактивное и активное сопротивления на 1 км длины линии на одну фазу, Ом/км (мОм/м).

В качестве средних расчётных значений индуктивного сопротивления на фазу следует принимать [Л.1, Л.6, Л.8]:

№	Наименование и характеристика ЛЭП	X_0 , Ом/км
1	Воздушные ЛЭП напряжением 6-220 кВ	0,4
2	Воздушные ЛЭП напряжением до 1 кВ	0,3
3	Трёхжильный кабель напряжением 35 кВ	0,12
4	Трёхжильный кабель напряжением 6-10 кВ	0,08
5	Трёхжильный кабель напряжением до 3 кВ	0,07

Активное сопротивление рассчитывается и учитываться в случаях, если его суммарное значение составляет более 1/3 индуктивного сопротивления всех элементов схемы замещения до точки КЗ (т.е. когда $R_{\Sigma} \geq 1/3 \cdot X_{\Sigma}$) или когда оно используется для определения затухания апериодического тока короткого замыкания. Активное сопротивление линии может быть взято по справочным материалам. Для медных и алюминиевых проводов активное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R = R_0 \cdot \ell = \frac{\ell}{\gamma \cdot S} ; R_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot S} , \frac{мОм}{м} . \text{ Здесь: } [S] = \text{мм}^2 ; [\ell] = \text{м} ; [\gamma] = \text{м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2) .$$

Удельная проводимость для меди $\gamma_{\text{меди}} = 53 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$, удельная проводимость для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов $\gamma_{\text{алюм}} = 32 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$, для стальных проводов принимают усреднённое значение $\gamma_{\text{стали}} = 10$ [Л.8, с.102].

Значения R_0 для стальных проводов можно принимать по таблице:

Марка провода	ПС-95	ПС-70	ПС-50	ПС-35	ПС-23	Ж-6	ПСО-5 /Ж-5/	ПСО-4 /Ж-4/	ПСО-3.5
R_0 , Ом/км	1,7	2,1	3,4	4,5	6,2	9,0	11	13	17

Сопротивления трёхжильных кабелей и проводов приведены в справочниках [Л.6, с.679; Л.7, с.139].

При учёте активного сопротивления полное сопротивление цепи КЗ определяется по формуле:

$$Z_{рез} = \sqrt{X_{рез}^2 + R_{рез}^2} .$$

При определении результирующих сопротивлений цепи КЗ часто приходится производить эквивалентные преобразования в схемах (преобразования последовательных и параллельных соединений, преобразование $Y \rightarrow \Delta$ и обратное преобразование $\Delta \rightarrow Y$).

Для определения ударного коэффициента K_y в сетях высокого напряжения (когда активные сопротивления элементов СЭС при расчёте токов короткого замыкания не учитываются) производят оценку активных сопротивлений элементов схемы (при отсутствии достоверных данных) по ориентировочным значениям отношения X/R у отдельных элементов, взятым из справочников [Л.2, Л.7]:

№	Наименование элемента	Отношение X/R
1	Турбогенератор мощностью до 200 МВт	80
	Турбогенератор мощностью 300 – 500 МВт	100 – 110
2	Трансформатор 6 / 0,4-0,69 кВ мощностью до 2,5 МВт	2,8
	Трансформатор 10 / 0,4-0,69 кВ мощностью до 2,5 МВт	5
	Трансформатор 35 кВ мощностью до 10 МВт	5,4– 11,5
	Трансформатор 110 кВ мощностью до 16 МВт	17,5–18,5
3	Токоограничивающий реактор на ток до 1000А	15 – 70
	Токоограничивающий реактор на ток более 1000А	40 – 80
5	Воздушные линии электропередачи напряжением 35 кВ	0,6 – 1
	Воздушные линии напряжением 110 кВ	1,3 – 2,6
	Воздушные линии напряжением 220 кВ	3,6 – 4
6	Кабельные линии 1 / 6-10 / 35 кВ с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 25 \div 3 \times 55 \text{ мм}^2$	0,06 – 0,08/ 0,06 – 0,09/ 0,10 – 0,13
	Кабельные линии 1 / 6-10 / 35 кВ с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 50 \div 3 \times 70 \text{ мм}^2$	0,11 – 0,16/ 0,13 – 0,18/ 0,20 – 0,27
	Кабельные линии 1 / 6-10 / 35 кВ с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 95 \div 3 \times 120 \text{ мм}^2$	0,21 – 0,27/ 0,24 – 0,31/ 0,36 – 0,46
	Кабельные линии 1 / 6-10 / 35 кВ с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 150 \div 3 \times 185 \text{ мм}^2$	0,35 – 0,44/ 0,40 – 0,50/ 0,60 – 0,75
7	Обобщённая нагрузка	2,5

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Сопротивления трёхжильных кабелей в алюминиевой (AL), свинцовой (Pb) и непроводящей (–) оболочках с алюминиевыми жилами токам прямой, обратной и нулевой последовательностей

Сечение кабеля, мм ²	Сопротивление кабеля, мОм / км							
	R ₁ = R ₂	X ₁ = X ₂	AL		Pb		–	
			R ₀	X ₀	R ₀	X ₀	R ₀	X ₀
3×4	9,61	0,092	10,95	0,579	11,60	1,24	11,70	2,31
3×6	6,41	0,087	7,69	0,523	8,38	1,20	8,51	2,274
3×10	3,84	0,082	5,04	0,461	5,78	1,16	6,94	2,24
3×16	2,40	0,078	3,52	0,406	4,32	1,12	4,50	2,20
3×25	1,54	0,062	2,63	0,359	3,44	1,07	3,64	2,17
3×35	1,10	0,061	2,07	0,298	2,96	1,01	3,30	2,14
3×50	0,769	0,060	1,64	0,257	2,60	0,963	2,869	2,08
3×70	0,549	0,059	1,31	0,211	2,31	0,884	2,649	2,07
3×95	0,405	0,057	1,06	0,174	2,10	0,793	2,505	2,05
3×120	0,320	0,057	0,92	0,157	1,96	0,742	2,42	2,03
3×150	0,256	0,056	0,78	0,136	1,82	0,671	2,36	2,00
3×185	0,208	0,056	0,66	0,122	1,69	0,606	–	–
3×240	0,160	0,055	0,553	0,107	1,55	0,535	–	–

Сопротивления четырёхжильных кабелей в алюминиевой (AL), свинцовой (Pb) и непроводящей (–) оболочках с алюминиевыми жилами токам прямой, обратной и нулевой последовательностей

Сечение кабеля, мм ²	Сопротивление кабеля, мОм / км							
	R ₁ = R ₂	X ₁ = X ₂	AL		Pb		–	
			R ₀	X ₀	R ₀	X ₀	R ₀	X ₀
3×4+1×2,5	9,61	0,099	10,87	0,579	11,52	1,13	11,71	2,110
3×6+1×4	6,41	0,094	7,60	0,523	8,28	1,05	8,71	1,968
3×10+1×6	3,84	0,088	4,94	0,461	5,63	0,966	5,90	1,811
3×16+1×10	2,40	0,084	3,39	0,406	4,09	0,831	4,39	1,558
3×25+1×16	1,54	0,072	2,41	0,359	3,08	0,688	3,42	1,258
3×35+1×16	1,10	0,068	1,93	0,298	2,63	0,647	2,97	1,241
3×50+1×25	0,769	0,066	1,44	0,257	2,10	0,50	2,449	0,949
3×70+1×35	0,549	0,065	1,11	0,211	1,71	0,393	2,039	1,741
3×95+1×50	0,405	0,064	0,887	0,174	1,39	0,317	1,665	0,559
3×120+1×50	0,320	0,064	–	–	1,27	0,301	1,540	0,545
3×150+1×70	0,256	0,063	–	–	1,06	0,248	1,276	0,430
3×185+1×70	0,208	0,063	–	–	0,989	0,244	–	–

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Сопротивления понижающих трансформаторов с вторичным напряжением
0,4 кВ [Л.7, с.137]

Номи- нальная мощность, кВ·А	Схема соеди- нения обмоток	$u_k\%$	Значение сопротивлений, мОм			
			прямой		нулевой	
			последовательности		последовательности	
			R_{1T}	X_{1T}	R_{0T}	X_{0T}
25	Y / Y _H	4,5	154	244	1650	1930
25	Y / Z _H	4,7	177	243	73	35,4
40	Y / Y _H	4,5	88	157	952	1269
40	Y / Z _H	4,7	100	159	44	13,4
63	Y / Y _H	4,5	52	102	504	873
63	Y / Z _H	4,7	59	105	28	12
100	Y / Y _H	4,5	31,5	65	254	582
100	Y / Z _H	4,7	36,3	65,7	15,6	10,6
160	Y / Y _H	4,5	16,6	41,7	151	367
160	Δ / Y _H	4,5	16,6	41,7	16,6	41,7
250	Y / Y _H	4,5	9,4	27,2	96,5	235
250	Δ / Y _H	4,5	9,4	27,2	9,4	27,2
400	Y / Y _H	4,5	5,5	17,1	55,6	149
400	Δ / Y _H	4,5	5,9	17	5,9	17
630	Y / Y _H	5,5	3,1	13,6	30,2	95,8
630	Δ / Y _H	5,5	3,4	13,5	3,4	13,5
1000	Y / Y _H	5,5	1,7	8,6	19,6	60,6
1000	Δ / Y _H	5,5	1,9	8,6	1,9	8,6
1600	Y / Y _H	5,5	1	5,4	16,3	50
1600	Δ / Y _H	5,5	1,1	5,4	1,1	5,4
2500	Δ / Y _H	5,5	0,64	3,46	0,64	3,46

Примечания: 1. Указанные в таблице значения сопротивлений масляных трансформаторов приведены к напряжению 0,4 кВ;

2. Для трансформаторов со вторичным напряжением 0,23 кВ данные таблицы следует уменьшить в 3 раза, а для трансформаторов со вторичным напряжением 0,69 кВ – увеличить в 3 раза.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Значения сопротивлений автоматических выключателей [Л.7, с.139]

$I_{НОМ}$, А	50	70	100	140	200	400	600	1000	1600	2500	4000
R_a , мОм	7	3,5	2,15	1,3	1,1	0,65	0,41	0,25	0,14	0,13	0,1
X_a , мОм	4,5	2	1,2	0,7	0,5	0,17	0,13	0,1	0,08	0,07	0,05

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

План 2004

Составители:

Князев Валерий Семёнович
Свирская Галина Сергеевна

**РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Методические указания к курсовому и дипломному
проектированию для студентов специальности
«Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений» (181300)

Напечатано в полном соответствии
с авторским оригиналом

Подписано в печать _____

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. _____. Уч.- изд. л. _____. Тираж ____ экз. Заказ _____

ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет»

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ

