

Министерство общего и профессионального  
образования Российской Федерации

АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю.В. Мясоедов,  
Л.Б. Гоголева

РАСЧЕТ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ  
ЗАМЫКАНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Благовещенск

2002

Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
Амурского государственного  
университета

Ю.В. Мясоедов, Л.Б. Гоголева

Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах электроснабжения: Учебно-методическое пособие / Амурский гос. ун-т – Благовещенск, 2002. - 64 с.

Пособие содержит краткие теоретические сведения и методы решения задач и задания для самостоятельной проработки по курсу "Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах".

Рассчитано на студентов специальностей 100100, 100200 и 100400 очной и заочной форм обучения в качестве основного материала для решения задач. Может быть полезно также инженерам, занимающимся вопросами расчета токов короткого замыкания.

Рецензенты А.Е. Серов, зав.кафедрой АПП и Э АмГУ, проф.,  
канд. техн.наук.

В.И. Усенко, доцент кафедры АПП и Э АмГУ,  
канд. техн. наук.

© Амурский государственный университет, 2002

## ВВЕДЕНИЕ

Курс "Переходные процессы в электрических системах" состоит из двух частей: электромагнитные переходные процессы и электромеханические переходные процессы. Первая часть курса посвящена изучению методов расчета симметричных и несимметричных коротких замыканий в электрических сетях промышленных предприятий, а также процессов, связанных с обрывом фазы. В основу настоящего методического пособия положены задачи из сборника С.А. Ульянова "Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах" (М.: Энергия, 1968) и материалы учебника С.Л. Ульянова "Электромагнитные переходные процессы" (Л.: "Энергия", 1970), а также учебника "Переходные процессы в системах электроснабжения" под редакцией В.Н.Винославского (К.: Выща школа, 1989) и "Руководящих указаний по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования" под редакцией Б.Н.Неклепаева (М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000).

Изучение переходных процессов основывается на знаниях, полученных студентами в ходе освоения предшествующих общеобразовательных курсов – математике, теоретической механике, ТОЭ, а также ряде специальных курсов: электрических машин, электрических сетей и других.

Данный курс является основой таких специальных курсов как "Релейная защита", "Электрическая часть станций и подстанций", "Электроснабжение промышленных предприятий" и ряда других.

Для успешного усвоения и глубокого понимания методики решения задач необходимо по соответствующей учебной литературе предварительно изучить основные теоретические положения курса:

- а) принцип наложения;
- б) основные положения расчетов переходных процессов в системах электроснабжения;
- в) систему относительных единиц;

г) основные характеристики и параметры элементов схем замещения электрических систем;

д) метод спрямленных характеристик и расчетных кривых;

е) метод симметричных составляющих;

ж) комплексные схемы замещения.

Для курса "Переходные процессы в электрических системах" существенно прежде всего то, что процессы, происходящие во взаимосвязанных элементах электрических систем, изучаются как единое целое.

Но одного только понимания рассматриваемых явлений инженеру еще недостаточно, он должен предвидеть протекание процессов и уметь управлять ими. Для этого надо научиться рассчитывать процессы и предсказывать по изменениям параметров системы количественные изменения ее режима. Оценивать, когда и какие воздействия должны получать элементы системы от регулирующих и контролирующих устройств для того, чтобы была обеспечена надежность работы отдельных элементов и электрической системы в целом.

В результате изучения курса студент должен:

знать методы расчета токов коротких замыканий в электрических сетях и определения параметров режимов при обрыве одной или двух фаз, методы определения устойчивости и поведения в переходных режимах электрических машин и узлов нагрузок;

уметь пользоваться практическими методами расчета всех видов токов коротких замыканий для определения величин отдельных параметров режимов аналитически и с помощью расчетных столов; определять допустимость различных видов возмущений с точки зрения их воздействия на конкретные типы электрических машин и узлы нагрузок как по условиям устойчивости, так и по допустимым уровням нагрузок, и принимать конкретные меры по обеспечению нормальных условий работы электрооборудования.

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения для решения многих технических вопросов необходимо производить расчеты

электромагнитных переходных процессов и, в частности, процессов при внезапном коротком замыкании.

Под расчетом электромагнитного переходного процесса понимают вычисление токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях. В зависимости от назначения такого расчета находят указанные величины для заданного момента времени или их изменения в течение всего переходного процесса.

К числу задач, для практического решения которых приводят такие расчеты, относятся:

а) сопоставление, оценка и выбор схемы электрических соединений электрических станций, подстанций и систем электроснабжения в целом;

б) оценка условий работы потребителей электроэнергии при аварийных режимах;

в) выбор электрических аппаратов и токоведущих частей, их проверка по условиям работы при коротких замыканиях;

г) проектирование и настройка устройств релейной защиты и автоматики;

д) конструктивные решения элементов распределительных устройств;

е) определение числа заземленных нейтралей и их размещение в системах;

ж) выбор числа и мощности компенсирующих дугогасящих устройств;

з) определение влияния линий электропередачи на линии связи и сигнализации;

и) проектирование и проверка защитных заземлений;

к) подборка характеристик разрядников для защиты от перенапряжений;

л) проведение различных испытаний;

м) анализ происшедших аварий.

Особенностью расчетов при решении задач, встречающихся в эксплуатации, является необходимость учета конкретных условий рассматриваемого переходного процесса. Напротив, при проектировании часто довольствуются приближенными исходными данными. Поэтому в первом

случае требуется большая точность расчета. Например, благодаря тому, что интервалы между параметрами, характеризующими различные типы аппаратов в отношении их устойчивости при коротких замыканиях, достаточно большие, точность расчета для выбора таких аппаратов может быть небольшая. Напротив, точность расчета для выбора установок для релейной защиты и автоматики должна быть значительно выше. Здесь, как и в ряде других случаев, часто необходимо определять и наибольшие, и наименьшие возможные величины токов и напряжений, сдвиг между ними в отдельных фазах или между отдельными их симметричными составляющими, их распределение в схеме и т.п.

## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Изучение курса "Переходные процессы в электрических системах" связано со следующими видами занятий:

лекции по основным темам курса;

самостоятельное изучение студентами разделов курса по рекомендованной литературе;

практические задания;

выполнение домашних заданий;

лабораторные занятия;

выполнение курсовой работы.

При самостоятельной работе с учебниками следует обязательно вести конспект изучаемых разделов в соответствии с указаниями по темам, приведенным ниже. Контроль степени успеваемости рекомендуется осуществлять с помощью вопросов для самопроверки. По мере изучения разделов курса студент выполняет домашние задания, позволяющие практически закрепить полученные теоретические знания и приобрести инженерные навыки в решении отдельных практических вопросов, связанных с изучаемой дисциплиной.

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Основной причиной возникновения рассматриваемых в данном пособии электромагнитных переходных процессов являются короткие замыкания.

Коротким замыканием (КЗ) называют всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с заземленными нейтралью (или четырехпроводных) – также замыкание одной или нескольких фаз на землю (или нулевой провод). Причиной возникновения КЗ являются в основном нарушение (пробой) изоляции электротехнического оборудования, которые вызываются старением изоляционных материалов, перенапряжениями, низкой культурой эксплуатации электрооборудования, механическими повреждениями и т.п.

В системах с незаземленными нейтралью или с нейтралью, заземленными через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной из фаз на землю называют простым замыканием. При этом виде повреждения происхождение тока обусловлено главным образом емкостью фаз относительно земли.

При возникновении короткого замыкания в системе электроснабжения 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 напряжения в системе, которое особенно велико вблизи места КЗ.

Обычно в месте замыкания образуется некоторое переходное сопротивление, обусловленное электрической дугой. В ряде случаев переходные сопротивления так малы, что практически ими можно пренебречь. Такие КЗ называют металлическими.

В трехфазных системах с заземленной нейтралью различают следующие основные виды к.з. в одной точке:

трехфазное;

двухфазное;  
однофазное;  
двухфазное на землю.

Трехфазное КЗ является симметричным, а все остальные виды – несимметричными.

Следует отметить, что процесс включения любого трехфазного приемника, невозбужденного синхронного генератора и двигателя, а также асинхронного двигателя – по существу трехфазное КЗ за некоторым сопротивлением.

Несимметричные КЗ, а также несимметричные нагрузки представляют различные виды поперечной несимметрии.

Нарушение симметрии какого-либо включенного последовательного элемента трехфазной цепи (например, обрыв фазы) называют продольной несимметрией.

Все виды повреждений, сопровождающиеся многократной несимметрией, называют сложными.

Ток КЗ обычно во много раз превышает номинальный ток самой аварийной ветви. Поэтому даже при кратковременном прохождении ток КЗ может вызвать дополнительный нагрев токоведущих элементов и проводников выше допустимого предела.

Кроме теплового действия, токи КЗ вызывают между проводниками большие механические усилия, которые особенно велики когда ток достигает максимального значения (ударный ток). При недостаточной механической прочности электротехнических устройств проводников и их креплений они могут быть разрушены.

Глубокое снижение напряжения и резкое искажение его симметрии, возникающие при КЗ и продольной несимметрии, вредно отражаются на работе потребителей электроэнергии.

При замыканиях на землю и продольной несимметрии возникают неуравновешенные системы токов. Они создают магнитные потоки, наводящие

в параллельно проходящих линиях связи и сигнализации ЭДС, величины которых могут быть опасны для обслуживающего персонала и аппаратуры этих линий.

Наконец, при задержке отключения КЗ сверх допустимой продолжительности может наступить одно из наиболее опасных его последствий – нарушение устойчивости работы системы электроснабжения.

При рассмотрении задач, связанных с электромагнитными переходными процессами в электрических системах, на первом этапе их решения важную роль играет выбор расчетной схемы и расчетных условий, которые определяются в соответствии с целевым назначением выполняемых на практике расчетов.

Под расчетной схемой понимают упрощенную однолинейную схему с указанием всех элементов электроустановки и их параметров, которые влияют на величину тока к.з. и поэтому должны быть учтены при выполнении расчетов. На расчетной схеме указываются номинальные параметры (напряжения, мощности, сопротивления) отдельных элементов. Для определения сопротивления элементов сети на расчетной схеме обычно указываются их параметры в именованных, а в большинстве случаев – в относительных единицах или в процентах (напряжение КЗ трансформаторов –  $U_k\%$ , индуктивное сопротивление генераторов –  $x_d$ , реакторов –  $x_r\%$ ).

Исходные расчетные условия при решении задач весьма разнообразны. Так, для выбора выключателя по условиям его работы при коротком замыкании должны быть определены соответствующие возможные наибольшие величины тока короткого замыкания. С этой целью исходят из предположения, что короткое замыкание происходит в то время, когда включено наибольшее число генераторов, что короткое замыкание металлическое и что оно произошло непосредственно у выводов самого выключателя. Помимо того, здесь устанавливают расчетное время размыкания контактов выключателя и цикл производимых им операций.

Для выбора трубчатого разрядника требуется знать не только наибольшую, но и возможную наименьшую величину тока короткого замыкания, для определения которой должны быть приняты совсем иные расчетные условия.

Большое разнообразие расчетных условий встречается при выполнении расчетов для выбора и настройки устройств релейной защиты и автоматики. В них устанавливаются исходные предшествующие режимы заданной системы, число и расположение заземленных нейтралей, вид повреждений, последовательность отключения поврежденного участка и т.п.

Обоснование расчетных условий для конкретных технических задач – один из важных вопросов соответствующих специальных дисциплин. При определении токов КЗ предусматривается получение максимально возможных их значений (кроме задач, где расчетные исходные условия дополнительно обусловлены). С этой целью принимается ряд допущений, которые можно сформулировать следующим образом:

- 1) питающая трехфазная система ЭДС симметрична;
- 2) все элементы электрической цепи линейны;
- 3) отсутствует сдвиг фаз между ЭДС ротора и статора синхронной машины;
- 4) пренебрегают емкостным током линий;
- 5) пренебрегают током намагничивания трансформатора и реактора;
- 6) пренебрегают активным сопротивлением сети, если это сопротивление меньше чем  $1/3$  реактивного сопротивления;
- 7) нагрузки и группы нагрузок заменяются сосредоточенными элементами ;
- 8) внутреннее сопротивление системы учитывается, если оно более 5-10 % результирующего.

Указанные допущения не оказывают заметного влияния на точность расчетов, но позволяет в значительной степени упростить процесс решения,

определить предельные значения токов КЗ и других параметров аварийных режимов с достаточной для инженерных заключений и обоснований точностью.

## **Тема 1. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ**

1. Преимущества системы относительных единиц, определения, понятия относительной величины, выбор базисных условий.

Литература: / 1 /, § 2.3, с.28-29,32.

2. Приведение э.д.с. и сопротивлений элементов схемы к выбранным базисным условиям.

Литература: /1 /, § 2.3, с. 30-32, пример 2.1, с.32 – 33; /7/, § 2.5, с. 29-32.

3. Выражение в системе относительных единиц угловой скорости и времени.

Литература; /1/, § 2.3, с. 34-35.

4. Составление схем замещения при расчетах в относительных единицах. Точное и приближенное приведение.

Литература: /1/, § 2.4, с. 40 -42, 45-46; /7/, § 2.5, с. 27-32, пример 2.1, с.36-37.

5. Преобразование схем замещения.

Литература: / 1 /. § 2.5, с.46 - 49, § 2.6, с.49-56, §2.7, с.56-57; /7/, § 2.5, с.32-36, пример 2.2, с.38.

6. Применение принципа наложения.

Литература: /1/,§ 2.6, с.49-56.

### **Краткие теоретические сведения**

Представление особых физических величин не в обычных именованных единицах, а в относительных, безразмерных единицах позволяет существенно упростить практические расчеты и придать им большую наглядность. Это позволяет быстрее оценивать порядок определяемых величин. Благодаря этому

система относительных единиц широко используется, хотя на первый взгляд она кажется несколько искусственной и даже излишней.

Под относительным значением какой-либо величины понимают ее отношение к другой одноименной величине, выбранной за единицу измерения. Для выражения отдельных величин в относительных единицах нужно выбрать те величины, которые должны служить базисными.

Примем за базисные величины некоторые произвольные значения тока  $I_{\bar{o}}$  и напряжения  $U_{\bar{o}}$ . Тогда базисная мощность трехфазной системы будет

$$S_{\bar{o}} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}} \cdot I_{\bar{o}} \quad (1)$$

базисное сопротивление

$$z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{o}}} \quad (2)$$

т.е. оно подчинено закону Ома, чтобы обеспечить тождественную запись этого закона как в именованных, так и в относительных единицах. Как видно, из четырех базисных единиц  $I_{\bar{o}}$ ,  $U_{\bar{o}}$ ,  $S_{\bar{o}}$ ,  $z_{\bar{o}}$  только две могут быть выбраны произвольно, две другие получаются из указанных соотношений. Фазные и линейные базисные напряжения и токи связаны между собой известными соотношениями для симметричной трехфазной системы. Следует отметить, что базисные единицы служат для определения как полных величин, так и их составляющих (активных, реактивных и пр.).

Таким образом, при выбранных базисных условиях относительные значения э.д.с., напряжения, тока, мощности и сопротивления будут:

$$E_{*\bar{o}} = \frac{E}{U_{\bar{o}}}; \quad U_{*\bar{o}} = \frac{U}{U_{\bar{o}}}; \quad I_{*\bar{o}} = \frac{I}{I_{\bar{o}}}; \quad S_{*\bar{o}} = \frac{S}{S_{\bar{o}}}; \quad z_{*\bar{o}} = \frac{z}{z_{\bar{o}}} \quad (3)$$

где звездочка (\*) указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (б) – что она приведена к базисным условиям.

Относительные фазные и линейные напряжения численно одинаковы. Представим формальное определение относительного сопротивления в следующем виде:

$$z_{*б} = \frac{z}{z_б} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_б z}{U_б} \quad (4)$$

или

$$z_{*б} = z \frac{S_б}{U_б^2} \quad (5)$$

где  $Z$  – заданное сопротивление в именованных единицах, Ом;

$I_б$  – базисный ток, кА;

$U_б$  – базисное линейное напряжение, кВ;

$S_б$  – базисная мощность, МВА.

Поскольку выбор базисных условий произволен, то одна и та же действительная величина может иметь разные численные значения при выражении ее в относительных единицах (т.е. при  $I_n$ ,  $U_n$ ,  $S_n$ ). Их величины определяются следующим образом:

$$z_{*н} = \frac{z}{z_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n z}{U_n} \quad (6)$$

или

$$z_{*н} = z \frac{S_n}{U_n^2} \quad (7)$$

Для выполнения расчета в относительных единицах необходимо все ЭДС и сопротивления элементов схемы выразить в относительных базисных единицах. Если ЭДС и сопротивления заданы в именованных единицах, то для

перевода их в относительные базисные единицы следует воспользоваться приведенными выше выражениями. Когда же они заданы в относительных номинальных единицах, то их пересчет к базисным условиям необходимо производить по следующим соотношениям:

$$E_{*б} = E_{*н} \frac{U_n}{U_б} \quad (8)$$

$$Z_{*б} = \frac{Z_{*н} \cdot Z_n}{Z_б} = Z_{*н} \cdot \frac{I_б U_n}{I_n U_б} \quad (9)$$

или

$$Z_{*б} = Z_{*н} \cdot \frac{S_б U_n^2}{S_n U_б^2} \quad (10)$$

При выборе базисных условий следует руководствоваться соображениями, чтобы вычислительная работа была по возможности проще, а порядок числовых значений относительных базисных величин был удобен для работы с ними. При  $U_б = U_n$  пересчет относительных ЭДС вообще отпадает ( $E_{*б} = E_{*н}$ ), а выражения для пересчета относительных сопротивлений принимают более простой вид:

$$Z_{*б} = Z_{*н} \cdot \frac{I_б}{I_n} \quad (11)$$

или

$$Z_{*б} = Z_{*н} \cdot \frac{S_б}{S_n} \quad (12)$$

При наличии трансформаторов в расчетной схеме системы электроснабжения для упрощения проводимых расчетов такую схему заменяют схемой замещения, в которой магнитные связи заменяются электрическими.

Коэффициент трансформации каждого трансформатора будет равен отношению напряжения тех ступеней, который он связывает. При каскадном

включении трансформаторов он равен отношению напряжений крайних ступеней. Выражение для пересчета:

$$E_{*б} = k \frac{E}{U_{б}} \quad I_{*б} = \frac{1}{K} \cdot \frac{I}{I_{б}} \quad (13)$$

$$z_{*б} = z_{*н} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н}} \cdot \left( \frac{U_{cp}}{U_{б}} \right)^2 k^2$$

где  $k = \frac{U_{cp.б}}{U_{c.p.}}$  – коэффициент трансформации каскада трансформаторов;

$U_{cp.б}$  – среднее номинальное напряжение основной ступени (к которой приводится);

$U_{cp}$  – среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится пересчет (откуда приводится).

Выражения для пересчета еще более упростятся, если принять  $U_{б} = U_{cp.б}$ . Тогда

$$E_{*б} = E_{*н} \quad (14)$$

$$z_{*б} = z_{*н} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н}}$$

При наличии трансформаторов в расчетной схеме системы электроснабжения для упрощения проводимых расчетов эту схему заменяют схемой замещения, в которой магнитные связи заменяются электрическими. На основании изложенных допущений схема замещения состоит из индуктивных сопротивлений элементов (генераторов, реакторов, трансформаторов, воздушных и кабельных линий, систем и нагрузок) и ЭДС.

Составление схемы замещения сводится к приведению параметров элементов различных ступеней трансформации расчетной схемы к какой-либо ступени, выбранной за основную. Само приведение осуществляется на основе соотношений, которые вытекают из теории трансформаторов.

Если сопротивление выражено в именованных единицах, то приведение осуществляется следующим образом:

$$\overset{\circ}{Z} = Z \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \dots \cdot k_n)^2 \quad (15)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_n$  – коэффициенты трансформации трансформаторов 1,2,3...n, включенных каскадно между ступенью напряжения, на которой находится элемент, и ступенью, принятой за основную.

Напряжения и токи приводятся к основной ступени следующим образом:

$$\overset{\circ}{E} = E(k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n) \quad (16)$$

$$\overset{\circ}{I} = \frac{I}{(k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n)} \quad (17)$$

Рассмотренное приведение по действующим коэффициентам трансформации называют точным. В практических расчетах часто выполняют приближенное приведение, позволяющее значительно быстрее и проще получить приближенную схему замещения. Установлены средние номинальные напряжения :  $U_{ср}$ : 515; 340; 230; 154; 115; 37; 20; 18; 17.75; 13.8; 10.5; 6.3; 3.15; 0.69; 0,4; 0,23 кВ. При этом считаем, что номинальные напряжения всех элементов (кроме реакторов) данной ступени одинаковы и равны  $U_{ср}$ .

Коэффициент трансформации каждого трансформатора будет равен отношению напряжения тех ступеней, которые он связывает. При каскадном

включении трансформаторов он равен отношению напряжений крайних ступеней. Выражения для пересчета:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{E} &= k \cdot E \\ \overset{\circ}{I} &= \frac{I}{k} \\ \overset{\circ}{Z} &= Z \cdot k^2 \end{aligned} \quad (18)$$

где  $k = \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{с.р.}}}$  - коэффициент трансформации каскада трансформаторов;

$U_{\text{ср.б}}$  – среднее номинальное напряжение основной ступени (к которой приводится);

$U_{\text{ср}}$  - среднее номинальное напряжение ступени, с которой производится пересчет (откуда приводится).

При расчете в относительных единицах базисные напряжения всех ступеней приводятся к напряжению основной ступени с учетом фактических коэффициентов трансформации по следующей формуле:

$$\overset{\circ}{U}_{\text{б}i} = \frac{1}{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n} \cdot U_{\text{б.осн}} \quad (19)$$

При приближенных расчетах с использованием средних номинальных напряжений базисные напряжения ступеней трансформации берутся равными соответствующим уровням среднего ряда. На основании вышеизложенного запишем выражения для определения сопротивления в относительных базисных единицах основных элементов систем электроснабжения:

а) генератора

$$x_{\text{г}*\text{б}} = x_{\text{г}*\text{н}} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н.г}}} ; \quad (20)$$

б) трансформатора

$$x_{m*\bar{\sigma}} = \frac{U_k \%}{100} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.т}} ; \quad (21)$$

в) линии электропередачи

$$x_{*вл} = x_{0л} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{ср.л}^2} ; \quad (22)$$

г) реактора

$$x_{p*\bar{\sigma}} = \frac{x_k \%}{100} \frac{I_{\bar{\sigma}}}{I_{н.р}} \cdot \frac{U_{нр} U_{\bar{\sigma}}}{U_{ср.\bar{\sigma}}^2} \quad (23)$$

В последнем случае, если допустимо принять  $U_{нр} = U_{ср}$ , формула упрощается, т.е.:

$$x_{p*\bar{\sigma}} = \frac{x_k \%}{100} \frac{I_{\bar{\sigma}}}{I_{н.р}} \cdot \frac{U_{\bar{\sigma}}}{U_{ср}} \quad (24)$$

При изучении данного материала необходимо получить ясное представление об определении параметров схем замещения при заданных сопротивлениях отдельных элементов схемы замещения в Омах или в относительных единицах.

Усвоить выражения для определения в относительных величинах сопротивлений различных элементов схемы при точном и приближенном их приведении к общим условиям (базисным). Уяснить выбор расчетных условий режима КЗ в зависимости от назначения расчета и возможность применять различные допущения для упрощения расчетов токов КЗ. Представлять, что определяет мощность КЗ в системе и для каких режимов сети она задается.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие короткие замыкания называются металлическими ?

2. Перечислить основные виды коротких замыканий и относительную вероятность их возникновения в электрических системах.
3. Какие виды КЗ могут возникнуть в трехфазной системе с глухозаземленной нейтралью?
4. Какие виды нарушения режима относятся к продольной и поперечной несимметрии?
5. Что понимают под расчетом электромагнитного переходного процесса?
6. Перечислите задачи, для практического решения которых производят расчеты электромагнитных переходных процессов.
7. В чем заключаются основные допущения, принимаемые при расчетах электромагнитных переходных процессов ?
8. Какие преимущества и недостатки системы относительных единиц по сравнению с системой именованных единиц ?
9. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе базисных условий?
10. Почему в случае применения системы относительных единиц результат расчета режима КЗ не зависит от выбора базисных условий, хотя в процессе расчета численные значения величин при разных базисных условиях получаются различными?
11. С какой целью магнитосвязанные цепи представляют схемой замещения?
12. К чему сводится составление такой схемы замещения?
13. Каков порядок расчета при точном приведении в относительных единицах?

### Пример 1.

Реактивности системы и присоединенного к ней трансформатора, отнесенные к их номинальным мощностям  $S_c$  и  $S_t$  – соответственно 0,25 и

0,105. Определить при каком значении  $n = \frac{S_c}{S_T}$  ошибка в токе от пренебрежения реактивностью системы при КЗ за трансформатором не превышает 5%.

В задаче необходимо определить соотношения между мощностями системы и трансформатора, при котором в расчетах тока КЗ сопротивлением системы можно пренебречь. Расчет следует вести в системе о.е.  $S_{\delta}, U_{\delta}$ :

Находим выражение для определения тока КЗ с учетом системы:

а) сопротивление системы в о.е.

$$x_{c*\delta} = x_{c*\delta} \frac{S_{\delta}}{S_{\delta}};$$

б) сопротивление трансформатора в о.е.

$$x_{T*\delta} = x_{T*\delta} \frac{S_{\delta}}{S_H};$$

в) суммарное сопротивление контура к.з.:

$$x_{\Sigma *\delta} = x_{T*\delta} + x_{c*\delta} = \frac{S_{\delta}}{S_H} (x_{c*H} + x_{T*H});$$

г) ток к.з. в о.е.:

$$I_{k*\delta} = \frac{1}{x_{\Sigma *\delta}} = \frac{1}{\frac{S_{\delta}}{S_m} (x_{c*H} \frac{1}{n} + x_{m*H})}$$

Находим выражение для определения тока КЗ без учета системы:

$$I'_{k*\delta} = \frac{1}{x_{m*\delta}} = \frac{1}{\frac{S_{\delta}}{S_m} x_{m*H}}$$

Если ток КЗ, определенный с учетом сопротивления системы, принять за единицу, то условие допустимой ошибки при пренебрежении сопротивлением системы будет соответствовать выражению

$$1 - I'_{k*\delta} \leq 0,05$$

или

$$1 - \frac{\left( X_{T^*H} + \frac{X_{c^*H}}{n} \right) \frac{S_{\sigma}}{S_T}}{\frac{S_{\sigma}}{S_T} \cdot X_{T^*H}} \cdot 0,05,$$

откуда

$$n \geq \frac{X_{c^*H}}{0,05 \cdot X_{T^*H}} = \frac{0,25}{0,05 \cdot 0,105} = 47,5$$

### Задание для самостоятельной работы

Для заданной схемы электрической сети составить схему замещения и определить её параметры в именованных и относительных единицах с точным и приближённым приведением. За основную принять ступень напряжения точки короткого замыкания. Напряжения короткого замыкания трансформаторов Т1 и АТ :  $U_{кв-с}=10,5 \%$ ,  $U_{кв-н}=17,5 \%$ ,  $U_{кс-н}=6,5 \%$  ; Т2 :  $U_{к}=11 \%$ . Удельное индуктивное сопротивление ВЛ  $X_{уд}=0,41 \text{ Ом/км}$ . Исходные данные приведены в таблице 1.

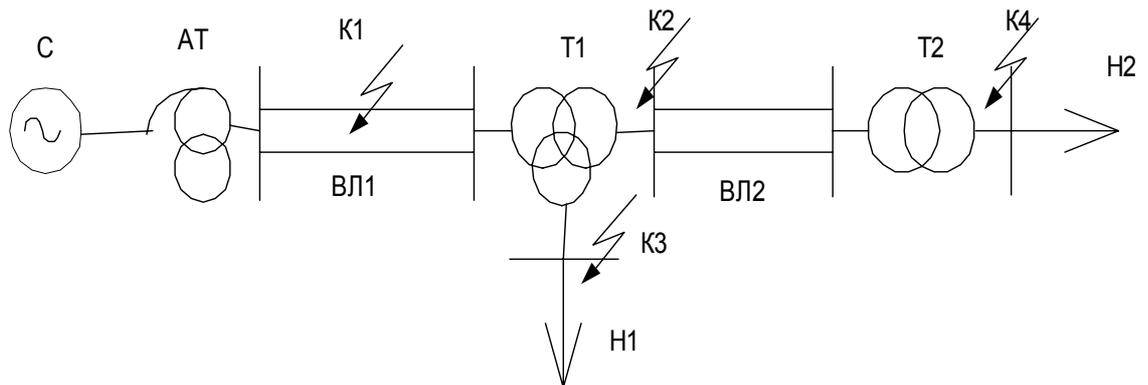


Рис.1

Таблица 1.

№вари	Точка	С	АТ	ВЛ	Т1	Т2	Н
-------	-------	---	----	----	----	----	---

		$S_k$	$S_{at}$	$U_{ном}$	$L_1$	$L_2$	$S$	$U_{ном}$	$S$	$U_{ном}$	$S_{H1}$	$S_{H2}$
		МВА	МВА	кВ	кМ	кМ	МВА	кВ	МВА	кВ	МВА	МВА
1	4	3000	125	500 235	20	18	100	230 115 10	45	110 11	25	10
2	3	2800	100	525 240	30	20	85	220 110 35	40	115 10.5	40	18
3	2	6000	150	525 230	50	15	100	221 121 10	63	115 11	35	20
4	1	5000	125	525 230	40	20	100	225 115 11	68	110 10.5	35	23
5	4	4000	125	330 220	60	25	85	220 121 11	45	115 10	40	25
6	3	3500	150	345 220	25	32	100	225 115 35	54	110 10.5	30	20
7	2	4500	200	340 235	35	22	100	221 110 36	54	115 11	45	15
8	1	3000	125	345 225	45	24	85	220 115 35	40	110 6.6	30	25
9	4	2000	125	330 220	55	30	85	225 115 10	45	110 11	25	25
10	3	2500	200	525 121	65	25	100	115 36 10	54	35 11	30	35
11	2	2800	200	230 115	25	15	100	110 35 6.6	58	35 6.3	24	35
12	1	3500	125	330 121	50	13	85	115 36 11	68	110 6.6	20	40

## *Тема 2. ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ*

### **Краткие теоретические сведения**

При аналитических расчетах токов КЗ исходные схемы замещения, в которых представлены различные элементы исходных расчетных схем, следует путем последовательных преобразований приводить к эквивалентным результирующим схемам замещения, содержащим эквивалентную ЭДС (в схемах прямой последовательности), эквивалентное результирующее сопротивление соответствующей последовательности и источник напряжения одноименной последовательности, а при трехфазном КЗ – точку КЗ. Если исходная схема замещения не содержит замкнутых контуров, то она легко преобразуется в эквивалентную результирующую схему путем последовательного и параллельного соединения элементов и путем замены нескольких

источников, имеющих разные ЭДС и разные сопротивления, но присоединенных в одной точке, одним эквивалентным источником.

В случае последовательного соединения элементов эквивалентное сопротивление находится по формуле

$$Z_{\text{ЭКВ}} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n, \quad (25)$$

при параллельном соединении

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)}, \quad (26)$$

где  $Y_1 = 1/Z_1$ ,  $Y_2 = 1/Z_2$ ,  $Y_n = 1/Z_n$ . – проводимости элементов.

При замене нескольких источников одним эквивалентным, его ЭДС определяется по формуле

$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{(Y_1 \cdot E_1 + Y_2 \cdot E_2 + \dots + Y_n \cdot E_n)}{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)} \quad (27)$$

При более сложных исходных схемах замещения для определения эквивалентного результирующего сопротивления следует использовать известные способы преобразования – такие как преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений:

$$Z_{01} = \frac{Z_{12} \cdot Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}},$$
$$Z_{02} = \frac{Z_{12} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}}, \quad (28)$$

$$Z_{03} = \frac{Z_{13} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}},$$

где  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$ ,  $Z_{03}$ - сопротивления эквивалентной звезды,

$Z_{12}$   $Z_{13}$   $Z_{23}$ - сопротивления сторон треугольника.

Обратное преобразование из звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник сопротивлений осуществляются следующим образом:

$$Z_{12} = Z_{01} + Z_{02} + \frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{03}},$$

$$Z_{13} = Z_{01} + Z_{03} + \frac{Z_{01} \cdot Z_{03}}{Z_{02}}, \quad (29)$$

$$Z_{23} = Z_{02} + Z_{03} + \frac{Z_{02} \cdot Z_{03}}{Z_{01}}$$

В тех случаях, когда исходная расчетная схема симметрична относительно точки КЗ или какая-либо ее часть симметрична относительно некоторой промежуточной точки, задачу определения эквивалентного результирующего сопротивления можно существенно облегчить путем соединения на исходной расчетной схеме (и соответственно на исходной схеме замещения) точек, имеющих одинаковые потенциалы, и исключения из схемы тех элементов, которые при КЗ оказываются обесточенными.

Если в исходной схеме замещения одним из лучей трехлучевой звезды сопротивлений является сопротивление источника энергии, то в ряде случаев целесообразно звезду сопротивлений заменить на треугольник и затем

последний разрезать по вершине, к которой приложена ЭДС, подключив при этом на каждом из оказавшихся свободными концами ветвей ту же ЭДС.

При расчете токов короткого замыкания в произвольный момент времени недопустимо преобразование нескольких источников в один эквивалентный, в данном случае схему замещения преобразуют таким образом, чтобы в ней остались ЭДС источников и сопротивления между ними и точкой КЗ. Для этого используют преобразования с помощью коэффициентов потокораспределения.

### Вопросы для самопроверки

1. Как осуществляется преобразование из звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник?
2. В каких случаях схему замещения можно разрезать по вершине?
3. Опишите преобразование с помощью коэффициентов потокораспределения. В каких случаях оно применяется?
4. С помощью каких формул осуществляется эквивалентирование сложных схем, содержащих несколько контуров?

### Пример 2.

Для схемы (рис.2) определить величины собственной реактивности относительно узла I взаимных реактивностей между этим узлом и узлами 2, 3, 4, 5, используя способ потокораспределения; те же величины – путем преобразования схемы, коэффициенты распределения и взаимные реактивности между точками 1, 2, 4, 5 (где имеются источники) и точкой 3 (где предполагается потенциал равный нулю).

$$\text{Данные : } x_{1*6} = 0,4; x_{2*6} = 0,5; x_{3*6} = 1,74; x_{4*6} = 1,5;$$
$$x_{5*6} = 0,79; x_{6*6} = 4,56;$$

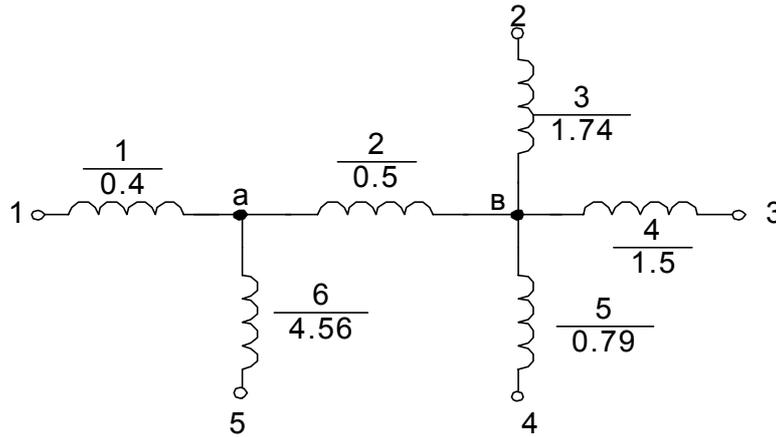


Рис. 2. Рассматриваемая схема к примеру 2.

А. Определим величины собственной реактивности относительно узла I и взаимных реактивностей между этим узлом и узлами 2, 3, 4, 5, используя способ потокораспределения.

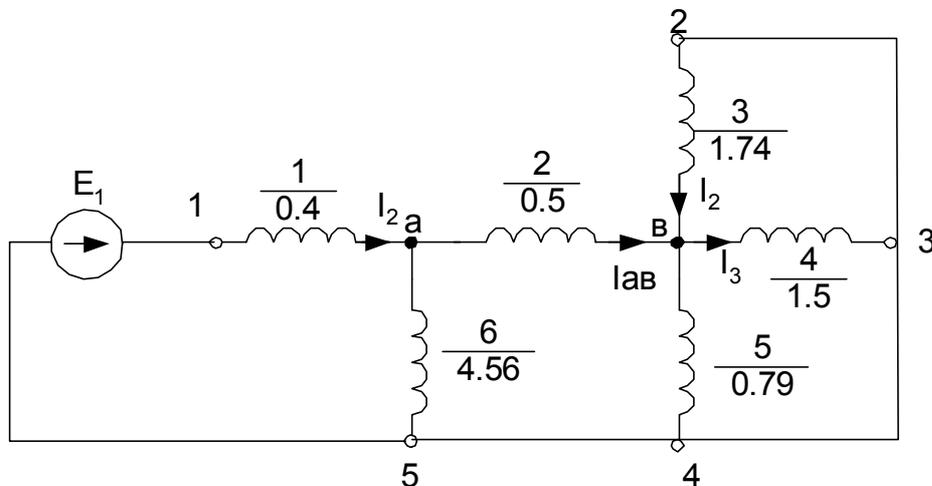


Рис.3. Схема замещения схемы рис.2.

Для решения поставленной задачи составляем схему замещения, считая что ЭДС приложена в точке I, все остальные точки схемы имеют равный потенциал (рис.3).

Принимаем  $I_{3*б}=1$ .

Определяем напряжение  $U_{в*б} = I_{3*б} \cdot x_{4*б} = 1 \cdot 1,5 = 1,5$ .

Определяем ток  $I_{2*б}$  и  $I_{4*б}$ :

$$I_{2*б} = \frac{U_{d*б}}{x_{3*б}} = \frac{1,5}{1,74} = 0,86 ;$$

$$I_{4*б} = \frac{U_{e*б}}{x_{5*б}} = \frac{1,5}{0,79} = 1,9$$

Определяем ток на участке ав согласно первому закону Кирхгофа:

$$I_{ав*б} = I_{3*б} + I_{2*б} + I_{4*б} = 1 + 0,86 + 1,9 = 3,76.$$

Определяем напряжение в точке а:

$$U_{а*б} = U_{в*б} + I_{ав*б} \cdot x_{2*б} = 1,5 + 3,76 \cdot 0,5 = 3,38.$$

Определяем ток  $I_{5*б}$ :

$$I_{3*б} = \frac{U_{а*б}}{x_{6*б}} = \frac{3,38}{4,56} = 0,74$$

Определяем ток  $I_{1*б}$  по закону Кирхгофа:

$$I_{1*б} = I_{5*б} + I_{ав*б} = 0,74 + 3,76 = 4,5.$$

Определяем величину ЭДС, приложенной к точке 1.

$$E_{1*б} = 3,38 + 4,5 \cdot 0,4 = 5,2.$$

Определяем искомые реактивности

$$x_{11*б} = \frac{E_{1*б}}{I_{1*б}} = \frac{5,2}{4,5} = 1,15 ,$$

$$x_{12*б} = \frac{E_{1*б}}{I_{2*б}} = \frac{5,2}{0,86} = 6,05 ,$$

$$x_{13*б} = \frac{E_{1*б}}{I_{3*б}} = \frac{5,2}{1} = 5,2 ,$$

$$x_{14*б} = \frac{E_{1*б}}{I_{4*б}} = \frac{5,2}{1,9} = 2,74 ,$$

$$x_{15*б} = \frac{E_{1*б}}{I_{5*б}} = \frac{5,2}{0,7} = 7 .$$

Проверяем полученные результаты  $x_{11} = x_{12} \mid x_{13} \mid x_{14} \mid x_{15}$ ;

$$1/x_{11} = 1/x_{12} + 1/x_{13} + 1/x_{14} = 1/6,05 + 1/6,05 + 1/5,2 + 1/2,74 + 1/7 = 0,869$$

$$x_{11} = \frac{1}{0,869} = 1,15$$

Б. Определяем те же величины путем преобразования схемы.

Преобразуем исходную схему (рис.3) к виду (рис.4), т.е. звезду с лучами  $I_{1*б}, I_{2*б}, I_{6*б}$  преобразуем в треугольник  $I_{z*б} I_{в*б} I_{9*б}$ .

Определим сопротивления в преобразованной схеме:

$$x_{7*б} = x_{1*б} + x_{2*б} + \frac{x_{1*б} \cdot x_{2*б}}{x_{6*б}} = 0,4 + 0,5 + \frac{0,4 \cdot 0,5}{4,56} = 0,94$$

$$x_{8*б} = x_{1*б} + x_{6*б} + \frac{x_{1*б} \cdot x_{6*б}}{x_{2*б}} = 0,4 + 4,56 + \frac{0,4 \cdot 4,56}{0,4} = 8,61$$

Преобразуем схему (рис.4) к виду (рис.5), т.е. пятилучевую звезду  $X_{7*б}, X_{9*б}, X_{3*б}, X_{6*б}, X_{4*б}$  преобразуем в полный многоугольник с вершинами 1, 2, 3, 4, 5. В данном многоугольнике определяем только взаимные реактивности, требуемые по условию задачи: а именно  $X_{12*б}, X_{13*б}, X_{14*б}, X_{15*б}$ .

Определяем суммарную проводимость всех лучей звезды:

$$\sum Y_{*б} = 1/x_{7*б} + 1/x_{9*б} + 1/x_{3*б} + 1/x_{4*б} = 1/0,94 + 1/10,76 + 1/1,74 + 1/0,79 + 1/1,5 = 3,66.$$

Находим искомые реактивности:

$$x_{12*б} = x_{7*б} \cdot x_{3*б} \cdot \sum Y_{*б} = 0,94 \cdot 1,76 \cdot 3,66 = 6,05,$$

$$x_{13*б} = x_{7*б} \cdot x_{4*б} \cdot \sum Y_{*б} = 0,94 \cdot 1,5 \cdot 3,66 = 5,2,$$

$$x_{14*б} = x_{7*б} \cdot x_{5*б} \cdot \sum Y_{*б} = 0,94 \cdot 0,79 \cdot 3,66 = 2,74,$$

$$x_{15*б} = x_{7*б} \cdot x_{9*б} \cdot \sum Y_{*б} = 0,94 \cdot 10,76 \cdot 3,66 = 37,02,$$

$$x_{15*б} = \frac{x_{15*б} \cdot x_{8*б}}{x_{15*б} + x_{8*б}} = \frac{37,02 \cdot 8,61}{37,02 + 8,61} = 7;$$

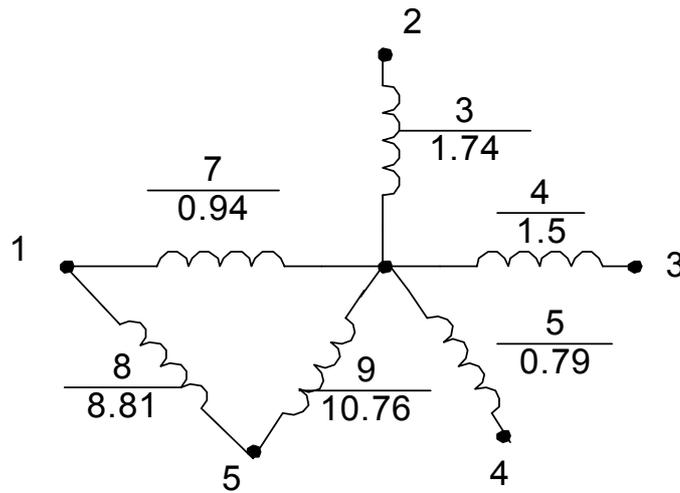


Рис.4. Преобразование схемы рис.3.

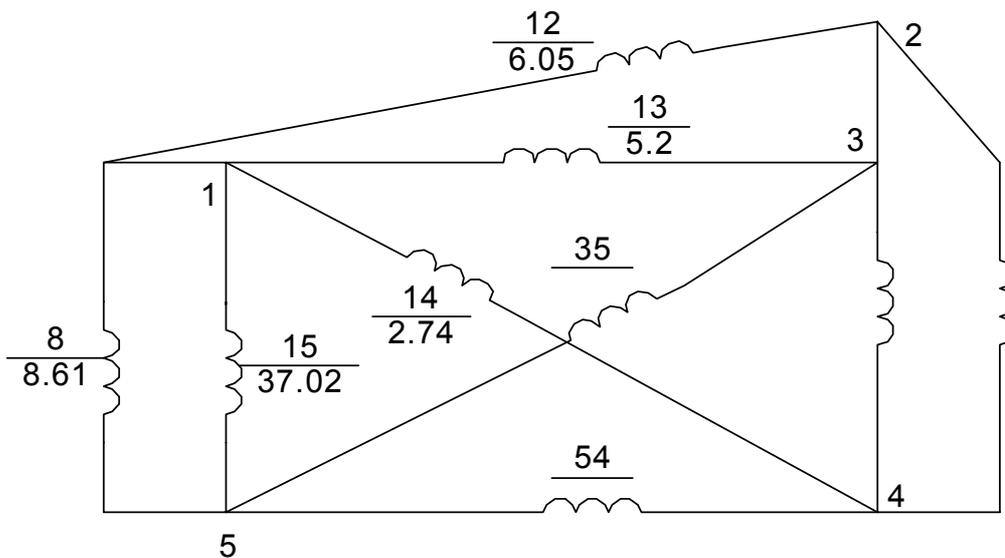


Рис.5. Преобразование схемы рис.4.

$$x_{11*6} = x_{12} | x_{13} | x_{14} | x_{15} = 1,15;$$

Сравнивая результаты по п.п. и а и б, видим, что в обоих случаях результаты практически совпадают.

В. Определим коэффициенты распределения и взаимные реактивности между точками 1, 2, 3, 4, 5 и точкой 3.

Определим результирующую реактивность схемы:

$$x_{3*6} = x_{2*6} + \frac{x_{1*6} \cdot x_{6*6}}{x_{1*6} + x_{6*6}} + \frac{1}{\frac{1}{x_{3*6}} + \frac{1}{x_{4*6}} + \frac{1}{x_{5*6}}} = 0,5 + \frac{0,4 \cdot 4,56}{0,4 + 4,56} + \frac{1}{\frac{1}{1,74} + \frac{1}{1,5} + \frac{1}{0,79}} = 1,83.$$

Принимаем  $I_{3*6} = c_3 = 1$ .

Определяем остальные коэффициенты распределения:

$$x_{10*6} = x_{12} | x_{13} | x_{14} | x_{15} = 1,15$$

$$C_2 = C_3 \cdot \frac{x_{10*6}}{x_{3*6}} = 1 \cdot \frac{0,335}{1,74} = 0,193$$

$$C_4 = C_3 \cdot \frac{x_{10*6}}{x_{5*6}} = 1 \cdot \frac{0,335}{0,79} = 0,424$$

$$C_1 + C_3 = C_3 \cdot \frac{x_{10*6}}{x_{2*6} \cdot \frac{x_{1*6} \cdot x_{8*6}}{x_{1*6} + x_{8*6}}} = 1 \cdot \frac{0,335}{0,87} = 0,383;$$

или

$$C_1 + C_5 = C_3 - C_2 - C_4 = 1 - 0,193 - 0,424 = 0,383,$$

$$C_1 = (C_1 + C_5) \cdot \frac{x_{1*6} \cdot x_{6*6}}{x_{1*6}} = 0,383 \cdot \frac{0,37}{0,4} = 0,354,$$

$$C_5 = 0,383 - 0,354 = 0,029.$$

Определяем искомые реактивности:

$$x_{13*6} = \frac{E_{3*6}}{C_1} = \frac{1,835}{0,354} = 5,2,$$

$$x_{2,3*6} = \frac{E_{3*6}}{C_2} = \frac{1,835}{0,193} = 9,55,$$

$$x_{43*б} = \frac{E_{9*б}}{C_4} = \frac{1,835}{0,424} = 4,34$$

$$x_{53*б} = \frac{E_{9*б}}{C_5} = \frac{1,835}{0,029} = 63,3$$

### **Задание для самостоятельной работы**

Эквивалентировать схемы рис. 6 (а-к) для двух случаев: а – определение токов в произвольный момент времени; б – нахождение токов в начальный момент КЗ.

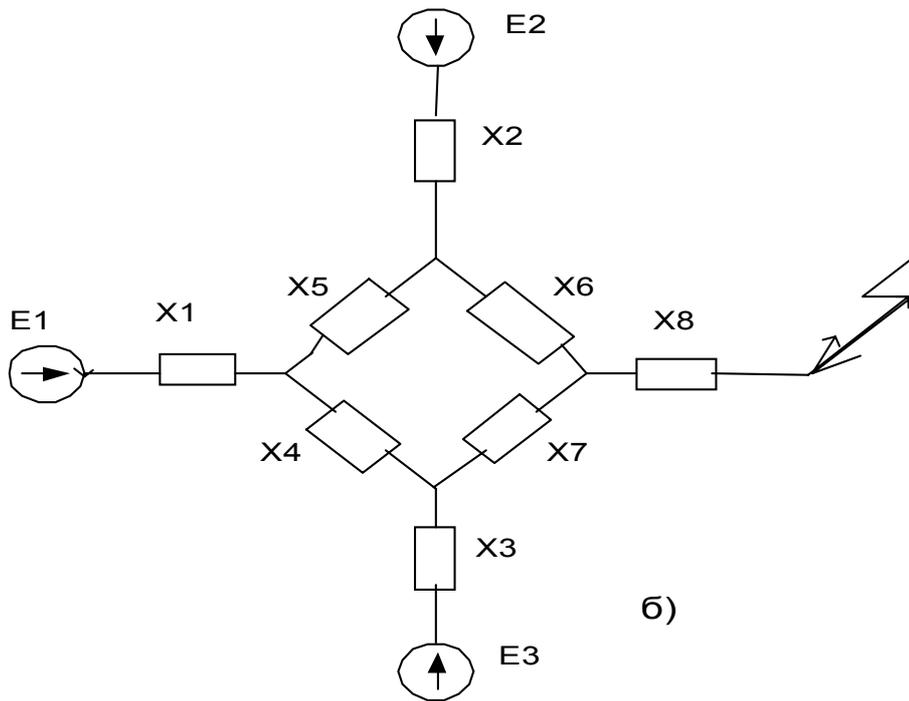
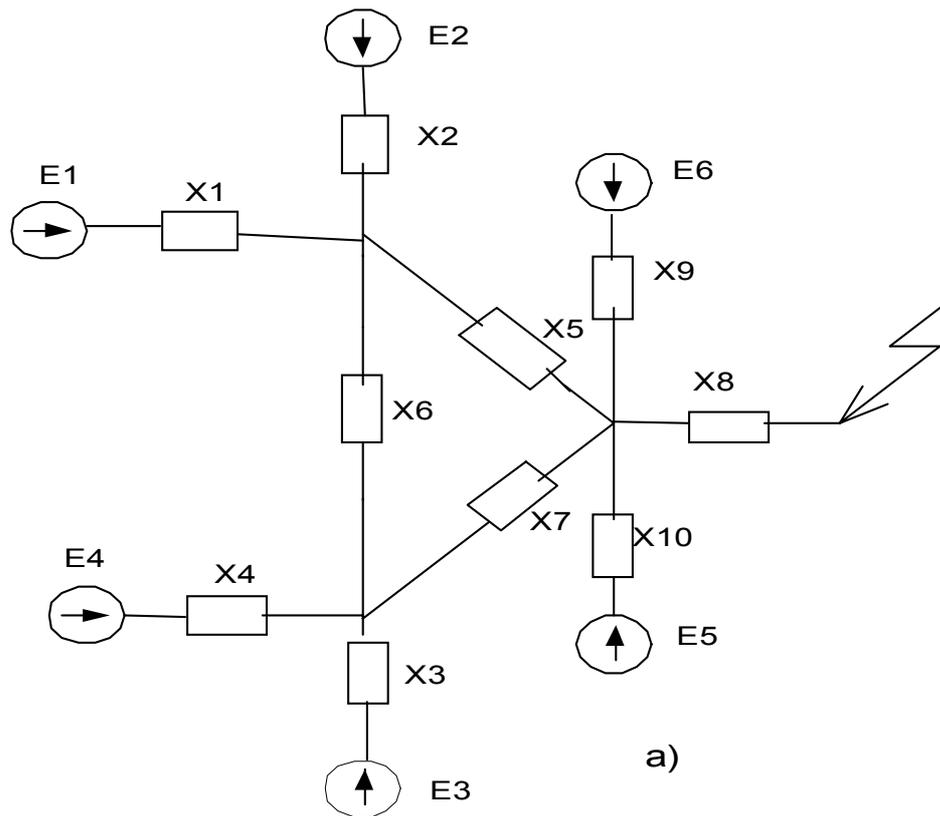


Рис 6,а,б.

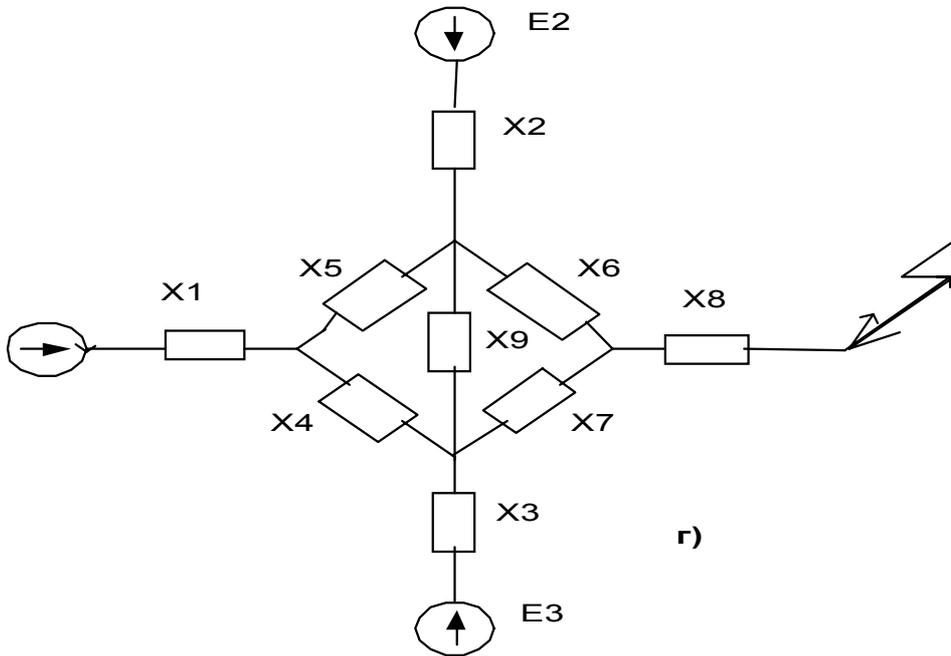
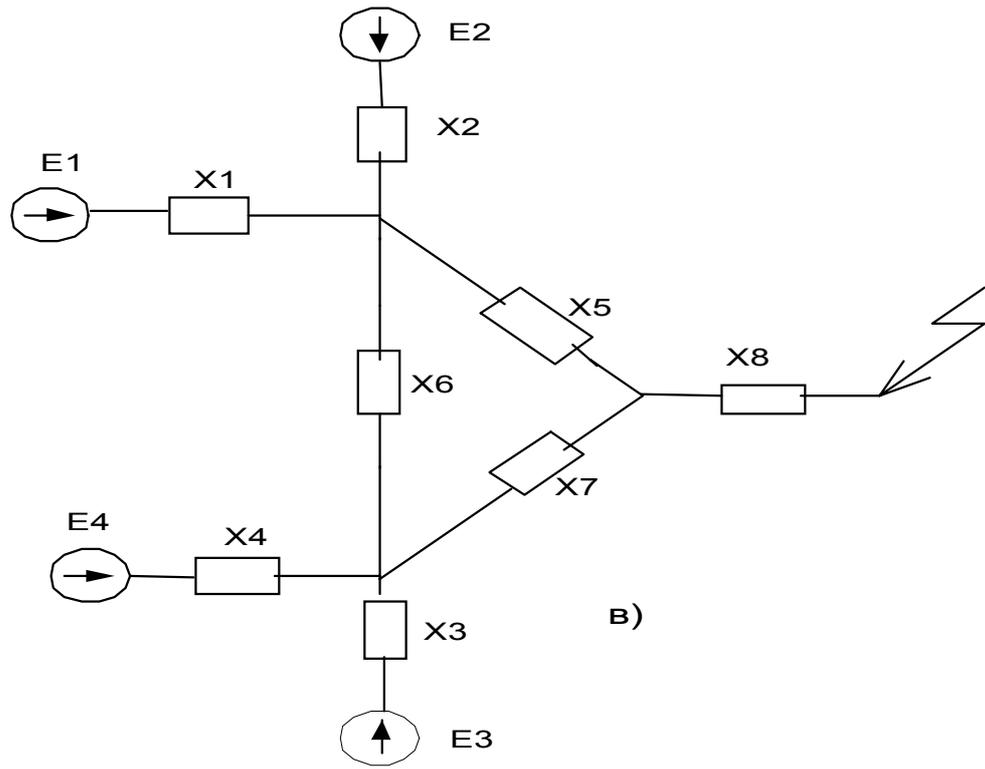
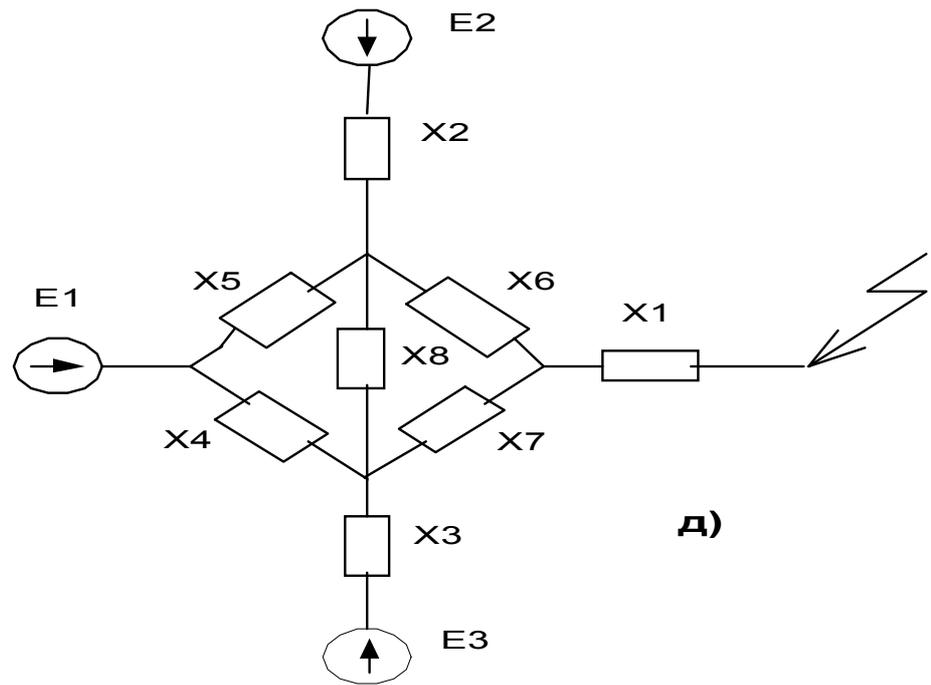
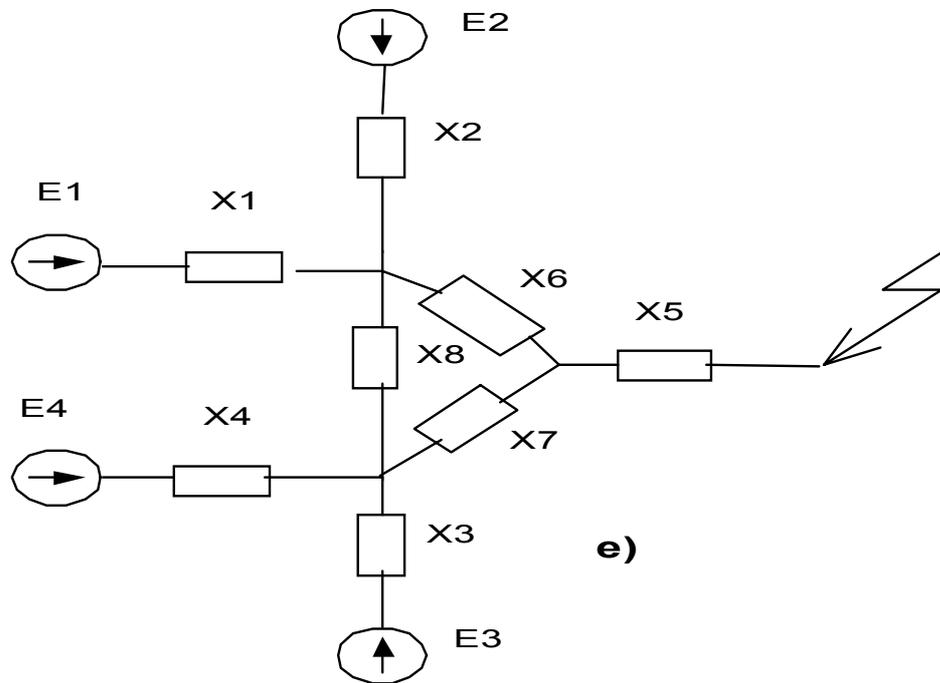


Рис 6,В,Г.

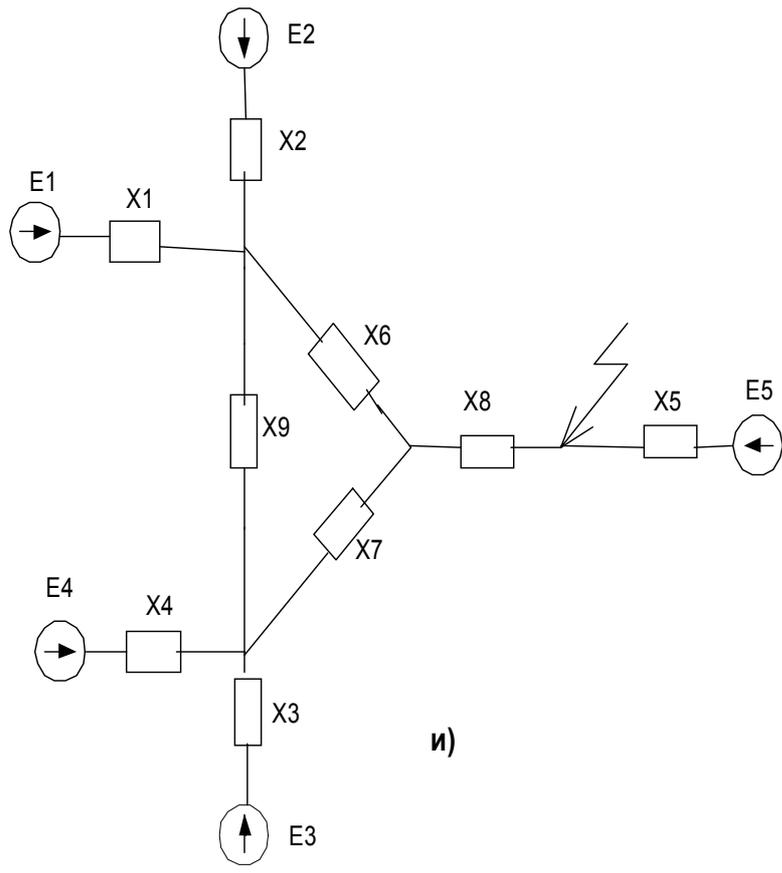


**д)**

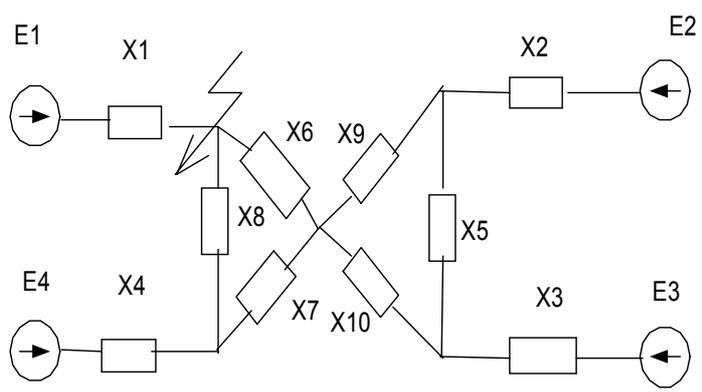


**е)**

Рис б.д,е.



и)



к)

Рис 6,и,к..

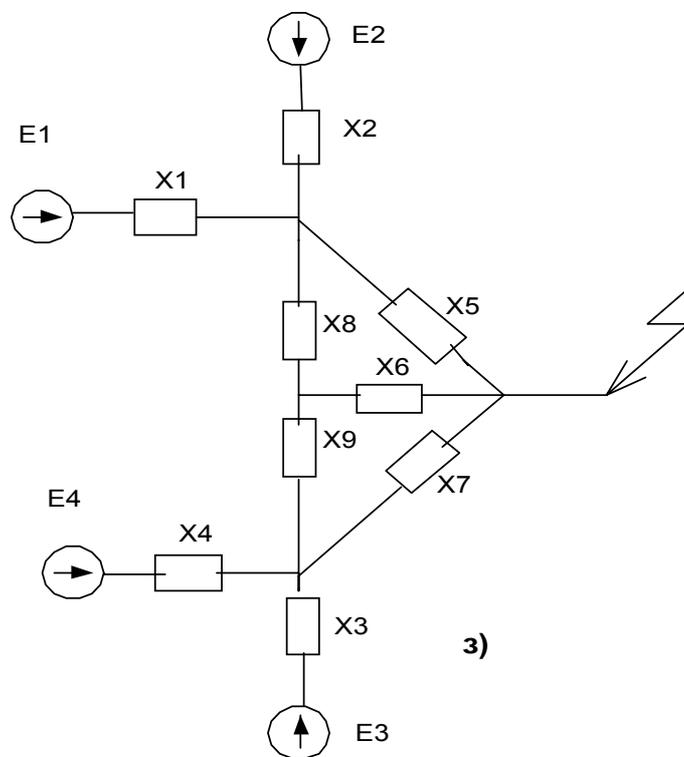
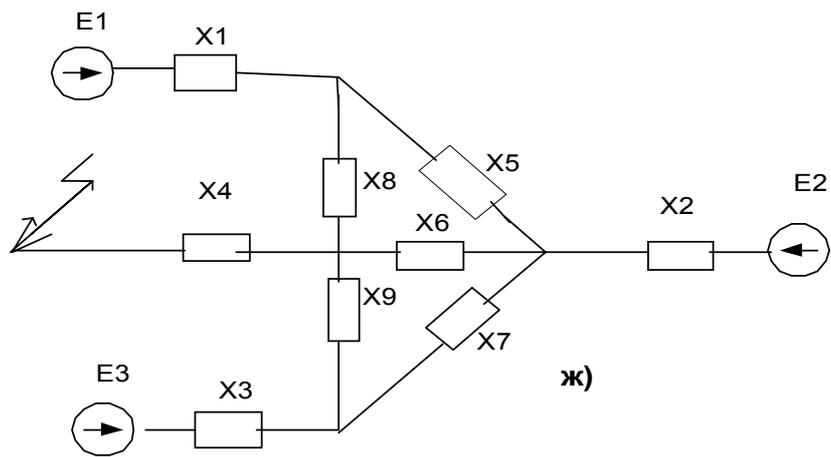


Рис.6,ж,з.

### **Тема 3. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В ПРОСТЕЙШЕЙ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ**

1. Процесс трехфазного КЗ в неразветвленной цепи. Кривые изменения тока и ее слагающие. Условия, определяющие максимальное значение апериодической слагающей тока.

Литература: /1/, § 3.1, §3.2, с. 58-64; /7/, § 4.1, с.57-61.

2. Условия возникновения максимума мгновенного значения полного тока. Ударный ток и ударный коэффициент.

Литература: /1/, § 3.2, с. 64 –65; /7/, § 4.1, с. 60-61, § 5.1, с.71-74, пример 5.2, с.76-78.

3. Расчет апериодической слагающей тока в случае применения системы относительных единиц.

Литература: /1/, § 3.1, §3.2, с. 58-64; /7/, § 4.1, с.57-61.

4. Условия возникновения максимума мгновенного значения полного тока. Ударный ток и ударный коэффициент.

Литература: /1/, § 3.2, с. 64 –65; /7/, § 4.1, с. 60-61, § 5.1, с.71-74, пример 5.2, с.76-78.

5. Определение эквивалентной постоянной времени апериодической составляющей тока в разветвленной схеме.

Литература: /1/, § 3.5, с. 70 -71.

6. Действующие значения полных величин и их отдельных слагающих.

Литература: /1/.§3.3,с.65-68.

7. Переходные процессы в неподвижных магнитосвязанных цепях. Общие замечания. Основные уравнения. Короткое замыкание трансформатора.

Литература: /1 /, § 4.1, 4.2. 4.5, с. 74 -79,84-89.

#### **Краткие теоретические сведения**

Для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока трёхфазного КЗ в электроустановках свыше 1 кВ в исходную схему вводятся все генераторы и компенсаторы, а также СД и АД мощностью 100 кВт и более, если между ними и точкой КЗ отсутствуют токоограничивающие реакторы и силовые трансформаторы. Синхронные и асинхронные машины в эквивалентную схему замещения вводятся сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС.

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

$$E''_{|0|} = \sqrt{\left(U_{|0|} \pm I_{|0|} X''_d \sin \varphi_{|0|}\right)^2 + \left(I_{|0|} X''_d \cos \varphi_{|0|}\right)^2}, \quad (30)$$

где  $U_{|0|}$ ,  $I_{|0|}$ ,  $\cos \varphi_{|0|}$  – напряжение на выводах машины, ток статора и коэффициент мощности в момент, предшествующий КЗ.

Для синхронных компенсаторов ЭДС определяется как

$$E''_{|0|} = U_{|0|} \pm I_{|0|} X''_d. \quad (31)$$

В приведённых формулах (30,31) знак  $\langle + \rangle$  относится к синхронным машинам, работавшим к моменту КЗ в режиме перевозбуждения, а знак  $\langle - \rangle$  – к работавшим с недовозбуждением.

Сверхпереходная ЭДС асинхронных двигателей определяется по формуле

$$E''_{|0|} = \sqrt{\left(U_{|0|} - I_{|0|} X''_{АД} \sin \varphi_{|0|}\right)^2 + \left(I_{|0|} X''_{АД} \cos \varphi_{|0|}\right)^2}, \quad (32)$$

где  $X''_{АД}$  – сверхпереходное сопротивление по продольной оси АД.

В относительных единицах ток статора для генераторов и электродвигателей определяется по формуле

$$I_{*|0|ном} = \frac{P_{|0|} \cos \varphi_{ном}}{P_{ном} \cos \varphi_{|0|}} , \quad (33)$$

где  $P_{|0|}$ ,  $P_{ном}$ ,  $\cos \varphi_{ном}$  – мощность машины в предшествующем КЗ режиме, номинальные мощность и коэффициент мощности синхронной машины;

для синхронных компенсаторов

$$I_{*|0|ном} = \frac{Q_{|0|}}{Q_{ном}} . \quad (34)$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ находится как

$$I_{по} = \frac{E''_{экв}}{X_{экв}} = \frac{E''_{*экв}}{X_{*экв}} I_б , \quad (35)$$

где  $E''_{экв}$ ,  $X_{экв}$  – результирующая эквивалентная ЭДС и результирующее эквивалентное сопротивление относительно расчётной точки КЗ.

Значение ударного тока определяется по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{по} K_{уд} , \quad (36)$$

где  $K_{уд}$  - ударный коэффициент, который можно найти по формуле

$$K_{уд} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X_{экв}/R_{экв}}} \quad (37)$$

где  $R_{\text{экв}}$  - результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения, составленной из одних активных сопротивлений относительно точки КЗ.

В тех случаях, когда  $X_{\text{экв}}/R_{\text{экв}} \geq 5$ , ударный коэффициент допустимо определять по формуле

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \quad (38)$$

где  $T_a$  - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ. Она определяется по формуле

$$T_a = \frac{X_{\text{экв}}}{\omega_c R_{\text{экв}}} \quad (39)$$

где  $\omega_c$  - синхронная угловая частота напряжения сети.

### Вопросы для самопроверки

1. Из каких слагающих состоит кривая изменения тока при внезапном КЗ в неразветвленной цепи, питаемой от источника бесконечной мощности? Как они изменяются во времени?

2. Какое влияние оказывает предшествующий ток на величину апериодической слагающей тока КЗ, какого максимального значения может достигать последняя?

3. Что называется фазой включения? При какой фазе включения и в какой момент времени после возникновения КЗ наступает максимум мгновенного значения полного тока ?

4. Что называется ударным током КЗ и какие упрощающие условия принимают при его определении?

5. Что понимается под эквивалентной постоянной времени  $T_{a-э}$  и как
6. практически можно оценить ее значение?
7. Что показывает ударный коэффициент и каковы пределы его изменений?
8. Какие упрощения принимают при определении действующих значений полных величин отдельных слагающих тока КЗ?
9. Как обосновать, что при расчетах токов КЗ контуром намагничивания трансформаторов нужно пренебречь?

### Пример 3.1.

Считая напряжение на шинах схемы (рис.7) неизменным и равным 6,3кВ, определить наибольшее допустимое число кабельных линий, которые могут включены параллельно, чтобы ударный ток при КЗ в точке К не превышал 20кА. Параметры каждой линии: реактор – 6 кВ; 200 А;  $x = 4\%$ ;  $\Delta P_k = 1,68 \text{ кВт/фазу}$ ; кабель – 1250 м;  $x = 0.083 \text{ Ом/км}$ ;  $r = 0.37 \text{ Ом/км}$ .

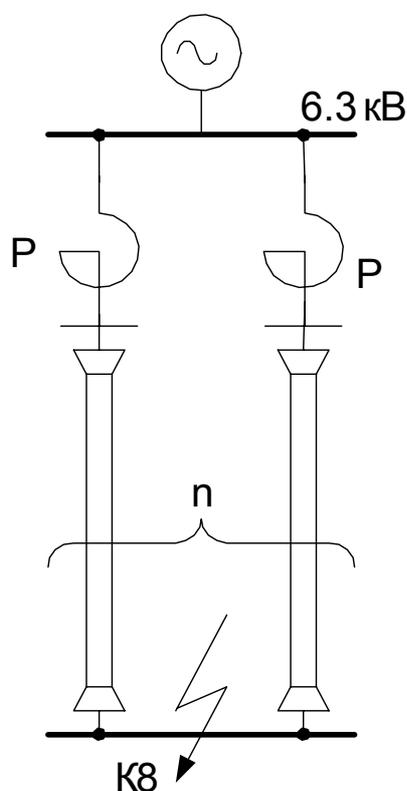


Рис. 7. Схема к примеру 3.1.

В этой задаче необходимо определить значение ударного тока при КЗ в конце кабельной линии.

Расчет ведем в системе именованных единиц.

Определяем сопротивление элементов цепи:

а) реактор

$$x_p = \frac{x_p \%}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = 0.04 \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0.2} = 0.695 \text{ Ом},$$

$$r_p = \frac{\Delta P_k}{I_n^2} = \frac{1680}{200^2} = 0.042 \text{ Ом};$$

б) кабель

$$x_k = x_0 \cdot l = 0.083 \cdot 1.25 = 0.104 \text{ Ом},$$

$$r_k = r_0 \cdot l = 0.37 \cdot 1.25 = 0.463 \text{ Ом}.$$

Определяем сопротивление кабельной линии:

$$x_l = x_p + x_k = 0.695 + 0.104 = 0.799 \text{ Ом},$$

$$r_l = r_p + r_k = 0.042 + 0.463 = 0.505 \text{ Ом},$$

$$x_l = \sqrt{z_l^2 - r_l^2} = 0.95.$$

3. Определяем постоянную времени периодической составляющей тока КЗ

$$Ta = \frac{\omega_l}{\omega \cdot r_l} = \frac{0.799}{314 \cdot 0.505} = 0.00506 \text{ с}.$$

4. Определяем значение ударного коэффициента

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{Ta}} = 1 + e^{-\frac{0.01}{0.00506}} = 1.14$$

5. Определяем допустимую величину периодической составляющей тока КЗ ( $i_y = 20 \text{ кА}$ )

$$I_n = \frac{i_y}{\sqrt{2} \cdot k_y} = \frac{20}{\sqrt{2} \cdot 1.14} = 12.4 \text{ кА}.$$

6. Определяем наименьшее результирующее сопротивление относительно точки К, чтобы ток КЗ не превышал 20кА.

$$z_{\Sigma} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = \frac{6.3}{\sqrt{3} \cdot 12.4} = 0.293 \text{ Ом}.$$

Определяем наибольшее допустимое число кабельных линий, включаемых параллельно:

$$n = \frac{z_{\text{л}}}{z_{\Sigma}} = \frac{0,95}{0293} = 3,2$$

### Пример 3.2.

Определить в относительных единицах действующее значение ударного сверхпереходного тока  $I''_{уд}$  при к.з. в точке К схемы (рис.8), пренебрегая влиянием приемников. Генераторы однотипны; в предшествующем режиме они работали с номинальной нагрузкой при  $\text{Cos}\varphi = 0,8$

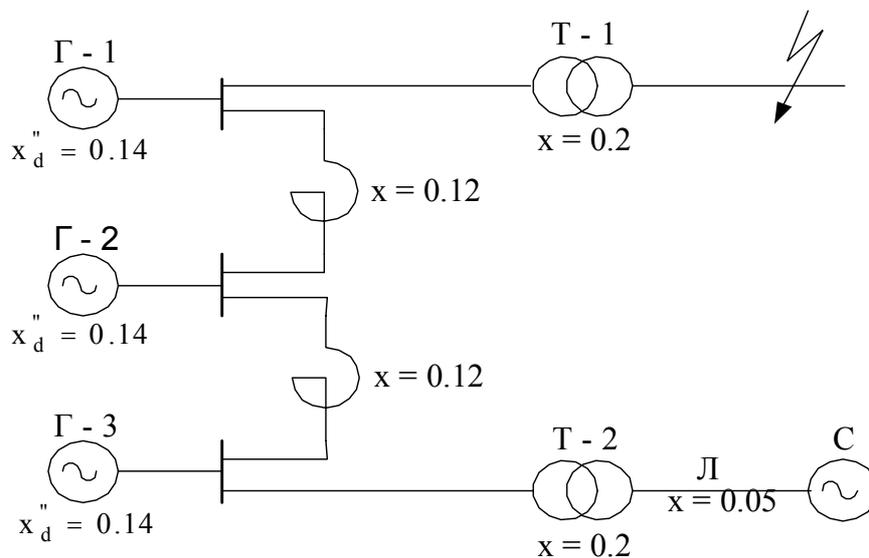


Рис.8. Схема к примеру 3.2.

Указанные на рис. 8 относительные реактивности элементов приведены к номинальным мощностям и напряжению генератора. Расчет ведем в системе

о.е. За базисные условия принимаем номинальные мощность и напряжение генераторов.

Составляем схему замещения (рис.9).

Определяем сверхпереходные э.д.с. генераторов:

$$E''_{d2} = E''_{d3*6} = \sqrt{(U_{н*6} \cdot \cos\varphi)^2 + (U_{н*6} \cdot \sin\varphi + I_{н*6} \cdot x''_{d*6})^2} = 1,09.$$

Эквивалентуем схему замещения (рис.10,а,б):

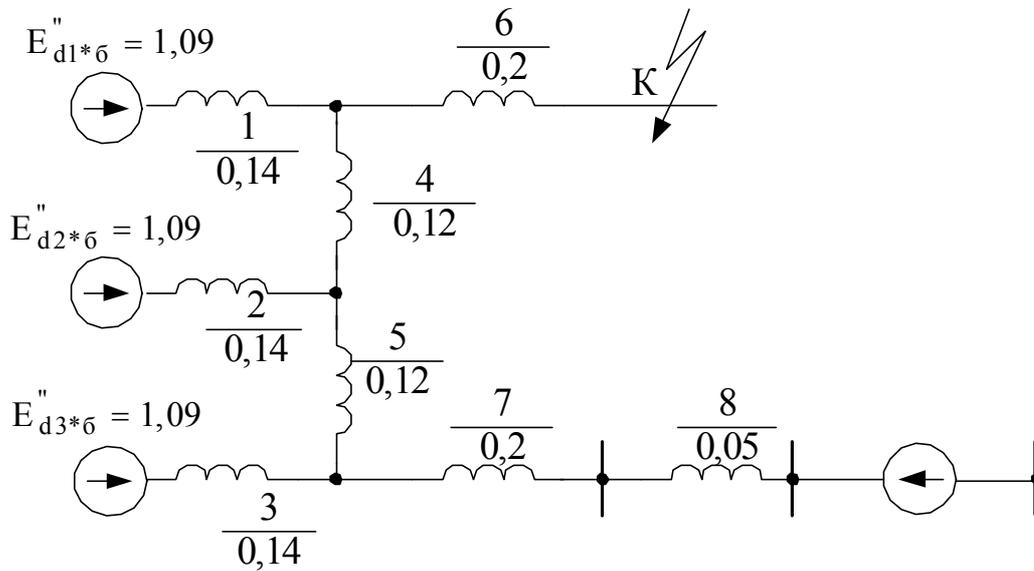


Рис. 9. Схема замещения к примеру 3.2.

$$x_{9*6} = \frac{x_{3*6}(x_{7*6} + x_{8*6})}{x_{3*6} + x_{7*6} + x_{8*6}} + x_{5*6} = \frac{0,14 \cdot (0,2 + 0,05)}{0,14 + 0,2 + 0,05} + 0,12 = 0,2097;$$

$$E''_{2*6} = \frac{E''_{d3*6}(x_{7*6} + x_{8*6}) + U_{*6} \cdot x_{3*6}}{x_{3*6} + x_{7*6} + x_{8*6}} = 1,0577;$$

$$E''_{3*6} = \frac{E''_{2*6} \cdot x_{2*6} + E''_{d2*6} \cdot x_{9*6}}{x_{9*6} + x_{2*6}} = 1,077;$$

$$x_{10*6} = \frac{x_{9*6} \cdot x_{2*6}}{x_{9*6} + x_{2*6}} + x_{4*6} = \frac{0,2097 \cdot 0,14}{0,2097 + 0,14} + 0,12 = 0,2035;$$

$$x_{11*6} = \frac{x_{10*6} \cdot x_{1*6}}{x_{10*6} + x_{1*6}} + x_{6*6} = \frac{0,14 + 0,2035}{0,14 + 0,2035} + 0,2 = 0,283;$$

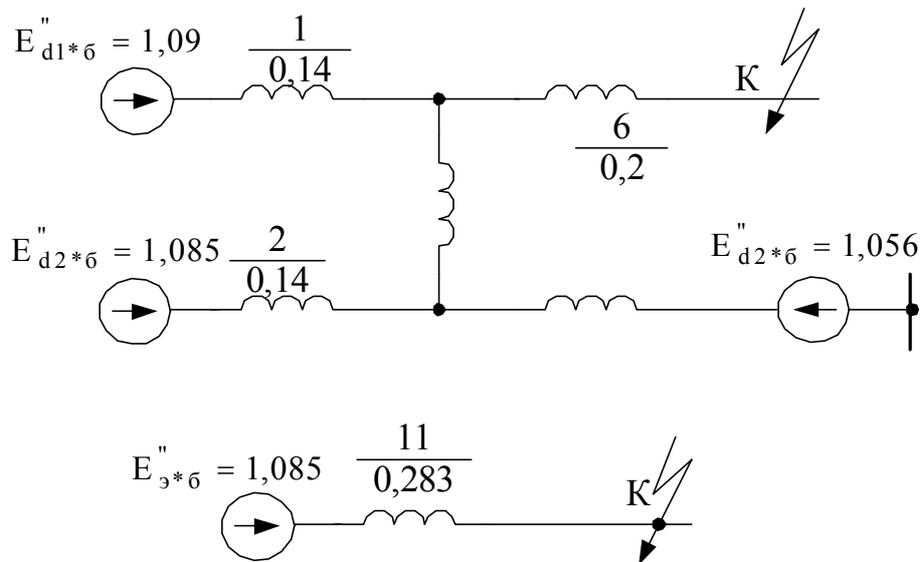


Рис. 10. Эквивалентирование схемы замещения рис 9.

$$E''_{3*6} = \frac{E''_{3*6} \cdot x_{1*6} + E''_{d1*6}}{x_{10*6} + x_{1*6}} = 1,085;$$

Определяем действующее значение сверхпереходного тока в месте КЗ

$$I''_K = \frac{E''_{3*6}}{x_{3*6}} = \frac{1,085}{0,283} = 3,834$$

Определяем действующее значение ударного сверхпереходного тока:

$$I''_y = I_K \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 3,834 \cdot \sqrt{1 + (1,8 - 1)^2} = 5,789.$$

Ударный коэффициент  $K_y$  при расчете высоковольтных сетей обычно принимается равный 1.8.

#### Задание для самостоятельной работы

Определить ударный ток при трехфазном КЗ в заданной точке исходной схемы сети, изображенной на рис. 11.  $X_{уд}=0,4$  Ом/км,  $U_K$  как в задании 2,  $S_{н1,2}=30$  МВА.

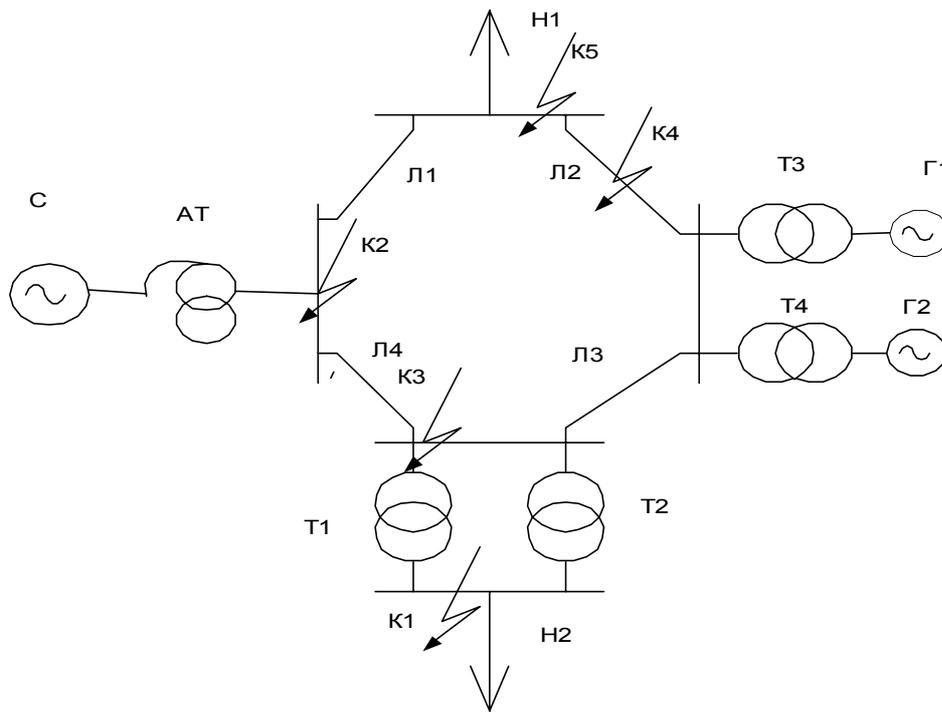


рис.11.

Данные элементов схемы рис. 11

Таблица 2.

№ варианта	Точка КЗ	Генераторы 1,2			Автотрансформатор		Тр-ры 1,2,3,4		ВЛ	С
		$S_H$	$\cos\varphi$	$x''d$	$S_H$	$U_{НОМ}$	$S_H$	$U_{НОМ}$	l	$X_c$
		МВА	о.е	о.е	МВА	кВ	МВА	кВ	км	Ом
1	1	235	0,85	0.19	240	230 115 15.75	90	115 10.5	30 10 15 25	26
2	2	111	0,8	0.22	120	230 115 13.80	60	115 10.5	45 20 25 30	35
3	3	166	0,85	0.12	180	230 115 18.00	75	115 6.3	40 35 20 45	22
4	4	117	0,8	0.18	120	230 115 10.50	40	115 6.3	50 25 45 30	40
5	5	171	0,85	0.21	80	230 115 13.80	40	115 10.5	65 50 25 30	37
6	1	353	0,8	0.20	360	230 115 20.00	20	115 10.5	60 45 35 20	15
7	2	264	0,8	0.24	300	230 115 15.75	90	115 6.3	40 25 36 46	18
8	3	176	0,85	0.21	180	230 115 18.00	80	115 6.3	55 40 25 15	13
9	4	587	0,8	0.23	600	500 230 20.00	55	230 10.5	80 25 38 45	28
10	5	100	0,8	0,21	580	525 230 115	95	225 17,5	30 40 25 50	25

## **Тема 4. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

1. Определение установившегося режима КЗ. Основные характеристики и параметры синхронной машины.

Литература /1/. § 5.2, с. 91 – 95; /7/, § 4.6, с.69-71.

2. Схема замещения неявнополюсной машины в установившемся режиме. Векторные диаграммы неявнополюсных и явнополюсных синхронных машин. Приведение цепи ротора к статору. Влияние явнополюсности ротора генератора.

Литература /1/, § 5.2, с. 95 -98; /7/, § 4.6, с.69-71.

3. Влияние и учет нагрузки.

Литература /1 /, § 5.4, с. 99- 101.

4. Расчет при отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Влияние АРВ.

Литература /1/, §§ 5.5, 5.6. с. 102 – 106.

5. Расчет тока в произвольный момент времени.

Для успешного освоения материала данной темы, а также последующего материала следует по одному из учебников, рекомендуемых в курсе "электрические машины", повторить разделы, посвященные синхронным и асинхронным машинам.

### **Краткие теоретические сведения**

Для нахождения действующего значения периодического тока короткого замыкания в произвольный момент времени при приближенных расчетах токов КЗ при радиальной расчетной схеме следует применять метод типовых кривых. Он основан на использовании кривых изменения во времени отношения действующих значений периодической составляющей тока КЗ от генератора в произвольный и начальный моменты времени, т.е.  $\gamma t = I_{\Pi t} / I_{\Pi 0} = f(t)$ , построенных для разной удаленности точки КЗ. При этом электрическая удаленность точки

КЗ от синхронной машины характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент КЗ к его номинальному току, т.е.

$$I_{*no(ном)} = \frac{I_{no}}{I_{ном}} = I_{*no(б)} \frac{S_{б}}{S_{ном}}, \quad (40)$$

где  $I_{*no}^*$  – начальное значение периодической составляющей тока КЗ от машины в относительных единицах при выбранных базисных условиях;

$S_{б}$  - базисная мощность, МВ-А;

$S_{ном}$  - номинальная мощность (полная) синхронной машины, МВ-А

Типовые кривые учитывают изменение действующего значения периодической составляющей тока КЗ, если отношение короткого замыкания равно или больше двух. При меньших значениях ОКЗ следует считать, что действующее значение периодической составляющей тока КЗ не изменяется во времени, т.е.  $I_{Пт} = I_{П0} = \text{const}$ .

Расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени производится в следующем порядке:

1) по исходной расчетной схеме составить схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока КЗ.

2) с помощью эквивалентных преобразований привести схему замещения к простейшему виду.

3) определить действующие значения токов КЗ от каждого источника.

4) рассчитать ОКЗ, характеризующие удаленность точки КЗ от каждого источника, по формуле (40).

5) исходя из типа генератора или нагрузки выбрать соответствующие типовые кривые и по найденному значению ОКЗ определить для заданного момента времени коэффициенты  $\gamma_t$ .

6) определить искомое значение периодической составляющей тока КЗ в заданный момент времени от источников по формуле:

$$I_{\text{пт}} = \gamma_t I_{\text{по(б)}}^* I_{\text{б}} \quad (41)$$

7) определить суммарное значение периодической составляющей тока КЗ в заданный момент времени как сумму соответствующих токов от всех источников.

В случае, если расчетная продолжительность короткого замыкания превышает 0,5с допускается линейная экстраполяция графика типовых кривых.

### Вопросы для самопроверки

1. Как определить установившийся ток генератора при КЗ на его выводах, если известны номинальные данные генератора, относительный ток возбуждения и ОКЗ?

2. Какое влияние на режим КЗ оказывает нагрузка ? Как она учитывается в расчетах?

3. Что называется отношением короткого замыкания (ОКЗ) и как оно связано с реактивностью генератора?

4. В чем проявляется действие АРВ в установившемся режиме КЗ?

5. Какие режимы генераторов при наличии АРВ возможны в установившемся режиме КЗ? Чем они характеризуются?

#### Пример 4.

Определить значение периодической составляющей тока через 0,2с после момента трехфазного КЗ за блоком генератор-трансформатор.

Параметры генератора типа ТВФ-110-2ЕУЗ:  $P_{\text{ном}}=110\text{т МВт}$ ,  $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,8$ ,  $U_{\text{ном}}=10,5\text{ кВ}$ ,  $X_d'' = 0.189$ ; до КЗ генератор работал с номинальной нагрузкой. Параметры трансформатора типа ТДЦ-125000/110:  $U_k=10.5\%$ ,  $k_T=115/10.5\text{ кВ}$ .

Расчет проведем в относительных единицах при следующих базисных условиях:  $S_{\sigma}=137,5$  МВА, базисные напряжения со стороны обмоток высокого и низкого напряжения трансформатора  $U_{\text{БВ}}=115$  кВ,  $U_{\text{БН}}=10,5$  кВ, базисный ток со стороны обмоток высокого напряжения

$$I_{\sigma\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma\sigma}} = \frac{137,5}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,69 \text{ кА,}$$

ЭДС генератора по формуле

$$E_{*0(\sigma)}'' = \sqrt{(1 + 1 \cdot 0,189 \cdot 0,6)^2 + (1 \cdot 0,189 \cdot 0,8)^2} \cdot \frac{10,5}{10,5} = 1,1236$$

индуктивные сопротивления генератора и трансформатора по формулам

$$X_{*\Gamma(\sigma)}^* = 0,189 \cdot 137,5 / 137,5 = 0,189;$$

$$X_{*\Gamma(\sigma)}^* = 10,5 \cdot 137,5 / (100 \cdot 125) = 0,1155;$$

$$\text{Поэтому } X_{*\Sigma(\sigma)}^* = X_{*\Gamma(\sigma)}^* + X_{*\Gamma(\sigma)}^* = 0,189 + 0,1155 = 0,3045.$$

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ

$$I_{*П0(\sigma)} = \frac{E_{*0(\sigma)}''}{X_{*\Sigma(\sigma)}^*} = \frac{1,1236}{0,3045} = 3,69$$

ОКЗ определяется как

$$I_{*П0(\text{ном})} = I_{*П0(\sigma)} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{ном}}} = 3,69 \cdot \frac{137,5}{137,5} = 3,69$$

В соответствии с типовыми кривыми изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенератора с тиристорной независимой системой возбуждения [11] при  $t=0,2$  с коэффициент  $\gamma_t=0,82$ , поэтому

$$I_{\text{Пт}} = \gamma_t I_{*П0(\sigma)} I_{\text{БВ}} = 0,82 \cdot 3,69 = 2,088 \text{ кА.}$$

## Задание для самостоятельной работы

Для схемы рис.12 определить токи трехфазного КЗ, протекающие через выключатели трансформаторов в момент времени  $t=0,2\text{с}$ . Сопротивление реактора  $0,35\ \text{Ом}$ , удельное сопротивление ВЛ  $X_{уд}=0,42\ \text{Ом/км}$ , на генераторе 1 установлена тиристорная независимая система возбуждения, на генераторах 2 и 3 – диодная независимая система возбуждения, нагрузка имеет асинхронный характер.

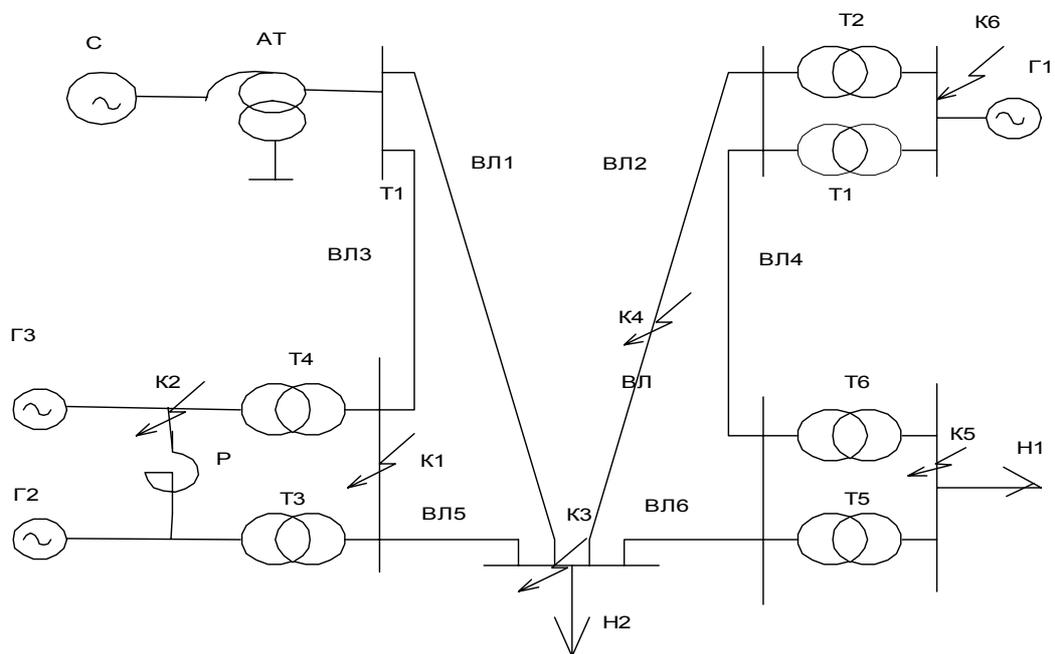


рис.12.

№ варианта	Точка КЗ	Г 1,2,3			АТ		Тр-ры 1-6		ВЛ 1-6				С
		$S_H$	$\cos\varphi$	$x''d$	$S_H$	$U_{НОМ}$	$S_H$	$U_{НОМ}$	L				$x_c$
		МВА	О.е	о.е	МВА	кВ	МВА	кВ	кМ				Ом
1	1	235	0,85	0.19	240	230 115 36	90	115 11	30 10 15 25 26 25				26
2	2	111	0,8	0.22	120	230 115 37	60	115 11	45 20 25 30 28 23				35
3	3	166	0,85	0.12	180	230 115 35	75	115 6.3	40 35 20 45 25 26				22
4	4	117	0,8	0.18	120	230 115 36	40	115 6.6	50 25 45 30 32 26				40
5	5	171	0,85	0.21	80	230 115 37	40	115 10	65 50 25 30 21 35				37
6	1	353	0,8	0.20	360	230 115 36	20	115 11	60 45 35 20 25 35				15
7	2	264	0,8	0.24	300	230 115 36	90	115 6.3	40 25 36 46 25 26				18
8	3	176	0,85	0.21	180	230 115 37	80	115 6.6	55 40 25 15 54 21				13
9	4	587	0,8	0.23	600	500 230 35	55	230 10	80 25 38 45 40 40				28
10	5	100	0,8	0,21	580	525 230 37	95	225 11	30 40 25 50 26 28				25

### Тема 5.НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ

1. Образование высших гармоник при несимметричном режиме синхронной машины.

Литература / 1 /, § 11.1, 11.2, с. 272 - 275.

2. Применимость метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов.

Литература / 1 /, § 11.3, с. 275 – 279.

3. Сопротивления элементов схемы для токов обратной и нулевой последовательностей синхронных генераторов и двигателей, асинхронных двигателей и обобщенной нагрузки.

Литература /1/, § 12.1, 12.2, 12.3, 12.4 с. 279 - 285; /7/, § 6.3, с. 129-131.

4. Трансформаторы и автотрансформаторы в схеме замещения нулевой последовательности.

Литература /1 /, §§ 12.5, 12.6, с. 285 - 290 до абзаца "Допустим теперь...", /7/, § 6.3, с. 134-137.

5. Сопротивления нулевой последовательности воздушных линий и кабелей.

Литература /1/, § 12.7. с. 295 с абзаца "Из (12-20) и (12-22)", с. 297, 298 до абзаца "Обратимся к принципиальной схеме", с. 299 с абзаца "При этом, как видно...", с. 300 – с абзаца "В приближенных практических расчетах..." – до абзаца "Реактивное емкостное сопротивление", табл. 12-2 на с. 301; с.302-304; /7/, § 6.3, с. 131-134.

6. Схемы отдельных последовательностей, определение результирующих э.д.с. и сопротивлений.

Литература /1/, § 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, с. 304-314; /7/, § 2.

7. Правило эквивалентности прямой последовательности для поперечной несимметрии.

Литература /1 /, §14.6, с. 325-331, пример 14-1, 14-2, с. 331-333; /7/, § 7.6, с. 150-153.

8. Сравнение видов короткого замыкания.

Литература /1/, § 14.8, с. 339-344, пример 14-5, с. 344-346; /7/, § 7.8, с. 155-157.

9. Применение практических методов к расчету переходного процесса при однократной поперечной несимметрии: а) расчет начальных значений токов и напряжений (Литература /1/, § 14.11, с. 350 - 352, пример 14-8, 14-9, с. 355 - 358; /7/, примеры 7.1-7.4, с. 168-176); б) применение метода расчетных кривых (Литература /1/. § 14.11, с. 370- 372, примеры 14-15, 14-16, с. 372 - 374; /7/, § 7.10, с. 164-166, пример 7.5, с. 176-181).

10.Однократная продольная несимметрия. Граничные условия, соотношения между симметричными составляющими токов, векторные диаграммы токов в месте разрыва чисто индуктивной цепи, комплексные схемы замещения: а) при разрыве одной фазы (Литература /7/, § 8.2, с. 185-186); б) при разрыве двух фаз; (Литература /7/, § 8.3, с. 186-188); в) при несимметрии от включения сопротивлений. (Литература /1/, §§ 15.1 - 15.6, с. 385- 356, 401 - 402, примеры 15-4 - 15-6, с. 402- 404; /7/, § 8.4, с. 188-191).

### Краткие теоретические сведения

Применяя метод несимметричных составляющих для несимметричных трехфазных систем токов и напряжений и пренебрегая влиянием высших гармоник, расчеты режимов несимметричного КЗ в одном месте цепи можно производить аналогично расчету трехфазного КЗ.

Ток прямой последовательности особой фазы (обычно в качестве её берётся фаза А, согласно правилу эквивалентности прямой последовательности определяется по формуле:

$$I_{кА1}^{(n)} = \frac{E_{экв}}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})} \quad (42)$$

где (n) – вид короткого замыкания: 1 – однофазное, 2 – двухфазное, 1.1 – двухфазное на землю;

$X_{1\Sigma}$  – результирующее эквивалентное индуктивное сопротивление схемы замещения прямой последовательности;

$\Delta X^{(n)}$  – дополнительное индуктивное сопротивление, которое определяется видом КЗ.

$$\Delta X^{(1)}=X_{0\Sigma}+X_{2\Sigma}; \quad \Delta X^{(2)}=X_{2\Sigma}; \quad \Delta X^{(1.1)}=X_{0\Sigma}||X_{2\Sigma}, \quad (43)$$

где  $X_{0\Sigma}$ ,  $X_{2\Sigma}$  – результирующие эквивалентные индуктивные сопротивления схем замещения нулевой и обратной последовательностей.

На основании соотношений между симметричными составляющими токов и напряжений в месте КЗ составляются соответствующие комплексные схемы, из которых определяются токи некоторых эквивалентных трехфазных КЗ согласно правилу эквивалентности тока прямой последовательности. Токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы в месте несимметричного КЗ определяются из соотношений:

При однофазном КЗ

$$I_{kA1} = I_{kA2} = I_{kA0} \quad (44)$$

При двухфазном КЗ

$$I_{kA1} = -I_{kA2} \quad (45)$$

При двухфазном КЗ на землю

$$I_{kA2} = -I_{kA1} \cdot \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \quad (46)$$

$$I_{kA0} = -I_{kA1} \cdot \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

Токи в фазах определяются в ходе построения векторных диаграмм как сумма токов прямой, обратной и нулевой последовательности данной фазы. Модуль полного тока поврежденной фазы можно определить из соотношения:

$$|I_k^{(n)}| = m^{(n)} \cdot |I_{kA1}^{(n)}| \quad (47)$$

где  $m^{(n)}$  – коэффициент, зависящий от вида КЗ:  $m^{(1)}=3$ ;  $m^{(2)}=\sqrt{3}$ ;

$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{0\Sigma} + X_{2\Sigma})^2}}$$

Поэтому необходимо научиться рассчитывать сопротивления и составлять схемы трех последовательностей – прямой, обратной и нулевой, а также комплексные схемы для основных видов несимметричного КЗ. Следует хорошо усвоить правило эквивалентности прямой последовательности, согласно которому для расчета переходного процесса при любом несимметричном коротком замыкании могут быть применены все практические методы и приемы расчета переходного процесса при трехфазном коротком замыкании. При нахождении токов несимметричного короткого замыкания в произвольный момент времени используют метод типовых кривых.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Чем вызвано образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронной машины?
2. Какими средствами можно уменьшить высшие гармоники, образующиеся при несимметричных режимах?
3. В чем заключается сущность метода симметричных составляющих и в чем состоят принципиальные трудности применения его для практических расчетов несимметричных переходных процессов?
4. На каком допущении основано использование метода симметричных составляющих для практических расчетов несимметричных переходных процессов?
5. Запишите основные уравнения второго закона Кирхгофа для каждой последовательности при произвольном виде поперечной и продольной несимметрии.
6. При каком условии сопротивление элемента для токов любой последовательности одинаково?

7. Какая величина принимается в качестве сопротивления обратной последовательности асинхронного двигателя?

8. Какое влияние на величину реактивности нулевой последовательности трансформатора оказывает: а) соединение обмоток; б) конструкция магнитопровода.

9. Почему реактивное сопротивление воздушной линии для токов нулевой последовательности значительно больше, чем для токов прямой и обратной последовательностей?

10. Почему при наличии заземленных тросов сопротивление нулевой последовательности линии имеет меньшее значение, чем при отсутствии тросов?

11. В чем заключается трудность определения сопротивления нулевой последовательности кабеля?

12. В чем заключается принципиальное различие в составлении схем отдельных последовательностей при поперечной и при продольной несимметриях?

13. Как изменяются векторные диаграммы токов и напряжений при переходе со стороны звезды на сторону треугольника трансформатора, обмотки которого соединены по группе  $Y/\Delta - II$  ?

#### Пример 5.

При двухфазном коротком замыкании на землю в точке К схемы (см рис 13) определить для момента времени  $t=0.2$  с ток в поврежденной фазе линии и ток в нейтрали трансформатора.

Данные: ГЭС:  $S_{ном}=180$  МВА;  $U_{ном}=10.5$  кВ;  $X''_{д*H} = X^*_{2H}=0.4$ ;  $\cos\varphi_{ном}=0.8$ , есть АРВ. Трансформатор Т-1:  $S_T=31.5$  МВА; 115/10.5 кВ;  $U_K=10.5$  %. Трансформатор Т-2:  $S_T=60$  МВА; 230/115/10.5 кВ;  $U_{K1-2} = 18$  %  $U_{K2-3}=10$  %. Линия:  $L=100$  км;  $X_1=0.4$  Ом/км;  $X_0=3$ .

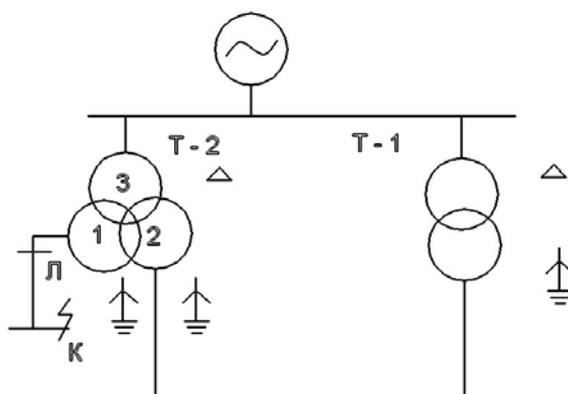


Рис 13. Схема к примеру 5.

В условии задачи требуется определить ток КЗ через 0,2 с после возникновения повреждения, поэтому целесообразно применить для расчета метод типовых кривых.

Расчет выполняется в относительных единицах при следующих базисных условиях:  $S_6=180$  МВА;  $U_6=230$  кВ.

Составляем схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, которые приведены на рис 14.

Определяем параметры схем замещения:

Прямой и обратной последовательностей:

$$X_{1*6} = X_1 \frac{S_6}{U_{НЛ}^2} = 0,4 * 100 * \frac{180}{230^2} = 0,136$$

$$X_{2*6} = \frac{U_{К1\%}}{100} \frac{S_6}{S_{HT-2}} = \frac{0,5 * (18 + 8 - 10)}{100} * \frac{180}{60} = 0,24$$

$$X_{3*6} = \frac{U_{К2\%}}{100} \frac{S_6}{S_{HT-2}} = \frac{0,5 * (18 + 10 - 8)}{100} * \frac{180}{60} = 0,3$$

$$X_{4*6} = \frac{U_{К3\%}}{100} \frac{S_6}{S_{HT-2}} = \frac{0,5 * (8 + 10 - 18)}{100} * \frac{180}{60} = 0$$

$$X_{5*6} = \frac{U_{К\%}}{100} \frac{S_6}{S_{HT-1}} = \frac{10,5}{100} * \frac{180}{31,5} = 0,6$$

$$X_{6*6} = X''_{d*H1} \frac{S_6}{S_{HT}} = 0,4 * \frac{180}{180} = 0,4$$

$$E''_{o(6)} = \sqrt{(1 + 0,4 \cdot 0,6)^2 + (0,4 \cdot 0,8)^2} = 1,281.$$

б) Сопротивление линии нулевой последовательности:

$$X_{1*6} = 3X_1 \frac{S_6}{U_{НЛ}^2} = 3 \cdot 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{180}{230^2} = 0,408.$$

Значения остальных параметров такие же, как и в схеме прямой последовательности.

Из схем замещения определяем эквивалентные сопротивления:

Прямой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned} X_{\Sigma 1*6} = X_{\Sigma 2*6} &= X_{1*6} + X_{2*6} + X_{3*6} // (X_{4*6} + X_{5*6}) + X_{6*6} = \\ &= 0,136 + 0,24 + \frac{0,3 \cdot 0,6}{0,3 + 0,6} + 0,4 = 0,976 \end{aligned}$$

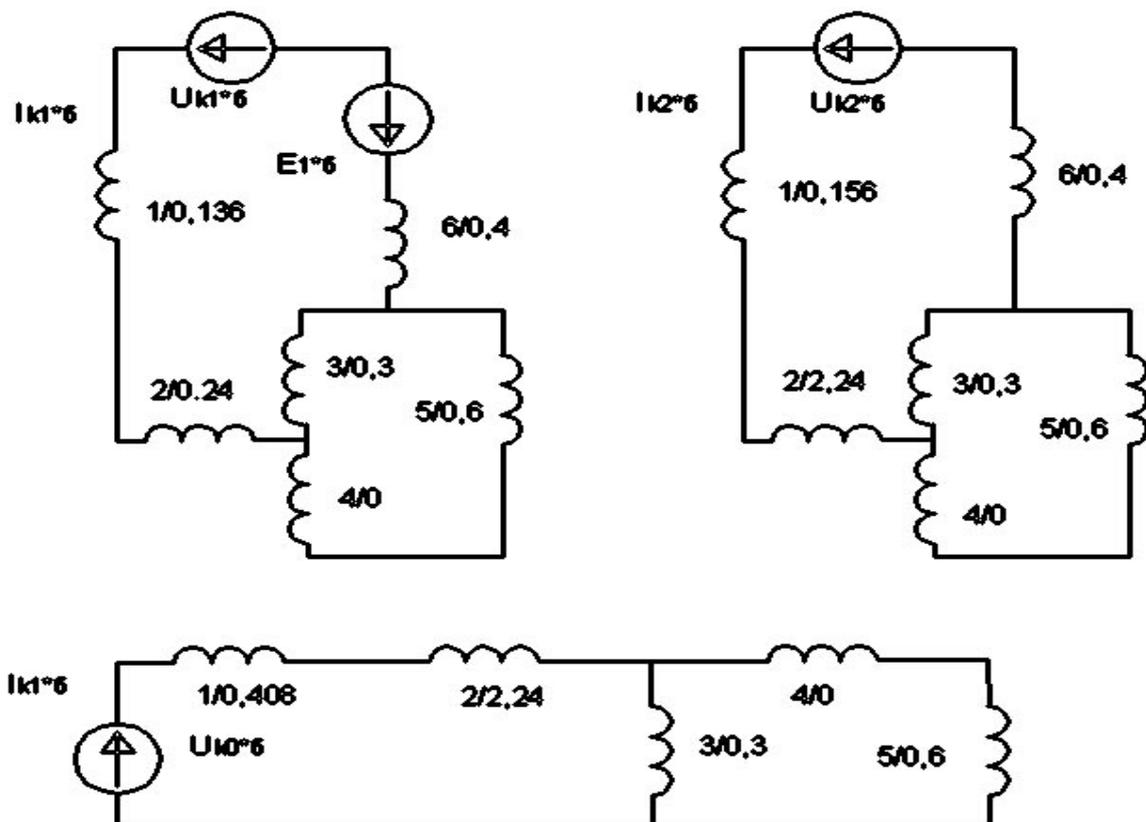


Рис 14. Схема замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей к примеру 5.

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{\Sigma 0*6} = X_{1*6} + X_{2*6} + X_{3*6} // (X_{4*6} + X_{5*6}) = 0,408 + 0,24 + \frac{0,3 \cdot 0,6}{0,3 + 0,6} = 0,848$$

Определим начальное значение тока прямой последовательности :

$$I_{1*П0(б)}=1,281/(0,976+0,976//0,848)=0,895.$$

Отсюда ОКЗ

$$I_{1*П0(б)}=0,895$$

Так как ОКЗ  $< 2$  , то ток в момент времени 0,2 с равен начальному значению, т.е.  $I_{Пт}=I_{П0}$ .

Ток в поврежденной фазе будет равен

$$I_K^{(1,1)} = m^{(1,1)} I_{K1*H} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{0,976 * 0,848}{(0,976 + 0,848)^2}} \cdot 0,895 \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,607 \text{ кА}$$

Для определения тока в нейтрали Т-1 необходимо найти ток нулевой последовательности, протекающий по обмотке ВН этого трансформатора. В данном случае он будет равен

$$I_{OT-1} = I_{K1*H} \frac{X_{Э2*б}}{X_{Э2*б} + X_{Э0*б}} = 0,895 \frac{0,976}{0,976 + 0,848} \cdot \frac{180}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,433$$

Ток в нейтрали равен утроенному току нулевой последовательности

$$I_H = 3 \cdot 0,433 \cdot (180 / \sqrt{3} \cdot 115) = 1,174 \text{ кА.}$$

### Задание для самостоятельной работы

Для заданного варианта схемы рис.15 рассчитать ток поврежденной фазы при несимметричном КЗ через выключатель в момент времени  $t$ , построить диаграммы токов и напряжений в месте короткого замыкания. В таблице 4 схемы соединения обмоток трансформаторов обозначены : 1-треугольник, 2- звезда с заземленной нейтралью, 3-звезда с эффективно заземленной нейтралью, 4-звезда с разземленной нейтралью.

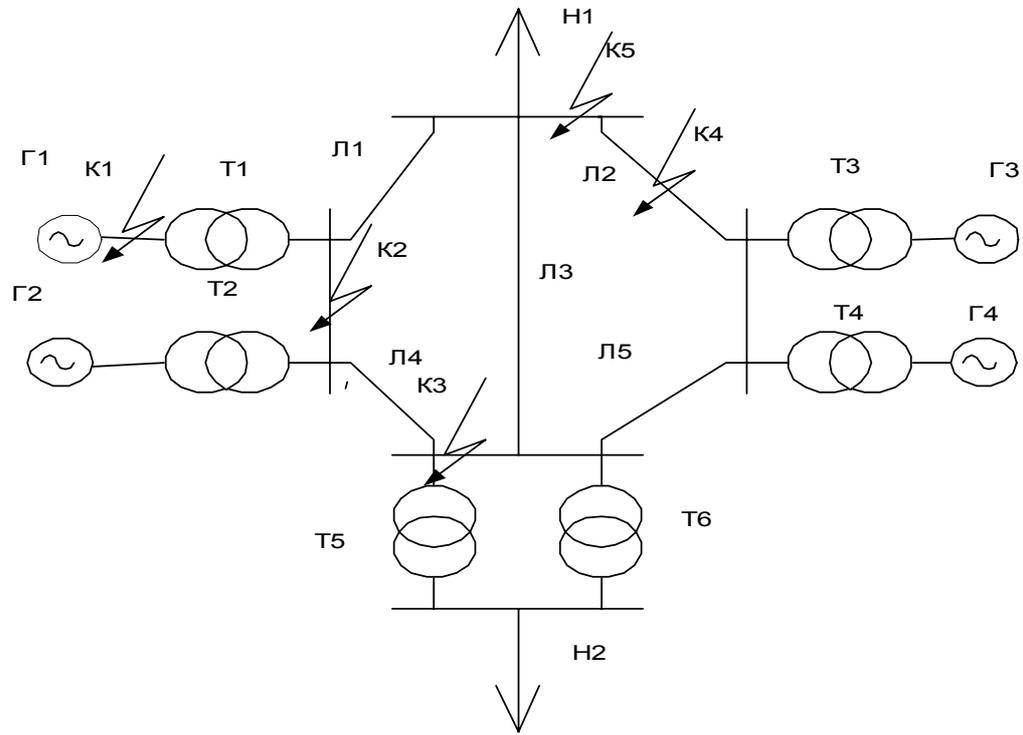


Рис.15.

Таблица 4.

Параметры элементов рис.15.

№ варианта	Точка КЗ	Г 1-4			Сх. соедин. обмоток		Тр-ы 1-4		ВЛ					Н	
		$S_H$	$\cos\varphi$	$x''d$	ВН	НН	$S_H$	$U_{ном}$	l					$S_H$	
		МВА	О.е	о.е			МВА	кВ	км					МВА	
1	1	60	0,85	0.19	T1,2-2	T1,2-1	90	115 10.5	30	10	36	15	25	26	40
2	2	80	0,8	0.22	T2,3-3	T2,3-4	60	115 10.5	45	20	25	26	30	35	30
3	3	90	0,85	0.12	T3,4-4	T5,6-3	75	115 6.3	40	35	20	45	28	22	15
4	4	85	0,8	0.18	T1,2-3	T1,2-4	40	115 6.3	31	50	25	45	30	40	25
5	5	70	0,85	0.21	T3,4-4	T3,4-1	40	115 10.5	65	26	50	25	30	37	26
6	1	65	0,8	0.20	T5,6-3	T5,6-1	20	115 10.5	60	45	29	35	20	15	24
7	2	75	0,8	0.24			90	115 6.3	40	25	36	54	46	18	23
8	3	80	0,85	0.21	T1,2-4	T1,2-3	80	115 6.3	55	40	25	15	19	13	28
9	4	60	0,8	0.23	T3,4-2	T3,4-4	55	230 10.5	80	58	25	38	45	28	20
10	5	50	0,8	0,21	T5,6-3	T5,6-1	95	225 17,5	30	40	60	25	50	25	40

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### *Основная литература*

1. *Ульянов С.А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах М.: Энергия, 1970.
2. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.; Высшая школа, 1978.
3. *Бессекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.
4. *Ульянов С.А.* Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах. М.: Энергия, 1968.
5. *Анисимов Н.Д., Веников В.А.* и др. Переходные процессы в электрических системах в примерах и иллюстрациях. М.: ГЭИ, 1967.
6. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / Под ред. В.А. Бессекерского М.: Наука, 1968.
7. Переходные процессы в системах электроснабжения / Под ред. В.Н.Винославского. К.:Выша шк.,1989.

### *Дополнительная литература*

8. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970, 1985.
9. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / Под ред. А.А. Федорова, Г.В. Сербинского. М.: Энергия, 1980.
10. *Ульянов С.А.* Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1964.
11. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000.

## Содержание

1. Введение .....	3
2. Общие методические указания.....	6
3. Краткие теоретические сведения.....	7
4. <i>Тема 1.</i> Система относительных единиц. Составление схемы замещения..	11
5. <i>Тема 2.</i> Эквивалентирование схемы замещения.....	22
6. <i>Тема 3.</i> Короткое замыкание в простейшей трехфазной цепи.....	37
7. <i>Тема 4.</i> Установившийся режим короткого замыкания.....	47
8. <i>Тема 5.</i> Несимметричные короткие замыкания.....	52
9. Библиографический список.....	62

Юрий Викторович Мясоедов,  
Доцент кафедры "Энергетика" АмГУ, канд.техн.наук  
Любовь Борисовна Гоголева,  
Ассистент кафедры "Энергетика" АмГУ

Расчет симметричных и несимметричных коротких замыканий в системах  
электрообеспечения.

Учебно-методическое пособие

---

Подписано к печати . Формат . Усл.печ.л.4, уч.-изд.л.

Тираж 150. Заказ .