

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Н.И. ЦЫГУЛЕВ, В.А.ШЕЛЕСТ, В.К. ХЛЕБНИ-  
КОВ**

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие

Ростов-на-Дону 2017

ББК 31.211

Ц 94

УДК 621. 311: 51 (075.8)

Рецензент к.т.н. Арцишевский Я.Л., кафедра «Релейной защиты и автоматизации энергосистем» Московского энергетического института (ТУ)

Ц 94 Основы электромагнитных переходных процессов в электрических системах: Учеб. пособие / Донск. техн. ун-т. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – 98 с.

В учебном пособии кратко изложены общие сведения об электромагнитных переходных в электрических системах, практические методы расчета токов короткого замыкания при симметричных и несимметричных повреждениях.

Учебное пособие предназначено для бакалавров направления 1302, а также может быть использовано студентами других энергетических специальностей.

Ц	2202020000 ----- 98П(03)-98	Без объявл.	УДК 621. 311: 51 (075.8)
---	-----------------------------------	-------------	--------------------------

ISBN 5-88998-013-0

© Донской государственный  
технический университет, 2017  
© Цыгулев Н.И., 2017

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

<u>ВВЕДЕНИЕ</u> .....	5
<b>1. СИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ</b> .....	7
1.1. Система относительных единиц.....	7
1.2. Математические модели элементов энергосистем.....	9
1.3. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в именованных единицах.....	17
1.3.1. Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформа- ции.....	18
1.3.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов транс- формации.....	19
1.4. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в относительных единицах.....	19
1.4.1. Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформа- ции.....	19
1.4.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов транс- формации...Примеры 1.1, 1.2, 1.3 .....	21
1.5. Мощность короткого замыкания.....	30
Контрольные вопросы к главе 1.....	30
Задачи к главе 1.....	31
<b>2. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ (ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ)</b> .....	34
2.1. Метод симметричных составляющих.....	34
2.1.1 Основные понятия метода симметричных составляющих.....	34
2.1.2 Схемы замещения отдельных последовательностей.....	36
2.2. Сопротивления машин и аппаратов токам обратной и нулевой последовательностей.....	37
2.3. Сопротивление линий электропередачи токам нулевой последова- тельности ...Пример 2.1 .....	40
2.4. Определение токов при несимметричных коротких замыканиях.....	43
2.4.1 Двухфазное короткое замыкание.....	43
2.4.2 Однофазное короткое замыкание.....	45
2.4.3 Двухфазное короткое замыкание на землю.....	46
2.4.4 Правило эквивалентности прямой последовательности.....	48
2.4.5. Учет активных сопротивлений в месте КЗ.....	51
2.5. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей.....	53
2.6. Сравнение токов при различных видах	

короткого замыкания .....	55
<u>2.7. Замыкания на землю в электрических сетях с незаземленной нейтралью .....</u>	<u>57</u>
<u>Контрольные вопросы к главе 2.....</u>	<u>58</u>
<u>Задача к главе 2.....</u>	<u>59</u>
3. <u>ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ .....</u>	<u>60</u>
<u>3.1. Однократная продольная несимметрия .....</u>	<u>60</u>
<u>3.2. Разрыв в одной фазе.....</u>	<u>61</u>
<u>3.3. Разрыв в двух фазах..... Пример 3.1 .....</u>	<u>63</u>
<u>Контрольные вопросы к главе 3.....</u>	<u>64</u>
4. <u>ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ИДЕАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭДС.....</u>	<u>65</u>
<u>4.1. Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи.....</u>	<u>65</u>
<u>4.2. Ударный ток короткого замыкания.....</u>	<u>67</u>
<u>4.3. Действующее значение тока короткого замыкания Пример 4.1 .....</u>	<u>69</u>
<u>Контрольные вопросы к главе 4.....</u>	<u>72</u>
<u>Задача к главе 4.....</u>	<u>72</u>
5. <u>ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ .....</u>	<u>73</u>
<u>5.1. Уравнения синхронной машины в фазных координатах.....</u>	<u>73</u>
<u>5.2. Обобщенный вектор трехфазной системы и замена переменных синхронной машины.....</u>	<u>75</u>
<u>5.3. Уравнения Парка-Горева для синхронной машины.....</u>	<u>76</u>
<u>5.4. Трехфазное короткое замыкание синхронной машины.....</u>	<u>77</u>
<u>5.4.1. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток при отключенном регуляторе возбуждения.....</u>	<u>77</u>
<u>5.4.2. Влияние демпферных обмоток на ток короткого замыкания..</u>	<u>79</u>
<u>5.4.3. Учет и влияние автоматического регулятора возбуждения....</u>	<u>80</u>
<u>5.4.4. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания методом типовых кривых..... Пример 5.1 .....</u>	<u>81</u>
<u>5.5. Переходные процессы в электрических двигателях.....</u>	<u>85</u>
<u>Контрольные вопросы к главе 5.....</u>	<u>88</u>
<u>Задача к главе 5.....</u>	<u>88</u>
<u>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</u>	<u>90</u>
<u>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</u>	<u>100</u>

*Светлой памяти Александра Дмитриевича Дроздова  
- выдающегося ученого-энергетика посвящается*

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время электрические станции и потребители электрической энергии объединены в энергосистемы. Повреждения в энергосистемах приводят к разрушению основного оборудования, к недоотпуску электроэнергии потребителям и т.п. Наиболее тяжелыми повреждениями являются короткие замыкания (КЗ). КЗ - непредусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами или в сетях с заземленной нейтралью, в том числе, между фазой и землей.

Переход электрической системы из одного режима в другой сопровождается переходным процессом. Переходный процесс это единое по своей природе явление, которое, однако, можно для упрощения анализа рассматривать состоящим из ряда отдельных процессов, каждый из которых отражает изменение определенной группы параметров режима. Рассматривать эти изменения необходимо одновременно во времени и пространстве, в инженерных задачах обычно учитываются только наиболее существенные в данной конкретной задаче факторы. Исходя из этого, переходный процесс в электрической системе по частотам колебаний и времени протекания его можно условно разделить на три составляющих: волновой, электромагнитный и электромеханический.

Волновые переходные процессы связаны с появлением внутренних (коммутационных), грозовых перенапряжений. Система при этом характеризуется элементами с распределенными параметрами. Диапазон частот 50 Гц – 10 кГц, время протекания процесса до 1 мс. Возможен электрический пробой изоляции.

За волновым следует электромагнитный переходный процесс, который обусловлен наличием запасенной энергии магнитного поля в индуктивностях элементов. Диапазон частот 50 – 600 Гц, время протекания процесса несколько периодов промышленной частоты. Роторы генераторов не успевают изменить свои скорости и относительные положения. Выключатели под действием релейной защиты осуществляют отключение поврежденных элементов. Возможные последствия аварии - механическое и термическое разрушения оборудования.

Затем начинается электромеханический переходный процесс. Он характеризуется тем, что на электромагнитный процесс накладывается механический, возникающий вследствие изменения скоростей вращения роторов генераторов, их относительных положений. Диапазон частот 1- 50 Гц, длительность десятки периодов. Наиболее опасные последствия: нарушение устойчивости и выпадение системы из синхронизма.

Виды КЗ зависят от уровня напряжения электрической сети: в сетях с глухозаземленной нейтралью (напряжением 110-1150 кВ) и четырех провод-

ных сетях (0,4 кВ) могут быть трехфазные КЗ ( $K^{(3)}$ ), двухфазные ( $K^{(2)}$ ), однофазные ( $K^{(1)}$ ) и двухфазные на землю ( $K^{(1,1)}$ ); в сетях с изолированной нейтралью (напряжением 3-35 кВ) такие же виды замыканий за исключением замыканий на землю. Несимметричные КЗ представляют собой поперечную несимметрию. *В сетях с изолированной нейтралью замыкание на землю называется простым замыканием.*

Основные причины возникновения КЗ:

- неправильное проектирование, монтаж и эксплуатация электроустановок,
- механические повреждения и перекрытие токоведущих частей,
- удары молнии.

Последствия КЗ:

- нарушение параллельной работы энергосистем,
- динамическое и термическое разрушение оборудования,
- снижение уровня напряжения у потребителей.

Расчеты токов КЗ являются, в общем случае, довольно сложной задачей и при их выполнении принимаются следующие допущения:

- не учитываются качания роторов генераторов,
- пренебрежение насыщением магнитных систем генераторов и трансформаторов,
- пренебрежение намагничивающими токами трансформаторов,
- пренебрежение активными сопротивлениями и распределенной емкостью обмоток и линий.

В месте КЗ, как правило, возникает электрическая дуга. Однако расчеты производятся для наиболее тяжелого случая без учета переходного сопротивления в месте повреждения, так называемого металлического КЗ.

Назначение расчетов токов короткого замыкания (ТКЗ):

- выбор наиболее рациональных схем электрических соединений,
- выбор оборудования устойчивого к ТКЗ,
- выбор уставок срабатывания устройств релейной защиты,
- проектирование защитных заземлений.

Требования к погрешности расчетов ТКЗ определяются целью расчетов. Так, расчеты ТКЗ для целей релейной защиты должны выполняться с меньшей погрешностью по сравнению с расчетами для выбора электрических аппаратов.

Основная цель курса – овладение инженерными методами расчета токов КЗ и электромагнитных переходных процессов в электрических системах.

# 1. СИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

## 1.1. Система относительных единиц

Все физические величины выражаются в именованных единицах. Однако представление их в относительных (безразмерных) единицах позволяет упростить теоретические выкладки и практические расчеты, поэтому в дальнейшем наряду с именованными единицами будем использовать также относительные. Система относительных единиц используется и в курсе электрических машин, поэтому в данном разделе напомним только ее основные положения и покажем возможности применения для магнитосвязанных цепей.

Под относительным значением некоторой величины понимают ее отношение к другой одноименной физической величине, выбранной за единицу измерения, например, базисную величину (базу). Таким образом, относительные единицы получают с помощью выражения

$$\text{относительная величина}_* = \frac{\text{фактическая физическая величина}}{(\text{базисная величина}) \text{ база}}$$

и отмечают звездочкой «\*».

В качестве базисных единиц или базы в расчетах принимают базисные мощность ( $S_{\bar{o}}$ ), напряжения ( $U_{\bar{o}i}$ ), токи ( $I_{\bar{o}i}$ ) и сопротивление ( $Z_{\bar{o}}$ ) и др. Базисные величины обозначают нижним индексом "б". В этом случае относительные единицы называют относительными базисными, например, ЭДС  $E_{*\bar{o}}$ , ток  $I_{*\bar{o}}$  и т.п. Таким образом, относительные базисные величины определяются следующими выражениями:

$$Z_{*\bar{o}} = \frac{Z}{Z_{\bar{o}}}, \quad E_{*\bar{o}} = \frac{E}{E_{\bar{o}}}, \quad X_{*\bar{o}} = \frac{X}{X_{\bar{o}}}, \quad I_{*\bar{o}} = \frac{I}{I_{\bar{o}}}, \quad S_{*\bar{o}} = \frac{S}{S_{\bar{o}}} \text{ и т.п.}$$

Из этих выражений можно получить, что численно равны: относительные фазные и линейные величины; мощность одной фазы и мощность трех фаз; ток возбуждения, поток и ЭДС генератора. Необходимо отметить, что для любого элемента электрической сети относительное сопротивление равно относительному падению напряжения при протекании через него номинального тока (или мощности).

Базисные мощность и напряжение принимаются независимыми, через которые можно выразить базисные сопротивление и ток. Из уравнения мощности трехфазной цепи

$$I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3}U_{\bar{o}}}, \tag{1.1}$$

а на основании закона Ома для трехфазной цепи

$$Z_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3}I_{\delta}} = \frac{U_{\delta}^2}{S_{\delta}}. \quad (1.2)$$

Поскольку выбор базисных условий произволен, то одна и та же физическая величина может иметь разные численные значения при выражении ее в относительных единицах. Обычно относительные сопротивления элементов энергосистем (генераторов, трансформаторов, реакторов, двигателей) задаются в относительных единицах при номинальных параметрах:  $S_H$  и  $U_H$  (номинальные величины обозначают индексом "H"). При этом относительные номинальные величины записываются в виде

$$Z_{*H} = \frac{Z}{Z_H}, \quad E_{*H} = \frac{E}{E_H}, \quad X_{*H} = \frac{X}{X_H}, \quad I_{*H} = \frac{I}{I_H}, \quad S_{*H} = \frac{S}{S_H}.$$

Номинальные ток  $I_H$  и сопротивление  $Z_H$  можно найти с помощью выражений, аналогичных (1.1) и (1.2)

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H}, \quad (1.3)$$

$$Z_H = \frac{U_H^2}{S_H}. \quad (1.4)$$

Установим связь между именованными и относительными единицами. По определению относительной базисной величины

$$Z_{*\delta} = \frac{Z}{Z_{\delta}}.$$

Подставив в последнее выражение формулу (1.2), получим

$$Z_{*\delta} = Z \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \quad (1.5)$$

С помощью выражения (1.5) осуществляют перевод именованных единиц в относительные базисные.

Аналогично для относительных номинальных единиц с учетом (1.4), получим

$$Z_{*H} = Z \frac{S_H}{U_H^2}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) наиболее часто используется для вычисления сопротивлений в именованных единицах, при известных относительных номинальных, в следующем виде

$$Z = Z_{*H} \frac{U_H^2}{S_H}. \quad (1.7)$$

Подставив в (1.5) значение  $Z$  из выражения (1.7), получим выражение, которое устанавливает связь между относительными номинальными и относительными базисными единицами



$$Z_{*\delta} = Z_{*H} \frac{S_{\delta}}{S_H} \left( \frac{U_H}{U_{\delta}} \right)^2. \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) используется для перевода относительных номинальных единиц в относительные базисные.

Для ограничения ТКЗ в энергосистемах используются токоограничивающие реакторы, представляющие линейные индуктивности. Для таких реакторов задаются номинальные ток и напряжение (а не мощность). Учитывая, что  $S = \sqrt{3}UI$  выражения (1.6) и (1.8) преобразуются соответственно

$$Z = Z_{*H} \frac{U_H}{\sqrt{3}I_H} \quad (1.9)$$

и

$$Z_{*\delta} = Z_{*H} \frac{I_{\delta}}{I_H} \frac{U_H}{U_{\delta}}. \quad (1.10)$$

Относительные величины выражают также в процентах, например, сопротивление  $Z_{\%} = 100 \cdot Z_{*}$

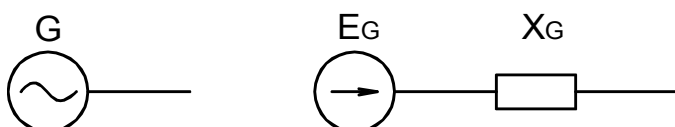
## 1.2. Математические модели элементов энергосистем

Математической моделью любого технического объекта является система уравнений, описывающая процессы в нем, или (для электроэнергетического объекта) - электрическая схема замещения. Математическая модель электрической сети, представляет собой совокупность математических моделей отдельных элементов, соединенных в определенной последовательности.

Универсальных математических моделей не существует. Математическая модель зависит от назначения расчетов. В модели выделяют те свойства объекта, которые доминируют в рассматриваемом процессе и пренебрегают свойствами, мало влияющими на результаты расчетов. В этом разделе рассматриваются математические модели элементов системы, используемые для расчета токов КЗ.

При построении моделей вводится ряд допущений, основными из которых являются: линейность параметров элементов, что позволяет широко использовать удобные линейные преобразования, и пренебрежение активным сопротивлением элементов (активное сопротивление всех элементов энергосистем значительно меньше индуктивного сопротивления на промышленной частоте, и, кроме того, между индуктивным и активным сопротивлениями угол  $90^\circ$  в треугольнике сопротивлений, поэтому, как правило, если это специально не оговаривается, то активным сопротивлением элементов энергосистем пренебрегают), вследствие чего значение тока КЗ получают несколько завышенным, т.е. с запасом.

*Синхронный генератор.* Условное изображение трехфазного синхронного генератора и схема замещения его представлены на рис.1.1.



В течение переходного режима ЭДС генератора и его внутреннее сопротивление изменяются. Рис. 1.1

В начальный момент времени генератор характеризуется сверхпереходными: ЭДС по поперечной оси сопротивления  $E_q''$  и сопротивлением по продольной оси  $x_d''$ . Термин "сверхпереходный" означает, что учтены все свободные токи статора и ротора (в обмотке возбуждения (ОВ) и демпферной обмотке (ДО)), и обозначается верхним индексом - два штриха " (рис.1.2). Напомним, что переходный процесс имеет место либо после затухания свободных токов в ДО, либо при отсутствии ДО в гидрогенераторе; в турбогенераторе роль ДО играет массивный ротор.

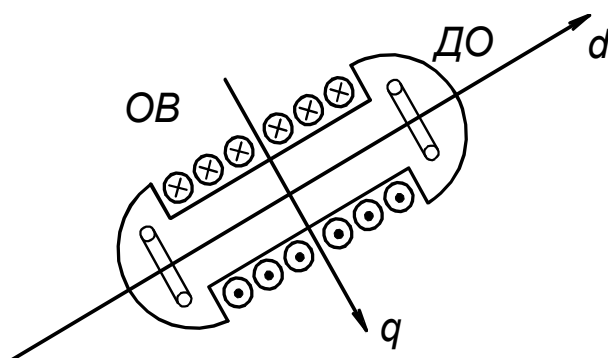


Рис.1.2

В справочной литературе для расчетов токов КЗ в сверхпереходном режиме для генераторов задаются: активная мощность  $P_H$  (иногда полная  $S_H$ ), номинальное напряжение на выводах генератора  $U_H$ , сверхпереходные относительные номинальные ЭДС  $E_q''$  и сопротивление  $x_d''$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_H$ .

Типовые турбогенераторы, выпускаемые в нашей стране, имеют следующие номинальные мощности ( $P_H$ ):

2,5; 4,0; 6,0; 12, 32, 50, 63, 100, 160, 200, 300, 500, 800, 1000, 1200 МВт;  
и номинальные напряжения (линейные):

3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24 кВ.

В результате модернизации в некоторых генераторах мощность увеличена по сравнению с выше приведенной.

При отсутствии в справочной литературе ЭДС генератора в сверхпереходном (переходном) режиме ее можно определить из предшествующего режима работы. ЭДС превышает напряжение на зажимах генератора на величину падения напряжения на его внутреннем сопротивлении. В частности, относительная номинальная ЭДС для расчета сверхпереходного тока ( $I_k''$ ) может быть определена из выражения

$$E_{G*H}'' = \sqrt{U_{*H}^2 \cos^2 \varphi_H + U_{*H}^2 \sin^2 \varphi_H + I_{*H}^2 x_d''^2}, \quad (1.11)$$

где  $U_{*H}$ ,  $I_{*H}$  - относительные номинальные напряжение на выводах и ток генератора в режиме, предшествующем КЗ. ЭДС генератора в именованных единицах

$$E_{GH}'' = E_{G*H}'' U_H \quad (1.12)$$

(иногда для упрощения записи штрихи у сверхпереходной ЭДС опускают).

Относительное номинальное сопротивление при расчете сверхпереходного тока представляет собой сверхпереходное сопротивление по про-

дольной оси  $x_d''$  и для генераторов лежит в диапазоне 0,11-0,25. Коэффициент мощности составляет 0,8-0,9. С увеличением номинальной мощности генераторов  $U_H$ ,  $x_d''$  и  $\cos \varphi_H$  увеличиваются. Параметры синхронных генераторов приведены в приложении 1.

*Силовой трансформатор.* Условное изображение двухобмоточного трансформатора и его схема замещения приведены на рис.1.3. При вычислении токов КЗ намагничивающими токами трансформаторов (автотрансформаторов) пренебрегают. При расчете токов при трехфазных КЗ и в симметричных режимах соединение обмоток трансформаторов допускается не указывать.

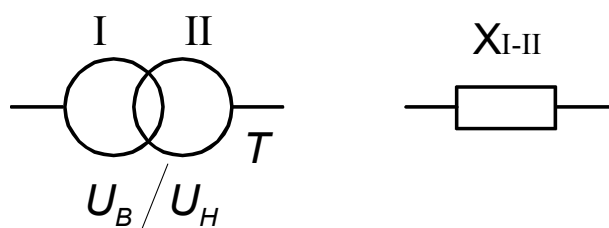


Рис.1.3

В справочной литературе для двухобмоточных трансформаторов задаются: полная мощность  $S_H$ , напряжения обмоток высокого ( $U_B$ ) и низкого ( $U_H$ ) напряжений (или первичной ( $U_I$ )

и вторичной ( $U_{II}$ ) обмоток, напряже-

ние короткого замыкания в процентах  $U_{k\%}$ , или относительных единицах  $U_{k*H} = U_{k\%} / 100\%$ .

Напряжение короткого замыкания трансформатора определяется из опыта КЗ при пониженном напряжении и номинальном токе. Оно связано с относительным номинальным сопротивлением трансформатора ( $T$ ) выражением:

$$U_{k*H} = \frac{U_k}{U_H} = \frac{\sqrt{3}I_H Z_T}{U_H} = \frac{Z_T}{Z_H} = Z_{T*H}. \quad (1.13)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора определяется потоками рассеяния. С увеличением номинального напряжения, увеличиваются расстояние между обмотками, потоки рассеяния, и, следовательно, индуктивное сопротивление.

Трехфазные трансформаторы, выпускаемые в нашей стране, мощностью более 10 МВА имеют следующие номинальные мощности ( $S_H$ ):

16, 25, 32, 40, 63, 100, 125, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 800, 1000 МВА.

Условное изображение трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора, а также их схема замещения, представляющая трехлучевую звезду, приведены на рис.1.4.

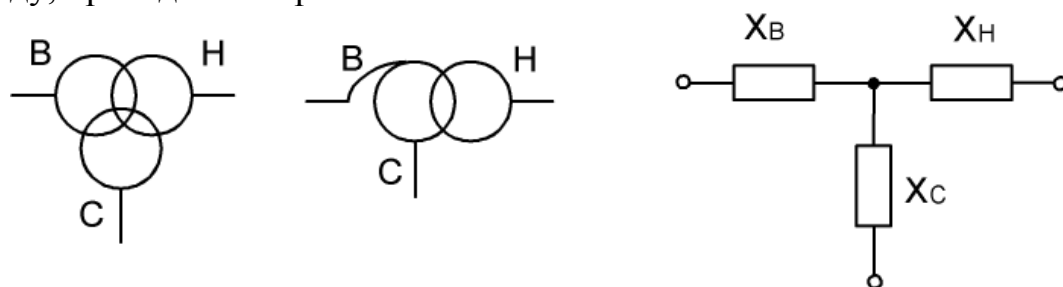


Рис.1.4

Для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов задаются следующие параметры: номинальная мощность  $S_n$ , напряжения обмоток высокого  $U_B(U_I)$ , среднего  $U_C(U_{II})$  и низкого  $U_H(U_{III})$  напряжений, три напряжения короткого замыкания для каждой пары обмоток:  $U_{k*BH}$ ,  $U_{k*BC}$ ,  $U_{k*CH}$ . Для автотрансформаторов в каталогах приводятся напряжения КЗ, приведенные к проходной мощности  $S_{прох} = \sqrt{3}U_B I_B$ . При замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжение неповрежденных фаз относительно земли увеличивается в  $\sqrt{3}$  раза. Это называется перекосом напряжений. Через автотрансформатор перекос фаз может перейти с обмотки высокого напряжения на обмотку низкого напряжения если его нейтраль не заземлена. Поэтому автотрансформаторы применяются только в сетях с глухозаземленной нейтралью (110 кВ и выше).

Для нахождения напряжений короткого замыкания (или сопротивлений) отдельных обмоток, используются выражения, известные из курса электрических машин. Например, для обмотки высокого напряжения:

$$U_{k*B} = \sqrt{U_{k*BC}^2 + U_{k*BH}^2 - U_{k*CH}^2} \cdot 2.$$

Аналогичные выражения используются и для остальных обмоток (С и Н).

Если напряжение короткого замыкания (или сопротивление) одной из обмоток уже определено, например, для обмотки высокого напряжения, то остальные могут быть определены, используя более простые выражения, например:

$$U_{k*B} = U_{k*BH} - U_{k*H}, \quad U_{k*C} = U_{k*BC} - U_{k*B}, \\ U_{k*H} = U_{k*BH} - U_{k*B}.$$

Обмотка среднего напряжения располагается, как правило, между обмотками высокого и низкого напряжений. Это приводит к снижению ее потоков рассеяния и, следовательно, индуктивного сопротивления. В некоторых случаях оно может принимать даже отрицательные значения, в этом случае им можно пренебречь.

Трансформаторы и автотрансформаторы (устанавливаемые в электрических сетях) имеют специальные устройства (типа ПБВ и РПН) для регулирования напряжения путем изменения коэффициентов трансформации с помощью специальных регулировочных ответвлений; при этом изменяется и напряжение короткого замыкания. Для повышения точности расчетов токов КЗ (в частности, для целей релейной защиты) необходимо учитывать реальный коэффициент трансформации и напряжение КЗ.

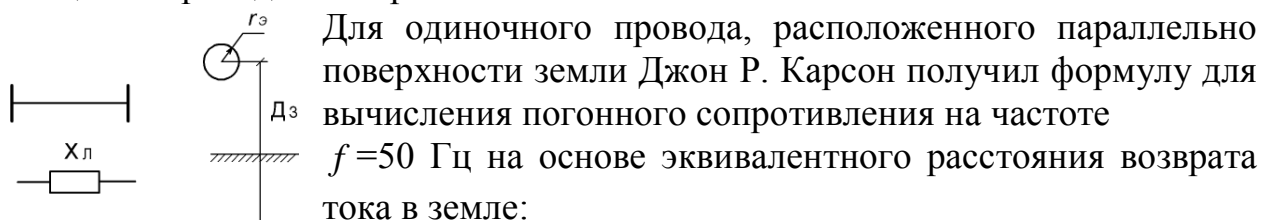
Краткие сведения о трансформаторах с расщепленными обмотками приведены в приложении 2. Параметры силовых трансформаторов и автотрансформаторов приведены в приложении 3.

*Линии электропередачи.* Воздушные линии (ВЛ) обладают практически равномерными по длине удельными параметрами. В практических расчетах токов КЗ для сравнительно небольших длин ВЛ до 150-300 км и кабельных линий до 30-50 км равномерно распределенные параметры можно заменить сосредоточенными. Данные о пропускной способности ВЛ и предель-

ных расстояниях передачи приведены в приложении № 4. Необходимо обратить внимание, что большей мощности соответствует меньшее расстояние передачи и наоборот. Предельные длины линий напряжением ниже 35 кВ ориентировочно могут быть определены по правилу: "киловольт на километр", т.е. для напряжения 10 кВ – 10 км, 6 кВ – 6 км и т.п.

Погонные индуктивные сопротивления фаз ВЛ зависят от взаимного расположения токоведущих проводников и их геометрических размеров. При расчетах токов КЗ пользуются средними погонными значениями индуктивного сопротивления  $x_{пог}$ . Если известны расстояния между проводами и тип проводов, то параметры удельных индуктивных сопротивлений можно найти в приложении 5.

*Одноцепная линия.* Условное изображение одноцепной ВЛ и схема замещения приведены на рис. 1.5.



$$x_{пог} = 0,145 \lg \frac{D_з}{r_э},$$

Рис. 1.5 где  $D_з$  - эквивалентная глубина возврата тока в земле, зависящая от сопротивления земли, которая при отсутствии данных о грунте принимается равной примерно 1000 м;  $r_э = re^{-0,25} = 0,779 r$  - эквивалентный радиус провода ( $r = D/2$  - здесь  $D$  измеренный диаметр проводника). Уменьшение эквивалентного радиуса проводника обусловлено поверхностным эффектом. Провода линий выполняются многожильными, свитыми из отдельных круглых проволок, поэтому для многожильных проводов эквивалентный радиус еще меньше  $r_э \approx (0,726 - 0,776)r$ .

Для выравнивания электрического поля проводов и ослабления явления ионизации воздуха в сетях напряжением 330 кВ и выше ВЛ выполняются с расщепленными проводами, при этом эквивалентный радиус системы проводов одной фазы

$$r_э' = \sqrt[n_n]{r_э d_{cp}^{n_n - 1}},$$

где  $d_{cp}$  - среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы,  $n_n$  - число проводов в фазе.

В ПУЭ установлены наименьшие значения допустимых диаметров проводов из условий короны: 110 кВ – АС-70; 220 кВ – АС-240; 330 кВ – АСО-600 или 2×АСО-240 (два провода в фазе); 500 кВ – 2×АСО-700 или 3×АСО-400 (два и три провода в фазе соответственно); 750 кВ – 4×АСО-500 (четыре провода в фазе).

В трехфазных ВЛ индуктивное сопротивление складывается из собственного сопротивления фазы  $x_{ног.с}$  и двух взаимных сопротивлений (фаз)

$x_{ног.вз1}$  и  $x_{ног.вз2}$

$$x_{ног.л} = x_{ног.с} + x_{ног.вз1} + x_{ног.вз2}.$$

Считая, что выполнен полный цикл транспозиции проводов, и учитывая, что векторы токов (и потоков) фаз расположены под углом  $120^\circ$

$$x_{ног.л} = x_{ног.с} - x_{ног.вз} = 0,145 \left( \lg \frac{D_3}{r_\varphi} - \lg \frac{D_3}{D_{cp}} \right),$$

где  $D_{cp} = \sqrt[3]{d_{AB}d_{AC}d_{BC}}$  - среднее геометрическое расстояние между фазными проводами, здесь  $d_{ij}$  - расстояние между проводниками фаз  $A, B$  и  $C$ . Расстояние между проводами фаз составляет: до 1 кВ – 0,5 м; 6-10 кВ – 1 м; 35 кВ – 2,5 м; 110 кВ – 4 м; 220 кВ – 7 м; 330 кВ – 8,5 м; 500 кВ – 12 м; 750 кВ – 15 м; 1150 кВ – 22 м.

Для ЛЭП с номинальным напряжением до 220 кВ включительно  $x_{ног.с} \approx 0,7$  Ом/км,  $x_{ног.вз} \approx 0,3$  Ом/км, поэтому при отсутствии данных о параметрах линии можно приближенно считать, что  $x_{ног.л} \approx 0,7 - 0,3 = 0,4$  Ом/км.

С увеличением номинального напряжения линии, диаметр проводов увеличивается и, несмотря на то, что расстояние между проводниками фаз также увеличивается, емкости проводов (междуфазные и относительно земли) все же возрастают, а индуктивное сопротивление линии уменьшается, так как  $\varepsilon \cdot \mu = const$ . При отсутствии данных о ВЛ можно принять: для линий с номинальным напряжением 330 кВ и двумя проводами в фазе  $x_{ног.л} \approx 0,32$  Ом/км, а с номинальным 500 кВ и тремя проводами в фазе  $x_{ног.л} \approx 0,29$  Ом/км.

*Магнитные потоки, создаваемые токами, протекающими в проводах фаз, в грозозащитном тросе взаимно компенсируются, поэтому тросы не оказывают влияние на магнитное состояние линии, (даже в старых конструкциях ВЛ, когда тросы заземлялись на каждой опоре) и, следовательно, на ее индуктивное сопротивление при трехфазных КЗ влияния не оказывают.*

При необходимости учета активного сопротивления ВЛ, например, при расчете переходного режима, погонное активное сопротивление может быть найдено из приложения №6 или по формулам:

- для медных проводов  $R_{ног} = \frac{18,8}{F}$  Ом/км,
- для алюминиевых проводов  $R_{ног} = \frac{31,5}{F}$  Ом/км,

где  $F$  - сечение провода,  $\text{мм}^2$  (активное сопротивление проводов из цветных металлов обычно применяемых сечений при частоте 50 Гц практически равно активному сопротивлению на постоянном токе, т.е. явление поверхностного эффекта можно не учитывать).

*Двухцепная линия.* Магнитные потоки второй цепи двухцепной линии взаимно компенсируются в каждой фазе первой цепи, поэтому не оказывают на нее магнитного влияния. Электрическое влияние второй цепи характеризуется только ее параллельным подключением. Если сопротивления обеих цепей одинаковы, результирующее сопротивление двухцепной линии

$$x_{\text{ног.дц}} = \frac{1}{2} x_{\text{ног.л.}}$$

*Кабели.* Так как расстояния между проводниками фаз в кабеле меньше, чем в ВЛ, то индуктивные сопротивления трехжильных кабелей значительно меньше, чем для проводов ВЛ, в среднем они равны: для кабелей напряжением 35 кВ – 0,12 Ом/км; 3-10 кВ – 0,07-0,08 Ом/км; до 1 кВ – 0,06-0,07 Ом/км.

Активное сопротивление кабелей обычно применяемых сечений при частоте 50 Гц практически равно активному сопротивлению для постоянного тока и может быть определено по ранее приведенным формулам для ВЛ. В отличие от других элементов энергосистем активное сопротивление кабеля соизмеримо с его индуктивным сопротивлением на частоте 50 Гц и часто учитывается при расчетах токов КЗ. Длины кабелей напряжением 6-10 кВ в среднем равны 5-7 км, в сельской местности достигают до 10 км. Более точно значения индуктивного  $x_{\text{ног.к}}$  и активного  $r_{\text{ног.к}}$  сопротивлений кабеля обычно находятся по заводским данным, приводимым в справочной литературе (приложение 7).

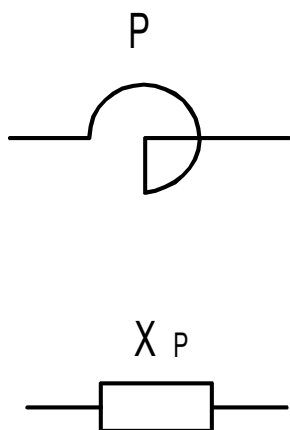


Рис.1.6

*Реакторы.* Условное изображение реактора и схема его замещения приведены на рис. 1.6. Для токоограничивающих реакторов задаются номинальное напряжение  $U_n$ , ток  $I_n$  и сопротивление в процентах  $x_{p\%}$ . Сопротивление реактора определяется, главным образом, собственной индуктивностью катушки каждой фазы и взаимной индуктивностью между обмотками фаз пренебрегают.

*Электрические двигатели.* Электрические двигатели (ЭД) и синхронные компенсаторы (СК), расположенные вблизи места КЗ являются дополнительными источниками тока КЗ, поэтому их необходимо учитывать при расчете сверхпереходных токов КЗ. Условное изображение и схема замещения ЭД такие же, как и синхронного генератора. ЭДС ЭД вычисляется по формуле

$$E'' = U_0 \pm I_0 x'' \sin \varphi_0, \quad (1.14)$$

где  $U_0$ ,  $I_0$ ,  $\varphi_0$  - напряжение, ток и фазовый угол двигателя в нагрузочном режиме, предшествующем КЗ; знак плюс соответствует синхронному двигателю (СД) и СК, знак минус - асинхронному двигателю (АД) и недовозбужденному СД.

При отсутствии паспортных данных можно пользоваться их средними номинальными значениями:

- для СД и СК  $E''_{*СД} = 1,1$  и  $x''_{*СД} = 0,2$ ;
- для АД  $E''_{*АД} = 0,9$  и  $x''_{*АД} = 1/k_{пуск}$ ,

где  $k_{пуск}$  - кратность пускового тока.

Технические характеристики электрических двигателей и синхронных компенсаторов приведены в приложении 10.

*Обобщенная (промышленная) нагрузка.* Под обобщенной нагрузкой принято понимать совокупность АД, каждый из которых имеет небольшую мощность. Таким образом, обобщенная нагрузка это эквивалентный АД, поэтому и ведет себя подобно АД. Схема замещения обобщенной нагрузки, подключенной в месте КЗ, такая же, как и синхронного генератора. Реактивность обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электроэнергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемом процессе. Для средней статистической нагрузки принято считать  $E''_{*нагр} = 0,85$ ,  $x''_{*нагр} = 0,35$ .

*Система (электрическая).* Совокупность электрических станций, электроподстанций, трансформаторов связи, ЛЭП можно заменить одним эквивалентным генератором, который принято называть (электрической) системой. Для системы задаются ее полная мощность  $S_c$  (мощность всех входящих в систему генераторов) и номинальное напряжение  $U_c$ . На схеме замещения система изображается так же, как и генератор. При этом необходимо иметь в виду, что номинальное напряжение генератора, как правило, не превышает 24 кВ (очень редко 150 кВ), поэтому подключаемые к нему обмотки трансформаторов соединены в треугольник. Напряжения системы, в принципе, могут иметь различные значения из стандартного ряда напряжений, как правило, более высокие, чем напряжения генераторов, поэтому подключаемые обмотки трансформаторов, обычно соединены в звезду. Напомним, что обмотки высокого напряжения (выше 35 кВ) соединяются в звезду, обмотки низкого напряжения (менее 35 кВ) – в треугольник.

Часто для системы задаются полная мощность  $S_k^{(3)}$  при трехфазном КЗ и напряжение той ступени  $U_c$ , где известна мощность, в этом случае сопротивление системы: в именованных единицах

$$x_c = \frac{U_c^2}{S_k^{(3)}}, \quad (1.15)$$

в относительных единицах



$$x_{c*6} = \frac{S_6}{S_k^{(3)}}. \quad (1.16)$$

### 1.3. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в именованных единицах

Под начальным сверхпереходным током понимают действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент КЗ при  $t = 0$ . В расчетах применяют укрупненные именованные величины: кВ, кА, МВА и т.п.

Расчет ТКЗ начинается с составления схемы замещения, используя схемы замещения отдельных элементов, приведенные в п.1.2. Схему замещения изображают однолинейной, изображая одну из фаз. В отличие от принятого изображения электрических схем в них не показан замкнутый путь тока. На схеме замещения изображаются только те элементы, по которым протекает ток КЗ, используя симметрию схемы. Ток КЗ протекает от генераторов к месту повреждения. Элементы схемы замещения обозначают в виде обыкновенной дроби, в числителе которой находится порядковый номер, а в знаменателе – величина сопротивления.

Выбирается основная ступень напряжения, к которой затем приводятся сопротивления всех элементов и ЭДС генераторов. В качестве основной ступени напряжения рекомендуется принять ступень, где произошло КЗ.

Для исключения влияния соединения обмоток трансформаторов (автотрансформаторов) коэффициент трансформации определяется как отношение линейных напряжений при холостом ходе, при этом коэффициент трансформации определяется как отношение: напряжения обмотки, обращенной к основной ступени к напряжению обмотки, обращенной к приводимому элементу. При наличии между основной ступенью и приводимым элементом нескольких трансформаторов (автотрансформаторов) результирующий (эквивалентный) коэффициент трансформации равен произведению всех коэффициентов трансформации трансформаторов, расположенных между приводимым элементом и основной ступенью:

$$k_9 = k_1 k_2 \cdots k_n = \prod k_i.$$

Приведенные параметры обозначают, например,  $\overset{\circ}{Z}$ . Для приведения используют следующие формулы:

$$\overset{\circ}{E} = E \cdot k_9, \quad (1.17)$$

$$\overset{\circ}{U} = U \cdot k_9, \quad \overset{\circ}{I} = I / k_9,$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z \cdot k_9^2. \quad (1.18)$$

После вычисления всех ЭДС и сопротивлений и приведения к основной ступени, используя правила преобразования электрических схем, схема замещения сворачивается.

Найденные из преобразованной схемы эквивалентные ЭДС  $\overset{\circ}{E}_\varepsilon$  и сопротивление  $x_\varepsilon$ , используются для вычисления тока КЗ. Учитывая, что ЭДС линейная, а ток КЗ определяется в фазе, то сверхпереходный ток КЗ вычисляется по формуле

$$I_k'' = \frac{\overset{\circ}{E}_\varepsilon}{\sqrt{3} x_\varepsilon}. \quad (1.19)$$

*1.3.1. Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформации.* Сопротивления всех элементов схемы выражаются в именованных единицах с использованием выражений (1.7, 1.13). Сопротивления генератора  $x_G$ , трансформатора  $x_T$ , линии  $x_L$  и реактора  $x_P$  определяются с помощью выражений:

$$\left. \begin{aligned} x_G &= x_d'' \frac{U_H^2}{S_H} = x_d'' \frac{\cos \varphi \cdot U_H^2}{P_H}, \\ x_T &= \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H}, \\ x_L &= x_{noz} l, \\ x_P &= x_{P*H} \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H}, \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

где  $l$  - длина линии. Сопротивление кабеля вычисляется также как и линии. В формулу для вычисления сопротивления трансформатора можно подставить напряжение любой обмотки – при этом получим сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению данной обмотки.

С целью компенсации потерь напряжения в элементах энергосистем (линии, кабели, трансформаторы, реакторы) номинальные напряжения обмоток повышающих трансформаторов выше стандартных номинальных напряжений соответствующего класса: если  $U_H \leq 220$  кВ, то на 10%, если  $U_H \geq 330$  кВ – на 5 %. Напряжение 220 кВ является граничным, поэтому у некоторых повышающих трансформаторов это напряжение только на 5% выше номинального. Шкала напряжений питающих трансформаторов:

$U_H$ , кВ	6	10	35	110	220	330	500
$U_{повыш. тр-ра}$ , кВ	6,6	11	38,5	121	242 (230)	347	525

**1.3.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов трансформации.** На практике часто используется приближенное приведение коэффициентов трансформации, упрощающее расчеты токов КЗ. Для каждой ступени принимают, что все номинальные напряжения обмоток трансформаторов и генераторов одинаковы и равны среднему номинальному напряжению трансформатора  $U_{ср.н}$  или расчетному напряжению. В соответствии с "Правилами устройства электротехнических установок" среднее номинальное значения напряжения принимается выше стандартных номинальных напряжений соответствующего класса: если  $U_n \leq 220$  кВ, то на 5%, если  $U_n \geq 330$  кВ – на 2,5 %.

Шкала средних номинальных напряжений:

$U_n$ , кВ	6	10	35	110	220	330	500
$U_{ср.н}$ , кВ	6,3	10,5	37	115	230	340	515

Средние номинальные напряжения генераторов и непосредственно присоединенных к ним трансформаторов (блоков) равны номинальным: 6,3; 10,5; 13,8; 18; 20; 24 кВ. В приближенном приведении нескольких последовательно соединенных трансформаторов напряжения промежуточных ступеней сокращаются и эквивалентный коэффициент трансформации определяется как отношение средних номинальных напряжений крайних ступеней, т.е. напряжения основной ступени и напряжения ступени приводимого элемента.

Для данного расчета применимы все формулы, приведенные в п.1.3.1. Погрешность расчета токов КЗ при приближенном приведении по сравнению с точным приведением не превышает 10-15%.

#### **1.4. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в относительных единицах**

Составляется схема замещения, которая не отличается от схемы замещения для расчета токов КЗ в именованных единицах. Схема делится на ступени напряжения. Границами ступеней являются трансформаторы и автотрансформаторы. Номера ступеней принято обозначать римскими цифрами. В качестве первой ступени рекомендуется выбрать ступень, где произошло КЗ.

Расчет ТКЗ начинается с выбора базисных условий: базисной мощности  $S_б$  и базисного напряжения  $U_б$  одной из ступеней (где произошло КЗ). На других ступенях напряжения находятся пересчетом с помощью коэффициентов трансформации. Затем по формулам (1.3), (1.5) и (1.7) определяются все сопротивления в относительных единицах и к базисным условиям приводятся ЭДС всех генераторов.

**1.4.1. Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформации.** Базисное напряжение первой ступени (в месте КЗ) принимается равным действительному напряжению на этой ступени  $U_{бI} = U_n$ . Базисные

напряжения остальных ступеней находятся с помощью коэффициентов трансформации.

Относительные базисные ЭДС генераторов находятся из выражения

$$E_{G*\delta} = \frac{E_G}{U_{\delta G}}, \quad (1.21)$$

где  $U_{\delta G}$  - базисное напряжение ступени, к которой подключены выводы генератора.

Сопротивление генератора  $x_{G*\delta}$ , трансформатора  $x_{T*\delta}$ , линии  $x_{л*\delta}$  и реактора  $x_{p*\delta}$  вычисляются с помощью выражений (1.5, 1.8, 1.10):

$$\left. \begin{aligned} x_{G*\delta} &= x_d'' \frac{S_{\delta}}{S_n} \left( \frac{U_n}{U_{\delta}} \right)^2 = x_d'' \frac{S_{\delta} \cos \varphi}{P_n} \left( \frac{U_n}{U_{\delta}} \right), \\ x_{T*\delta} &= \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_n} \left( \frac{U_n}{U_{\delta}} \right)^2, \\ x_{л*\delta} &= x_{y\delta} l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}, \\ x_{p*\delta} &= x_{p*n} \frac{I_{\delta}}{I_n} \frac{U_n}{U_{\delta}}, \quad x_{p*\delta} = x_p \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

Необходимо следить, чтобы отношение напряжений  $\left( \frac{U_n}{U_{\delta}} \right)$  соответствовало одной ступени напряжения. Для трансформаторов отношения  $\left( \frac{U_{ni}}{U_{\delta i}} \right)$  равны для всех обмоток.

Используя правила преобразования электрических схем, схему замещения сворачивают и при этом получают эквивалентную ЭДС  $E_{\delta*\delta}''$  и эквивалентное сопротивление  $x_{\delta*\delta}$ . Находят относительный базисный ток КЗ

$$I_{k*\delta}'' = \frac{E_{\delta*\delta}''}{x_{\delta*\delta}}.$$

Для нахождения тока КЗ в именованных единицах используют формулу

$$I_k'' = I_{k*\delta}'' I_{\delta i},$$

где  $I_{\delta i} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta i}}$  - базисный ток той ступени, где находится ток КЗ.

Значения токов КЗ определенные в относительных единицах должны совпадать со значениями токов вычисленных в именованных единицах.

**1.4.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов трансформации.** При приближенном приведении базисные напряжения принимаются равным средним номинальным напряжениям, т.е.  $U_{\delta} = U_{ср.н}$ .

Так как ЭДС генератора при приближенном приведении задается равной напряжению на выводах генератора, то, используя (1.21), получим  $E_{G*\delta} = 1$ . При приближенном приведении упрощаются формулы определения сопротивлений элементов, для которых сопротивления заданы в относительных единицах:

$$x_{G*\delta} = x_d'' \frac{S_{\delta}}{S_n} = x_d'' \frac{S_{\delta} \cos \varphi}{P_n},$$

$$x_{T*\delta} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_n},$$

$$x_{P*\delta} = x_{P*n} \frac{I_{\delta}}{I_n},$$

все остальные выражения, необходимые для расчета токов КЗ остаются без изменения.

**Пример 1.1.** Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ при трехфазном повреждении в точке  $k$  для заданного участка энергосистемы (рис.1.7) в именованных и относительных базисных единицах с точным и приближенным приведением коэффициентов трансформации. Оба генератора до возникновения повреждения работали в номинальном режиме.

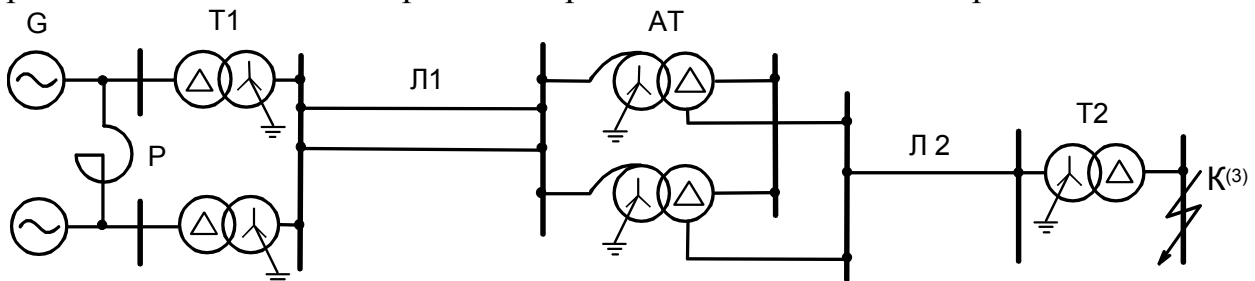


Рис.1.7

Параметры элементов схемы:

- Генератор ТВФ-100-2:  $P_n = 100$  МВт;  $U_n = 10,5$  кВ;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $x_d'' = 0,183$ ;
- Трансформатор Т1: ТЦ-12500/220:  $S_n = 125$  МВА;  $U_{HH} = 10,5$  кВ;  $U_{BH} = 242$  кВ;  $U_{k\%} = 11\%$ ;
- Автотрансформатор АТДЦТН-200000/220/110  $S_n = 200$  МВА;  $U_{BH} = 220$  кВ;  $U_{CH} = 121$  кВ;  $U_{HH} = 38,5$  кВ;  $U_{k*BH} = 34\%$ ;  $U_{k*BC} = 11\%$ ;  $U_{k*CH} = 21\%$ ;
- Трансформатор Т2 ТРДЦН-125000/110:  $S_n = 125$  МВА;  $U_{BH} = 110$  кВ;  $U_{HH} = 11$  кВ;  $U_{k\%} = 10,5\%$ ;

- Двухцепная линия: длина Л1 = 60 км, погонное сопротивление  $x_{ног} = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;
- Одноцепная линия: длина Л2 = 25 км, погонное сопротивление  $x_{ног} = 0,4 \text{ Ом/км}$ .

Используя рекомендации п.1.3, составим схему замещения (рис.1.8). Генераторы, трансформаторы, двухцепная линия, автотрансформаторы, используя принцип симметрии, изображаются одним элементом, а наличие параллельного элемента учитывается при вычислении сопротивления. По реактору и обмоткам низшего напряжения автотрансформаторов ток КЗ не протекает, поэтому на схеме замещения они отсутствуют.

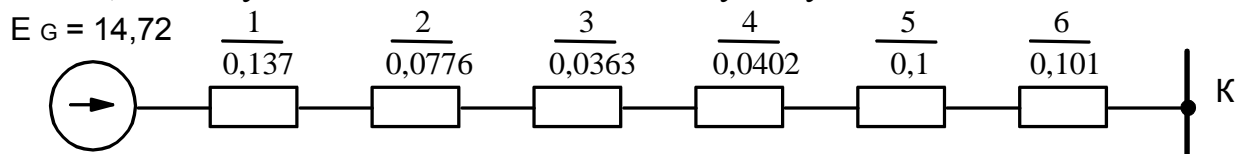


Рис.1.8

В качестве основной ступени принимается та ступень, где произошло КЗ. Напряжение на этой ступени 11 кВ.

*Расчет токов КЗ в именованных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации.*

Сопротивления всех элементов и ЭДС генераторов выразим в именованных единицах.

Сопротивление генератора, приведенное к его номинальным параметрам

$$x_G = x_d'' \frac{U_H^2 \cos \varphi}{P_H} = 0,183 \frac{10,5^2 \cdot 0,85}{100} = 0,171 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двух генераторов, приведенное к ОС

$$x_1 = \frac{x_G}{2} \left( \frac{242}{10,5} \right)^2 \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = \frac{0,171}{2} \left( \frac{242}{10,5} \right)^2 \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = 0,137 \text{ Ом.}$$

Сопротивление трансформатора Т1, приведенное к обмотке низкого напряжения

$$x_{T1} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{11}{100} \frac{10,5^2}{125} = 0,097 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двух трансформаторов Т1, приведенное к ОС

$$x_2 = \frac{x_{T1}}{2} \left( \frac{242}{10,5} \right)^2 \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = \frac{0,097}{2} \left( \frac{242}{10,5} \right)^2 \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = 0,0776 \text{ Ом.}$$

Сопротивление одной цепи двухцепной линии Л1

$$x_{Л1} = x_{ног} \cdot l = 0,4 \cdot 60 = 24 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двухцепной линии Л1, приведенное к ОС

$$x_3 = \frac{x_{Л1}}{2} \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = \frac{24}{2} \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = 0,0363 \text{ Ом.}$$

Сопротивление автотрансформатора, приведенное к обмотке высокого напряжения

$$x_{AT} = \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{11}{100} \frac{220^2}{200} = 26,62 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двух автотрансформаторов, приведенное к ОС,

$$x_4 = \frac{x_{AT}}{2} \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = \frac{26,62}{2} \left( \frac{121}{220} \right)^2 \left( \frac{11}{110} \right)^2 = 0,0402 \text{ Ом.}$$

Сопротивление одноцепной линии Л2

$$x_{Л2} = x_{ноз} \cdot l = 0,4 \cdot 25 = 10 \text{ Ом.}$$

Сопротивление одноцепной линии Л2, приведенное к ОС,

$$x_5 = x_{Л1} \left( \frac{11}{110} \right)^2 = 10 \cdot \left( \frac{11}{110} \right)^2 = 0,1 \text{ Ом.}$$

Сопротивление трансформатора Т2, приведенное к обмотке низкого напряжения, т.е. к ОС

$$x_6 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{11^2}{125} = 0,101 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление цепи, приведенное к ОС

$$x_э = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0,492 \text{ Ом.}$$

ЭДС генератора в относительных номинальных единицах

$$E_{G*H}'' = \sqrt{U_{*H}^2 \cos^2 \varphi_H + U_{*H}^2 \sin^2 \varphi_H + I_{*H}^2 x_d''^2} = \\ = \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + 0,527^2 + 1 \cdot 0,183^2} = 1,107.$$

ЭДС генератора в именованных единицах

$$E_{GH}'' = E_{G*H}'' U_H = 1,107 \cdot 10,5 = 11,62 \text{ кВ.}$$

ЭДС генератора, приведенная к ОС,

$$E_{Gэ}'' = E_{GH}'' \left( \frac{242}{10,5} \frac{121}{220} \frac{11}{110} \right) = 11,62 \frac{242}{10,5} \frac{121}{220} \frac{11}{110} = 14,72 \text{ кВ.}$$

Сверхпереходный ток КЗ ОС

$$I_k'' = \frac{E_{Gэ}''}{\sqrt{3} x_э} = \frac{14,72}{\sqrt{3} \cdot 0,492} = 17,29 \text{ кА.}$$

*Расчет токов КЗ в относительных базисных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации.*

Выбираем базисную мощность  $S_б = 1000 \text{ МВА}$  и базисные напряжения ступеней. В качестве первой ступени принимается ступень, где произошло КЗ. Базисное напряжение первой ступени принимается равным действительному напряжению на этой ступени  $U_{б1} = 11 \text{ кВ}$ . Относительные базисные напряжения остальных ступеней.

$$U_{\delta II} = U_{\delta I} \frac{110}{11} = 11 \frac{110}{11} = 110 \text{ кВ};$$

$$U_{\delta III} = U_{\delta II} \frac{220}{121} = 110 \frac{220}{121} = 200 \text{ кВ};$$

$$U_{\delta IV} = U_{\delta III} \frac{220}{121} = 110 \frac{10,5}{242} = 8,67 \text{ кВ}.$$

Сопротивление двух генераторов

$$x_{1*\delta} = x_d'' \frac{S_{\delta} \cos \varphi \left( \frac{U_n}{U_{\delta IV}} \right)^2}{2P_n} = 0,183 \frac{1000 \cdot 0,85 \left( \frac{10,5}{8,67} \right)^2}{2 \cdot 100} = 1,14.$$

Сопротивление двух трансформаторов Т1

$$x_{2*\delta} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{2S_n} \left( \frac{U_n}{U_{\delta IV}} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 125} \left( \frac{10,5}{8,67} \right)^2 = 0,65.$$

Сопротивление двухцепной линии Л1

$$x_{3*\delta} = \frac{x_{noz} l_1}{2} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta III}^2} = \frac{0,4 \cdot 60}{2} \frac{1000}{200^2} = 0,3.$$

Сопротивление обмоток В-С напряжения двух автотрансформаторов

$$x_{4*\delta} = \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{2S_n} \left( \frac{U_n}{U_{\delta III}} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 200} \left( \frac{220}{200} \right)^2 = 0,333.$$

Сопротивление одноцепной линии Л2

$$x_{5*\delta} = x_{noz} l_2 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 25 \frac{1000}{110^2} = 0,826.$$

Сопротивление трансформатора Т2

$$x_{6*\delta} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_n} = \frac{10,5}{100} \frac{1000}{125} \left( \frac{10,5}{8,67} \right)^2 = 0,84.$$

Суммарное сопротивление цепи

$$x_{\Sigma*\delta} = x_{1*\delta} + x_{2*\delta} + x_{3*\delta} + x_{4*\delta} + x_{5*\delta} + x_{6*\delta} = 4,086.$$

ЭДС генератора в относительных базисных единицах

$$E_{G*\delta}'' = \frac{E_G''}{U_{\delta IV}} = \frac{11,62}{8,67} = 1,34.$$

Относительный базисный ток КЗ

$$I_{k*\delta}'' = \frac{E_{G*\delta}''}{x_{\Sigma*\delta}} = \frac{1,34}{4,086} = 0,328.$$

Сверхпереходный ток КЗ

$$I_k'' = I_{k*\delta} I_{\delta I} = I_{k*\delta} \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta I}} = 0,328 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 17,23 \text{ кА}.$$

*Расчет токов КЗ в именованных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации.*



Действительные напряжения элементов схемы заменим средними значениями.

Сопротивления элементов схемы, приведенные к ОС

$$x_1 = x_d'' \frac{U_H^2 \cos \varphi \left( \frac{10,5}{10,5} \right)^2}{2P_H} = 0,183 \frac{10,5^2 0,85}{2 \cdot 100} = 0,0857 \text{ Ом},$$

$$x_2 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{2S_H} \left( \frac{10,5}{10,5} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{10,5^2}{2 \cdot 125} = 0,0485 \text{ Ом},$$

$$x_3 = \frac{x_{noz} l_1}{2} \left( \frac{10,5}{230} \right)^2 = 0,025 \text{ Ом},$$

$$x_4 = \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{2S_H} \left( \frac{10,5}{230} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{230^2}{2 \cdot 125} \left( \frac{10,5}{230} \right)^2 = 0,0485 \text{ Ом},$$

$$x_5 = x_{noz} l_2 \left( \frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,084 \text{ Ом},$$

$$x_6 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{10,5^2}{125} = 0,0926 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление цепи, приведенное к ОС

$$x_\Sigma = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0,384 \text{ Ом}.$$

ЭДС генератора, приведенная к ОС

$$E''_{G\Sigma} = U_H \frac{10,5}{10,5} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Сверхпереходный ток КЗ ОС

$$I_k'' = \frac{E''_{G\Sigma}}{\sqrt{3} x_\Sigma} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,384} = 15,81 \text{ кА}.$$

*Расчет токов КЗ в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации.*

Выбираем базисную мощность  $S_\delta = 1000 \text{ МВА}$  и базисные напряжения ступеней. Базисные напряжения ступеней принимаются равным средним напряжениям на соответствующих ступенях:  $U_{\delta I} = 10,5 \text{ кВ}$ ,  $U_{\delta II} = 115 \text{ кВ}$ ;  $U_{\delta III} = 230 \text{ кВ}$ ;  $U_{\delta IV} = 10,5 \text{ кВ}$ . Определяем относительные сопротивления элементов схемы, приведенные к базисным условиям:

$$x_{1*\delta} = x_d'' \frac{S_\delta \cos \varphi}{2P_H} = 0,183 \frac{1000 \cdot 0,85}{2 \cdot 100} = 0,777;$$

$$x_{2*\delta} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_\delta}{2S_H} = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 125} = 0,44;$$

$$x_{3*\delta} = \frac{x_{noz} l_1}{2} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta III}^2} = \frac{0,4 \cdot 60}{2} \frac{1000}{230^2} = 0,226;$$

$$x_{4*\delta} = \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{2S_n} = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 200} = 0,275;$$

$$x_{5*\delta} = x_{noz} l_2 \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = 0,4 \cdot 25 \frac{1000}{115^2} = 0,756;$$

$$x_{6*\delta} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_n} = \frac{10,5}{100} \frac{1000}{125} = 0,84.$$

Суммарное сопротивление цепи

$$x_{\Sigma*\delta} = x_{1*\delta} + x_{2*\delta} + x_{3*\delta} + x_{4*\delta} + x_{5*\delta} + x_{6*\delta} = 3,314.$$

Сверхпереходный ток КЗ

$$I_k'' = \frac{E_{*\delta}''}{x_{\Sigma*\delta}} I_{\delta I} = \frac{E_{*\delta}''}{x_{\Sigma*\delta}} \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta I}} = \frac{1}{3,314} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 16,61 \text{ кА. } \triangleright$$

**Пример 1.2.** Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ для задан-

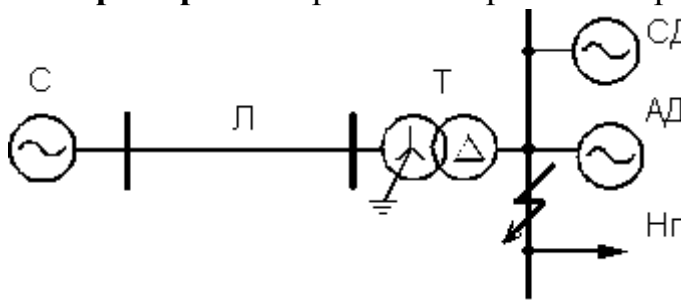


Рис.1.9

ного участка энергосистемы (рис.1.9) при трехфазном КЗ в точке  $k$  в именованных и относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Электрические двигатели до возникновения по-

вреждения работали в номинальном режиме.

Параметры элементов системы:

- система:  $S_c = 150$  МВА;
- линия Л: длина  $l = 30$  км, погонное сопротивление  $x_{noz} = 0,4$  Ом/км;
- трансформатор Т: ТРДЦН-60000/110:  $S_n = 60$  МВА;  $U_{BH} = 110$  кВ;  $U_{HH} = 11$  кВ;  $U_{k\%} = 11\%$ ;
- синхронный электродвигатель (СД):  $P_{CD} = 6,3$  МВт;  $U_n = 6$  кВ;  $\cos \varphi_{CD} = 0,9$ ;  $x_d'' = 0,144$ ;
- асинхронный электродвигатель (АД):  $P_{AD} = 1,25$  МВт;  $U_n = 6$  кВ;  $\cos \varphi_{AD} = 0,905$ ;  $k_{пуск} = 6,6$ ;
- обобщенная нагрузка (Нг):  $S_{нагр} = 2$  МВА;  $U_n = 6,3$  кВ;  $E_{нагр*} = 0,85$ ;  $x_{нагр*} = 0,35$ .

◁ Схема замещения приведена на рис.1.10.

Расчет токов КЗ в именованных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Действительные напряжения элементов

схемы заменим средними. В качестве основной ступени принимается ступень напряжения 6,3 кВ – место повреждения.

Выразим сопротивления элементов схемы в именованных единицах и приведем их к основной ступени:

система

$$x_1 = \frac{U_c^2}{S_c} \left( \frac{6,3}{115} \right)^2 = \frac{115^2}{150} \frac{6,3^2}{115^2} = 0,265 \text{ Ом},$$

линия

$$x_2 = x_{noz} l \left( \frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,036 \text{ Ом},$$

трансформатор

$$x_3 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{11}{100} \frac{6,3^2}{60} = 0,073 \text{ Ом},$$

синхронный электродвигатель

$$x_4 = x_{CD}'' \frac{U_n^2 \cos \varphi_{CD}}{P_{CD}} = 0,144 \frac{6,3^2 0,9}{6,3} = 0,816 \text{ Ом},$$

асинхронный электродвигатель

$$x_5 = x_{AD}'' \frac{U_n^2 \cos \varphi_{AD}}{P_{AD}} = \frac{1}{k_{пуск}} \frac{U_n^2 \cos \varphi_{AD}}{P_{AD}} = \frac{1}{6,6} \frac{6,3^2 0,905}{1,25} = 4,353 \text{ Ом},$$

обобщенная нагрузка

$$x_6 = x_{нагр}'' \frac{U_n^2}{S_{нагр}} = 0,35 \frac{6,3^2}{2} = 6,94 \text{ Ом}.$$

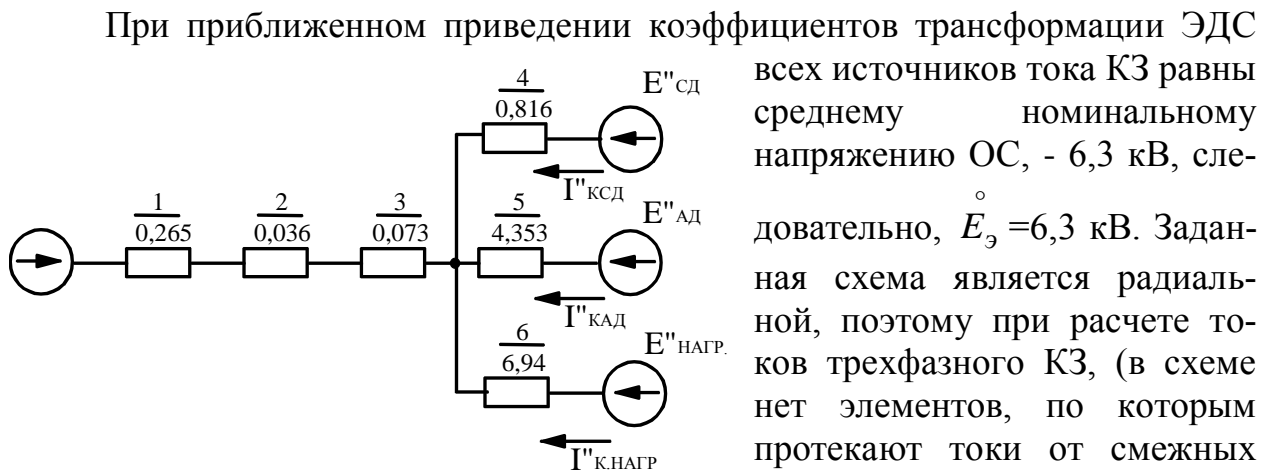


Рис.1.10

Токи в ветвях схемы:

система (для ветви системы  $x_{\Sigma c} = x_1 + x_2 + x_3 = 0,374 \text{ Ом}$ )

$$I''_{kc} = \frac{E''_{\text{э}}}{\sqrt{3} x_{\text{эс}}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,374} = 9,736 \text{ кА},$$

синхронный электродвигатель

$$I''_{кCD} = \frac{E''_{\text{э}}}{\sqrt{3} x_4} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,816} = 4,46 \text{ кА},$$

асинхронный электродвигатель

$$I''_{кAD} = \frac{E''_{\text{э}}}{\sqrt{3} x_5} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 4,353} = 0,836 \text{ кА},$$

обобщенная нагрузка

$$I''_{к.нагр} = \frac{E''_{\text{э}}}{\sqrt{3} x_5} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 6,94} = 0,524 \text{ кА}.$$

Полный ток в месте КЗ равен сумме токов всех присоединений

$$I''_k = 9,736 + 4,46 + 0,836 + 0,524 = 15,556 \text{ кА}.$$

*Расчет токов КЗ в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации.*

Выбираем базисную мощность  $S_{\text{б}} = 1000 \text{ МВА}$  и базисные напряжения ступеней. Базисные напряжения ступеней принимаются равным средним напряжениям на соответствующих ступенях:  $U_{\text{бI}} = 6,3 \text{ кВ}$ ,  $U_{\text{бII}} = 115 \text{ кВ}$ . Определяем относительные сопротивления элементов схемы, приведенные к базисным условиям:

$$x_{1*\text{б}} = \frac{U_c^2}{S_c} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} = \frac{S_{\text{б}}}{S_c} = \frac{1000}{150} = 6,67;$$

$$x_{2*\text{б}} = x_{\text{ног}} l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бII}}^2} = 0,4 \cdot 30 \frac{1000}{115^2} = 0,907;$$

$$x_{3*\text{б}} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}} = \frac{11}{100} \frac{1000}{60} = 1,83;$$

$$x_{4*\text{б}} = x''_{CD} \frac{S_{\text{б}} \cos \varphi_{CD}}{P_{CD}} = 0,144 \frac{1000 \cdot 0,9}{6,3} = 20,571;$$

$$x_{5*\text{б}} = x''_{AD} \frac{S_{\text{б}} \cos \varphi_{AD}}{P_{AD}} = \frac{1}{k_{\text{нук}}} \frac{S_{\text{б}} \cos \varphi_{AD}}{P_{AD}} = \frac{1}{6,6} \frac{1000 \cdot 0,905}{1,25} = 109,7;$$

$$x_{6*\text{б}} = x_{\text{нагр}*} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{нагр}*}} = 0,35 \frac{1000}{2} = 175.$$

При приближенном приведении коэффициентов трансформации ЭДС всех источников тока КЗ равны 1.

Токи в ветвях схемы:

система (для ветви системы  $x_{э*б} = x_{1*б} + x_{2*б} + x_{3*б} = 9,41$ )

$$I''_{кс} = \frac{E''_{*б}}{x_{э*б}} I_{бI} = \frac{E''_{*б}}{x_{э*б}} \frac{S_{б}}{\sqrt{3}U_{бI}} = \frac{1}{9,41} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,726 \text{ кА},$$

синхронный электродвигатель

$$I''_{кСД} = \frac{E''_{*б}}{x_{4*б}} I_{бI} = \frac{E''_{*б}}{x_{4*б}} \frac{S_{б}}{\sqrt{3}U_{бI}} = \frac{1}{20,571} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 4,46 \text{ кА},$$

асинхронный электродвигатель

$$I''_{кАД} = \frac{E''_{*б}}{x_{5*б}} I_{бI} = \frac{E''_{*б}}{x_{5*б}} \frac{S_{б}}{\sqrt{3}U_{бI}} = \frac{1}{109,7} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,836 \text{ кА},$$

обобщенная нагрузка

$$I''_{к.нагр} = \frac{E''_{*б}}{x_{6*б}} I_{бI} = \frac{E''_{*б}}{x_{6*б}} \frac{S_{б}}{\sqrt{3}U_{бI}} = \frac{1}{175} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,524$$

Полный ток в месте КЗ равен 15,556 кА. ▸

**Пример 1.3.** Для схемы из примера 1.2 произвести расчет сверхпереходных токов КЗ, протекающих от синхронного двигателя, асинхронного двигателя и обобщенной нагрузки в именованных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации при трехфазном повреждении в точке  $k$ . Электрические двигатели до возникновения повреждения и нагрузка до повреждения работали в номинальном режиме.

◁ Определим сопротивления электрических двигателей и нагрузки, приведенные к основной ступени:

$$x_4 = x''_{СД} = \frac{U_n^2 \cos \varphi_{СД}}{P_{СД}} = 0,144 \frac{6^2 \cdot 0,9}{6,3} = 0,741 \text{ Ом},$$

$$x_5 = x''_{АД} = \frac{U_n^2 \cos \varphi_{АД}}{P_{АД}} = \frac{1}{k_{пуск}} \frac{U_n^2 \cos \varphi_{АД}}{P_{АД}} = \frac{1}{6,6} \frac{6^2 \cdot 0,905}{1,25} = 3,94 \text{ Ом},$$

$$x_6 = x_{нагр} = \frac{U_n^2}{S_{нагр}} = 0,35 \frac{6,3^2}{2} = 6,95 \text{ Ом}.$$

Определим ЭДС электрических двигателей и нагрузки в именованных единицах, приведенные к ОС:

в относительных единицах

$$E''_{СД*н} = U_{*н} + I_{*н} x''_{СД} \sin \varphi_{СД} = 1 + 1 \cdot 0,144 \cdot 0,436 = 1,063$$

в именованных -

$$E''_{СД} = E''_{СД*н} U_n = 1,063 \cdot 6 = 6,378 \text{ кВ};$$

в относительных единицах

$$E''_{AD*H} = U_{*H} - I_{*H} x''_{AD} \sin \varphi_{AD} = 1 - 1 \cdot \frac{1}{6,6} 0,425 = 0,935,$$

в именованных -

$$\overset{\circ}{E''}_{AD} = E''_{AD*H} U_H = 0,935 \cdot 6 = 5,61 \text{ кВ};$$

в именованных -

$$\overset{\circ}{E''}_{нагр} = E''_{нагр*H} U_H = 0,85 \cdot 6,3 = 5,355 \text{ кВ}.$$

Токи в ветвях схемы:

$$I''_{КСД} = \frac{\overset{\circ}{E''}_{СД}}{\sqrt{3} \overset{\circ}{x}_4} = \frac{6,378}{\sqrt{3} \cdot 0,741} = 4,975 \text{ кА},$$

асинхронный электродвигатель

$$I''_{кАД} = \frac{\overset{\circ}{E''}_{АД}}{\sqrt{3} \overset{\circ}{x}_5} = \frac{5,61}{\sqrt{3} \cdot 3,94} = 0,823 \text{ кА},$$

обобщенная нагрузка

$$I''_{к.нагр} = \frac{\overset{\circ}{E''}_{нагр}}{\sqrt{3} \overset{\circ}{x}_5} = \frac{5,355}{\sqrt{3} \cdot 6,95} = 0,445 \text{ кА}. \triangleright$$

### 1.5. Мощность короткого замыкания

При выборе выключателей его номинальный ток отключения сопоставляют с величиной тока КЗ, которая имеет место в расчетный момент отключения повреждения. Соответственно, если этот выбор производится по номинальной мощности отключения, то она должна быть сопоставлена с так называемой мощностью КЗ

$$S_{kt} = \sqrt{3} U_{ср.н} I_{kt},$$

где  $I_{kt}$  - ток КЗ в расчетный момент времени,  $U_{ср.н}$  - среднее номинальное напряжение той ступени, где установлен выключатель.

В относительных единицах при  $U_{\bar{o}} = U_{ср.н}$  мощность равна току

$$S_{k*} = I_{k*} = \frac{I}{x_{\bar{o}* \bar{o}}}, \text{ откуда } S_k = S_{k*} S_{\bar{o}} = S_{\bar{o}} / x_{\bar{o}* \bar{o}}.$$

Поэтому расчеты можно вести непосредственно для мощностей КЗ. Мощность отключения выключателя по ГОСТу 687-70 дается при наибольшем рабочем напряжении.

#### Контрольные вопросы к главе 1

1. Короткие замыкания. Причины, виды, последствия.
2. Назначение расчетов токов КЗ. Основные требования и допущения.

3. Система относительных единиц.
4. Формулы определения сопротивлений основных элементов энергосистем в именованных единицах.
5. Формулы для определения сопротивлений основных элементов энергосистем в относительных единицах.
6. Математические модели синхронных генераторов, силовых трансформаторов (автотрансформаторов), линий электропередачи, кабелей, реакторов, электрических двигателей, обобщенной нагрузки, системы для расчета токов КЗ.
7. Эквивалентные преобразования электрических схем (преобразование двух параллельно включенных источников ЭДС с различными ЭДС и внутренними сопротивлениями, преобразование звезды в треугольник и обратное преобразование).
8. Порядок расчета тока КЗ в именованных единицах.
9. Порядок расчета тока КЗ в относительных единицах.
10. Точное и приближенное приведение коэффициентов трансформации при выполнении расчетов токов КЗ.
11. Мощность КЗ.

#### Задачи к главе 1

1. Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ при трехфазном повреждении в точке  $K$  для схем участков энергосистемы, приведенных на рис.1.12,а,в именованных и относительных базисных единицах с точным и приближенным приведением коэффициентов трансформации. Генераторы до возникновения повреждения работали в номинальном режиме.

Параметры основных элементов схем приведены в таблице. Недостающие параметры элементов схемы выбрать в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Все параллельно работающие элементы сети рекомендуется выбирать однотипными. Количество параллельно включенных элементов должно быть не менее двух. Суммарная мощность всех трансформаторов электрической станции (ЭС) должна быть не менее полной мощности всех генераторов (ТГ-турбогенераторы, ГГ-гидрогенераторы). Длина линии Л2 выбирается по напряжению обмотки среднего напряжения (авто) трансформатора подстанции (п/ст). Погонное сопротивление линии выбирается по напряжению.

Результаты расчетов токов КЗ представить в виде таблицы.

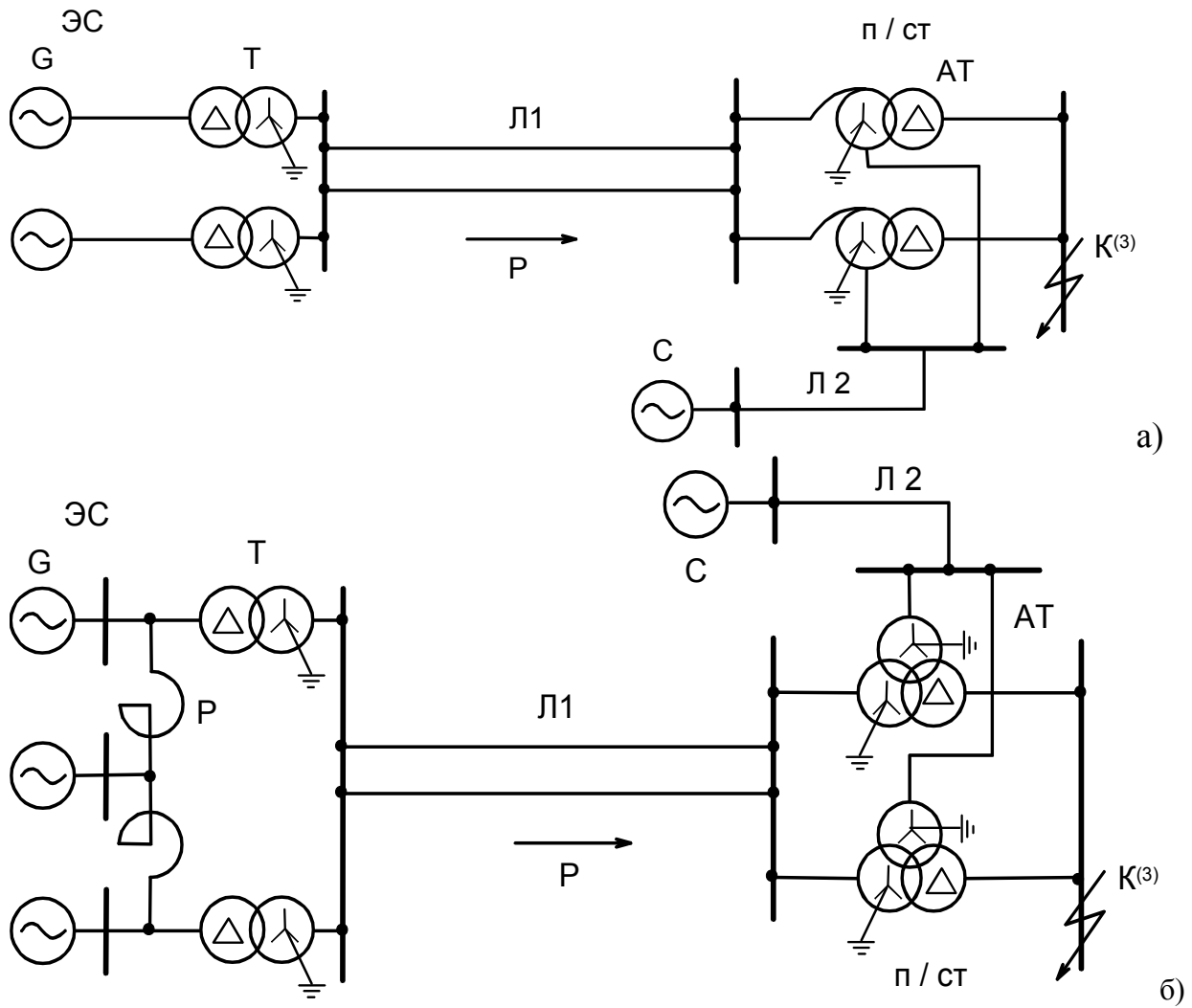


Рис.1.11

№ п.п.	Последняя цифра шифра	Схема на рис.1.11	Тип генераторов	$P_{ген}, \text{МВт}$	Длина линии Л1, км	Мощность (авто) трансформаторов п/ст, МВА	Сопротивление системы, Ом
1	0	а)	ГГ	170-220	240-260	120-150	18
2	1	а)	ТГ	380-410	140-170	120-150	16
3	2	а)	ТГ	580-620	280-300	200-260	25
4	3	а)	ГГ	750-810	190-210	200-260	22
5	4	а)	ГГ	1150-1400	1100-1200	800-1000	26
6	5	а)	ТГ	1600-1800	700-900	900-1000	23
7	6	б)	ТГ	50-60	130-160	120-140	9
8	7	б)	ТГ	90-100	40-60	120-140	11
9	8	б)	ТГ	180-210	230-250	150-260	12
10	9	б)	ТГ	390-420	140-150	190-260	14



2. Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ для заданного участка энергосистемы (рис.1.12) при трехфазном КЗ в точке  $K$  в именованных и относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации и в именованных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации. Электрические двигатели до возникновения повреждения работали в номинальном режиме. Параметры элементов схем приведены таблице. Длина кабеля выбирается по напряжению. Студенты, последняя цифра шифра студенческого билета, которых нечетная – расчет производят для точки  $K_1^{(3)}$ , четная – для точки  $K_2^{(3)}$ .

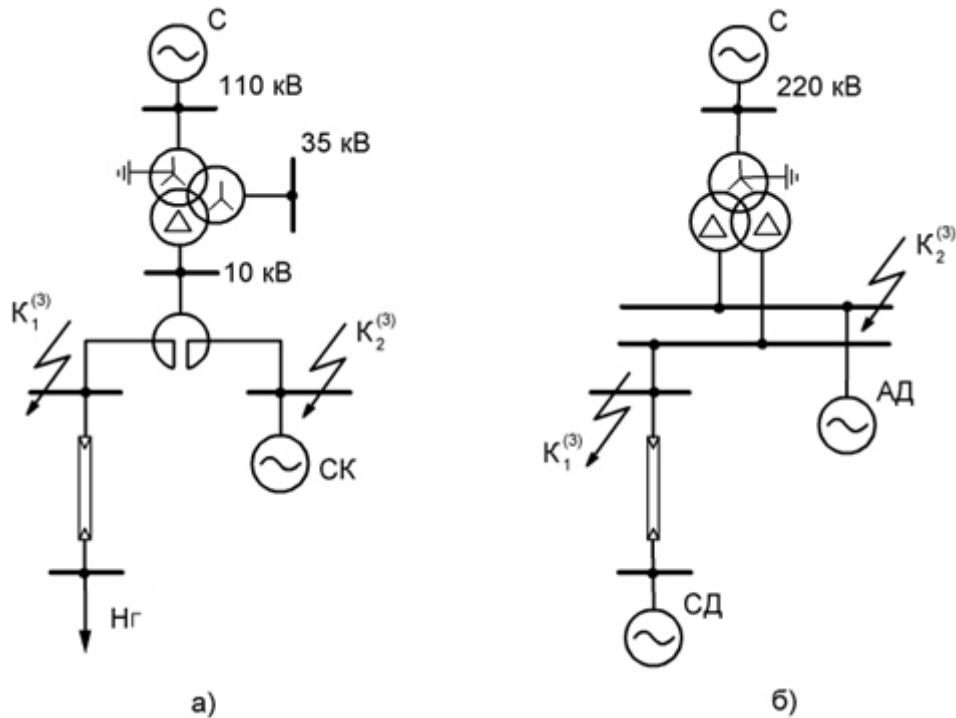


Рис.1.12

№ п.п.	Последняя цифра шифра	Схема рис. 1.12	$S_C$ , МВА	$S_T$ , МВА	$S_{СК}$ , МВАр	$S_{HГ}$ , МВА	$P_{СД}$ , МВт	$P_{АД}$ , МВт	Ток реактора, кА
1	1	а)	500	50-150	15	10			0,63
2	2	б)	2000	90-140			$5 \times 0,4$	$6 \times 0,4$	
3	3	а)	600	60-150	15	11			0,63
4	4	б)	2200	100-210			$4 \times 1,25$	$5 \times 0,63$	
5	5	а)	700	140-210	15	12			0,63
6	6	б)	2400	160-210			$3 \times 6,3$	$4 \times 0,8$	
7	7	а)	900	150-220	30	13			2,5
8	8	б)	2600	210-300			$2 \times 10,0$	$5 \times 1,0$	
9	9	а)	1400	190-260	60	15			2,5
10	0	б)	2800	260-410			$3 \times 10,0$	$5 \times 1,25$	

## 2. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ (ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ)

Расчет токов КЗ при несимметричных повреждениях может быть выполнен, решив систему уравнений, составленных для всех контуров сети. Однако технически это сложно сделать из-за большого количества уравнений и необходимости знать взаимные индуктивности у элементов энергосистемы. Более предпочтительным является преобразование исходной трехфазной цепи в три однофазные, для которых отдельно производятся расчеты токов, а полный ток получают путем геометрического суммирования токов однофазных цепей. Наиболее часто для расчета несимметричных КЗ используется метод симметричных составляющих (МСС).

В данном разделе рассмотрены методы расчета токов КЗ при однократном несимметричном КЗ, т.е. при однократной поперечной несимметрии. При этом предполагается, что электрическая сеть является симметричной, а несимметрия возникает только вследствие КЗ.

### 2.1. Метод симметричных составляющих

#### 2.1.1 Основные понятия метода симметричных составляющих

Основная физическая сущность метода симметричных составляющих заключается в том, что, составляющие разных последовательностей между собой не взаимодействуют, что позволяет изображать схемы замещения отдельно для каждой последовательности. Источники ЭДС ( $\dot{E}_s$ ) являются источниками ЭДС прямой последовательности. ЭДС источников обратной и нулевой последовательностей равны нулю.

Несимметричную трехфазную систему произвольных векторов  $\dot{F}_j$  ( $j = A, B, C$ ) можно разложить на три симметричных системы векторов прямой (1), обратной (2) и нулевой (0) последовательностей (рис.2.1):

$$\dot{F}_A = \dot{F}_{1A} + \dot{F}_{2A} + \dot{F}_{0A}; \quad \dot{F}_B = \dot{F}_{1B} + \dot{F}_{2B} + \dot{F}_{0B}; \quad \dot{F}_C = \dot{F}_{1C} + \dot{F}_{2C} + \dot{F}_{0C}. \quad (2.1)$$

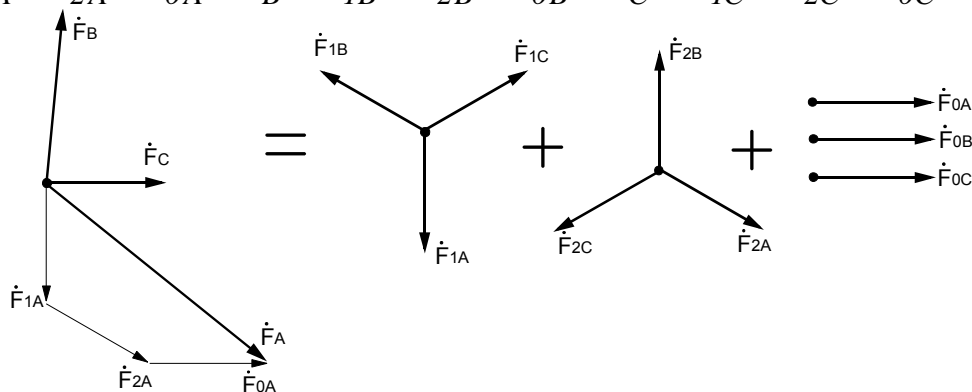


Рис. 2.1

Симметричные составляющие в электрической сети появляются в результате разложения несимметричной системы векторов.

Для удобства теоретических выводов вводится специальный оператор фазы (фазный множитель)

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Таким образом, оператор фазы является вектором, модуль которого равен 1, а аргумент  $120^\circ$ . При умножении произвольного вектора на оператор фазы, происходит поворот исходного вектора на  $120^\circ$  в положительном направлении без изменения его длины.

Основные свойства оператора фазы:

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}, \quad a^3 = e^{j360^\circ} = 1, \\ a^2 + a + 1 = 0, \quad a^2 - a = -j\sqrt{3}.$$

Введение оператора фазы позволяет выразить два вектора каждой симметричной системы (2.1) через третий вектор той же системы, например, через вектор  $\dot{F}_{iA}$  ( $i = 1, 2, 0$ ):

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_A &= \dot{F}_{1A} + \dot{F}_{2A} + \dot{F}_0 \\ \dot{F}_B &= a^2 \dot{F}_{1A} + a \dot{F}_{2A} + \dot{F}_0 \\ \dot{F}_C &= a \dot{F}_{1A} + a^2 \dot{F}_{2A} + \dot{F}_0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

при этом  $\dot{F}_0 = \dot{F}_{0A} = \dot{F}_{0B} = \dot{F}_{0C}$ .

Решение системы уравнений (2.2) дает формулы для определения симметричных составляющих

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_{1A} &= \frac{1}{3} \left[ \dot{F}_A + a \dot{F}_B + a^2 \dot{F}_C \right] \\ \dot{F}_{2A} &= \frac{1}{3} \left[ \dot{F}_A + a^2 \dot{F}_B + a \dot{F}_C \right] \\ \dot{F}_0 &= \frac{1}{3} \left[ \dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C \right] \end{aligned} \right\}. \quad (2.3)$$

Системы уравнений (2.2) и (2.3) однозначно устанавливают связь между фазными величинами и их симметричными составляющими и являются основными уравнениями МСС. Приведенные выражения справедливы для всех электрических векторов, например, токов, напряжений, ЭДС и т.п.

Степень несимметрии системы векторов характеризуется коэффициентом несимметрии  $b_2 = F_2 / F_1$ , а степень неуравновешенности - коэффициентом неуравновешенности  $b_0 = F_0 / F_1$ . В нормальном симметричном режиме и при трехфазном КЗ  $b_2 = 0$  и  $b_0 = 0$ .

При замыкании на землю в токах и напряжениях содержатся составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, при междуфазных замыканиях только прямой и обратной.

### 2.1.2 Схемы замещения отдельных последовательностей

Так как разноименные последовательности не взаимодействуют между собой это позволяет составлять отдельно схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Ниже приведены рекомендации по составлению схем замещения отдельных последовательностей.

Схема замещения прямой последовательности (СЗПП). Эта схема имеет такую же структуру и параметры элементов, как и схема замещения при трехфазном КЗ, отличается от нее только тем, что в место повреждения включен источник напряжения прямой последовательности  $\dot{U}_{1k}$ .

Схема замещения обратной последовательности (СЗОП). Схема имеет такую же структуру и параметры элементов, как и схема замещения при трехфазном КЗ, за исключением элементов с подвижными магнитосвязанными цепями (генераторы, электрические двигатели, синхронные компенсаторы); источники ЭДС генераторов закорочены (их сопротивления с течением времени неизменны), в место повреждения включен источник напряжения обратной последовательности  $\dot{U}_{2k}$ . Для всей схемы замещения обратной последовательности, как правило,  $x_{1\vartheta} = x_{2\vartheta}$ , поэтому при выполнении производственных расчетов схемы замещения обратной последовательности иногда не изображают.

Схема замещения нулевой последовательности (СЗНП) определяется путями протекания тока нулевой последовательности  $\dot{I}_{0k}$ . Составление схемы рекомендуется начинать с точки КЗ, в которую включается источник напряжения нулевой последовательности  $\dot{U}_{0k}$ . Условием для протекания тока нулевой последовательности является наличие элементов с заземленными нейтральными электрически связанных с точкой КЗ.

Схемам замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей соответствуют первое, второе и третье уравнение системы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_\vartheta - \dot{I}_1 Z_{1\vartheta} \\ \dot{U}_2 &= -\dot{I}_2 Z_{2\vartheta} \\ \dot{U}_0 &= -\dot{I}_0 Z_{0\vartheta} \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

где  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$  - напряжения и токи, прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно,  $Z_{1\vartheta}, Z_{2\vartheta}, Z_{0\vartheta}$  - суммарные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей,  $\dot{E}_\vartheta$  - суммарная (эквивалентная) ЭДС (за положительное направление тока принимается направление к месту повреждения). Система уравнений (2.4) записана для установившегося синусоидального режима, однако в операторной форме справедлива и для переходного режима.

## 2.2. Сопротивления машин и аппаратов токам обратной и нулевой последовательностей

*Все сопротивления, которыми характеризовались элементы схемы замещения при трехфазных КЗ (а также в нормальном режиме), являются сопротивлениями для токов прямой последовательности, так как ток трехфазного КЗ является только током прямой последовательности.*

Для элементов с неподвижными магнитосвязанными цепями (системы, (авто) трансформаторы, реакторы, воздушные линии, кабели) сопротивления прямой и обратной последовательностей равны между собой, так как не зависят от порядка следования фаз.

Для элементов с подвижными друг относительно друга магнитосвязанными цепями (синхронные и асинхронные машины) сопротивления прямой и обратной последовательностей, в общем случае, различны.

У синхронных машин магнитный поток, созданный токами обратной последовательности, вращается в обратную по отношению к ротору сторону, т.е. вращается относительно ротора с двойной синхронной скоростью. Поэтому в обмотке возбуждения и демпферных контурах наводятся токи двойной частоты. Поток статора вытесняется из ротора, поэтому сопротивление обмотки статора определяется, в основном, потоками рассеяния статора.

Сопротивление синхронной машины с демпферными контурами турбогенератора токам обратной последовательности, без учета высших гармонических, с достаточной для практики точностью определяется как средняя величина между сопротивлениями по продольной и поперечной осям  $x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}$ , без демпферных обмоток -  $x_2 = \sqrt{x_d' x_q}$ . Приближенно можно считать: для машин с демпферными контурами  $x_2 = 1,22 x_d''$ , для машин без демпферных контуров  $x_2 = 1,45 x_d''$ . В практических расчетах обычно приближенно считают  $x_2 \approx x_d''$ . Это не приводит к большим погрешностям, так как в комплексную схему замещения, кроме сопротивлений обратной последовательности входят сопротивления прямой последовательности, а если повреждение происходит не на выводах генераторов, то и внешние по отношению к генератору сопротивления.

В асинхронных двигателях протекают процессы подобные процессам в синхронных машинах с демпферными обмотками. Сопротивление обратной последовательности (ротор симметричный)  $x_2 = x'' \approx 0,2$ . Для обобщенной нагрузки сопротивление обратной последовательности также равно сопротивлению прямой последовательности  $x_{2нагр} = x_{1нагр} = 0,35$ . *Необходимо отметить, что сопротивления обратной последовательности электрических машин и обобщенной нагрузки в течение переходного процесса постоянны и равны начальному значению.*

Генераторы и электрические двигатели обычно работают с незаземленными нейтралями и поэтому не входят в схему замещения нулевой последовательности.

В отличие от генератора, система имеет заземлённые нейтрали, поэтому всегда входит в схему замещения нулевой последовательности. Сопротивление системы токам нулевой последовательности всегда превышает сопротивление системы токам прямой последовательности (трёхфазного КЗ) и задаётся в исходных данных.

Схема замещения и сопротивление нулевой последовательности  $x_0$  (авто) трансформатора зависят от схемы соединения обмоток и конструкции его магнитопровода. Прежде всего, необходимо отметить,  $x_0 \rightarrow \infty$  со стороны обмотки (авто) трансформатора, соединённой в треугольник или звезду без заземлённой нейтрали, так как приложенное напряжение нулевой последовательности не может вызвать ток в обмотке трансформатора независимо от схемы соединения остальных обмоток. Следовательно, (авто) трансформатор может включаться в схему замещения нулевой последовательности при наличии электрической связи обмотки, соединённой в звезду с заземлённой нейтралью. Схемы соединения обмоток трансформаторов и их схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов приведены на рис.2.2.

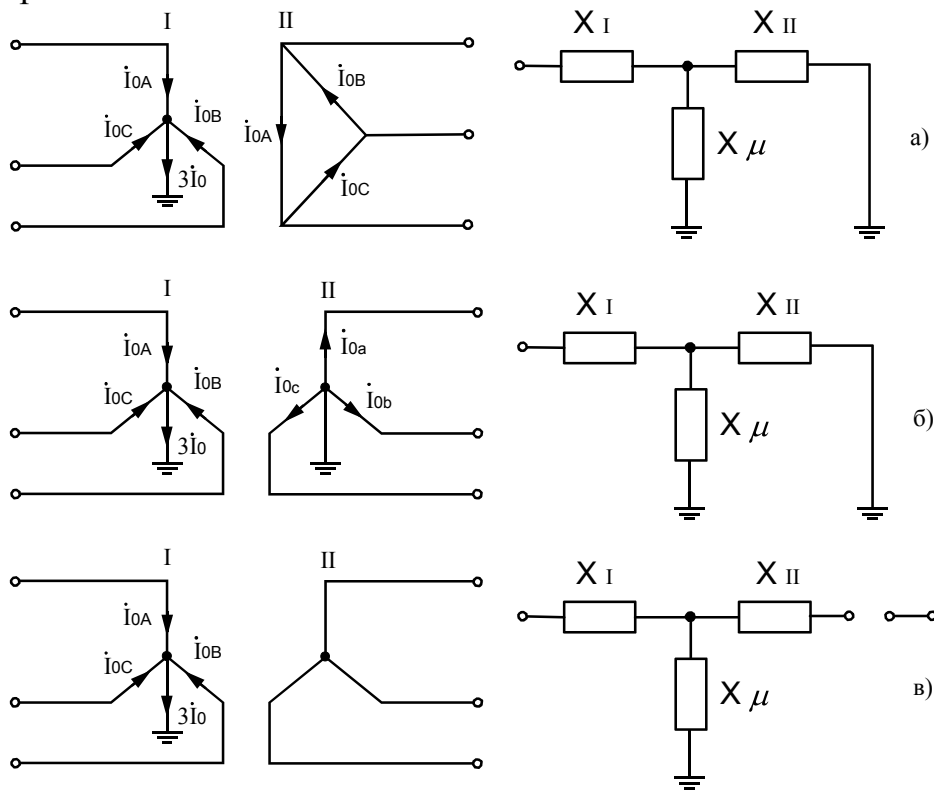


Рис.2.2

При соединении обмоток трансформатора по схеме  $\star / \nabla$  рис.2.2,а ток нулевой последовательности протекает по обмотке, соединённую в звезду, трансформируется в обмотку, соединённую в треугольник, и там циркулирует, не попадая в дальнейшую часть схемы. На схеме замещения это отражается закорачиванием обмотки, соединённой в треугольник, на землю. Вся сеть, включенная за треугольником, не входит в схему замещения, независимо от того имеются ли там обмотки с заземлёнными нейтралью.

При соединении обмоток  $\star / \star$  схема замещения обеспечивает проведение тока нулевой последовательности, если в схеме имеются элементы с заземлённой нейтралью (рис. 2.2,б). Если последнее условие не выполняется, то его схема замещения такая же, как и при соединении обмоток  $\star / \star$  (рис. 2.2,в).

На основе приведенных схем замещения двухобмоточных трансформаторов составляются схемы замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов. Необходимо при этом отметить, что у автотрансформаторов нейтраль всегда заземлена, а у части трансформаторов напряжением 110 кВ она может незаземляться (для снижения токов однофазного КЗ).

Если в нейтраль трансформатора включено сопротивление (реактор) для ограничения токов однофазного КЗ, то через него протекает ток  $3 I_0$ . В схеме замещения нулевой последовательности это учитывается увеличением втрое сопротивления в нейтрали трансформатора.

Величина сопротивления ветви намагничивания ( $x_\mu$ ) зависит от конструкции магнитопроводов трансформаторов. Для трансформаторной группы, составленной из однофазных трансформаторов, а также для четырёхстержневых и броневых трансформаторов имеется путь для магнитного потока с малым магнитным сопротивлением, а так как для любого устройства и физической среды  $\varepsilon\mu = \text{const}$ , поэтому электрическое сопротивление  $x_\mu \rightarrow \infty$ . У трёхстержневого трансформатора путь для замыкания магнитного потока проходит через масло трансформатора, кожух трансформатора, изоляцию. В этом случае магнитное сопротивление для потока оказывается большим, а электрическое сопротивление ветви намагничивания составляет порядка  $x_{*\mu} \approx 0,3 \div 1,0$ .

Для приведенных выше схем трансформаторов сопротивления имеют следующие значения:

- для всех типов и конструкций при соединении обмоток по схеме  $\star / \star$ 

$$x_0 = x_I = x_{II},$$
- для трёхфазных групп из однофазных трансформаторов, броневых и четырёхстержневых:
  - при соединении обмоток  $\star / \star$   $x_0 \rightarrow \infty$ ,
  - при соединении обмоток  $\star / \star$   $x_0 = x_I = x_{II}$ ;
- для трёхфазных трёхстержневых трансформаторов
  - при соединении обмоток  $\star / \star$   $x_0 = x_I + x_\mu$ ,
  - при соединении обмоток  $\star / \star$  следует использовать полную схему замещения с учётом  $x_\mu$ .

Сопротивление реактора главным образом определяется собственной индуктивностью каждой фазы (взаимоиндукция между фазами относительно мала), поэтому  $x_0 = x_2 = x_1$ .

### 2.3. Сопротивление линий электропередачи токам нулевой последовательности

*Одноцепная линия.* Сопротивление нулевой последовательности трехфазной воздушной линии складывается из собственного сопротивления фазы  $x_{\text{ног.с}}$  и двух взаимных сопротивлений (остальных фаз)  $x_{\text{ног.вз1}}$  и  $x_{\text{ног.вз2}}$

$$x_{\text{ног.л}} = x_{\text{ног.с}} + x_{\text{ног.вз1}} + x_{\text{ног.вз2}}.$$

Векторы токов (напряжений и потоков) нулевой последовательности всех фаз совпадают по направлению. Приближенно считая, что проводники трехфазной линии расположены в вершинах равностороннего треугольника или выполнен полный цикл транспозиции проводов, запишем

$$\begin{aligned} x_{\text{ног.л}} &= x_{\text{ног.с}} + 2x_{\text{ног.вз}} = \\ &= 0,145 \lg \frac{D_3}{r_3} + 2 \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}} = 0,435 \frac{D_3}{\sqrt[3]{r_3 D_{\text{ср}}^2}}, \end{aligned}$$

где  $r_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_3 D_{\text{ср}}^2}$  - средний геометрический радиус системы трех проводов.

С физической точки зрения между сопротивлениями прямой  $x_1$  и нулевой  $x_0$  последовательностей линии имеется глубокое различие. Для токов нулевой последовательности потоки взаимоиндукции увеличивают поток линии и пропорциональное ему сопротивление; для токов прямой (обратной) последовательности потоки взаимоиндукции оказывают размагничивающее действие, что приводит к уменьшению сопротивления. Таким образом,  $x_0$  линии всегда оказывается большим  $x_1(x_2)$ .

*Двухцепная линия.* Для двухцепной воздушной линии  $x_0$  каждой цепи дополнительно увеличивается вследствие взаимоиндукции от проводов второй параллельной линии (КЗ предполагается за пределами линии или на одном из ее концов).

Так как векторы токов (и потоков) нулевой последовательности обеих цепей совпадают по направлению, то сопротивление линии определяется по формуле

$$x_{\text{ног.л}} = x_{\text{ног.с}} + 2x_{\text{ног.вз}} + 3x'_{\text{ног.вз}},$$

где  $x'_{\text{ног.вз}}$  - сопротивление, обусловленное потоками от проводов соседней линии.

Очевидно, что

$$x'_{\text{ног.вз}} = 0,145 \lg \frac{D_3}{D'_{\text{ср}}},$$

где  $D'_{\text{ср}} = \sqrt[9]{d_{AA'}d_{AB'}d_{AC'}d_{BA'}d_{BB'}d_{BC'}d_{CA'}d_{CB'}d_{CC'}}$  - среднее геометрическое расстояние между параллельными цепями. Тогда, предполагая, что линии идентичны, получим



$$x_{\text{ног.л}} = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_3} + 2 \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{cp}} + 3 \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D'_{cp}} = 0,872 \lg \frac{D_3}{\sqrt[6]{r_3 D_{cp}^2 D'_{cp}}}$$

Таким образом, наличие второй цепи приводит к увеличению сопротивления линии токам нулевой последовательности. Если линии находятся друг от друга на расстоянии более 400-500 м, то их взаимным влиянием можно пренебречь.

Если КЗ на землю происходит на одной из линий (рис.2.3,а, где  $\alpha$  - доля длины линии до места КЗ), то следует воспользоваться схемой замещения, приведенной на рис.2.3,б. Здесь  $x_{I-II0}$  - сопротивление взаимоиндукции,  $x_0$  - сопротивление нулевой последовательности для одной трехфазной линии без учета второй,  $x_\sigma = x_0 - x_{I-II0}$ .

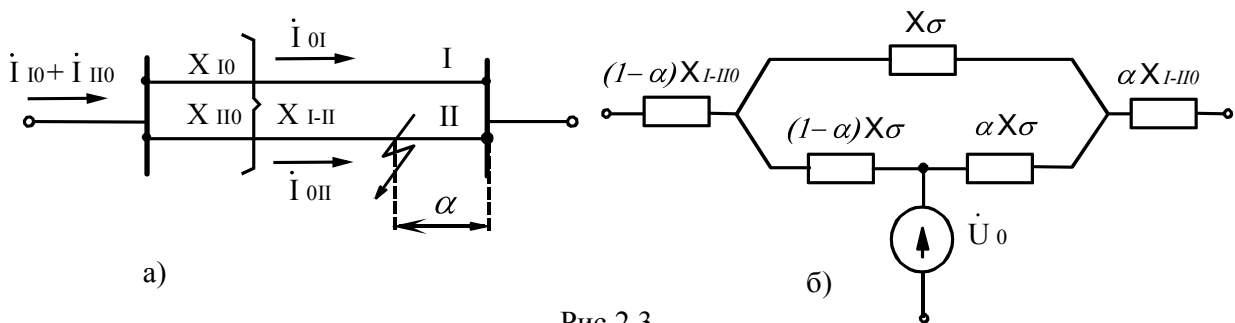


Рис.2.3

Рассмотрим влияние грозозащитных тросов, предназначенных для защиты от попаданий молнии, на сопротивление нулевой последовательности линии. Тросы подвешиваются на опорах линии на изоляторах и разрезаются на ряд участков. С одного конца участка тросы заземляют, а с другого – оставляют искровой промежуток, который пробивается при перенапряжениях. При этом тросы не оказывают влияния на сопротивление нулевой последовательности линии.

*Однако в электрических сетях находятся в эксплуатации и линии старой конструкции, в которых тросы заземлялись на каждой опоре вместе с мачтой. При этом ток нулевой последовательности возвращается к месту повреждения по земле и грозозащитному тросу. Поток взаимоиндукции оказывает размагничивающее действие, что приводит к уменьшению сопротивления линии. Степень размагничивания зависит от проводимости троса. Стальные тросы оказывают меньшее влияние по сравнению с алюминиевыми.*

Приближенно определить сопротивление линии токам нулевой последовательности можно, используя следующие данные

№ п.п.	Конструкция линии	$x_0 / x_1$
1	Одноцепная линия без влияния тросов	3,5
2	Одноцепная линия со стальными тросами, заземленными на каждой опоре	3,0
3	Двухцепная линия без влияния тросов	5,5
4	Двухцепная линия со стальными тросами, заземленными на каждой опоре	4,7

**Кабельная линия.** Так как кабели прокладываются на небольшой глубине (обычно около 1 м) подземную цепь провод-земля можно рассматривать как воздушную однопроводную линию. Следовательно, если бы трехжильный кабель не обладал проводящей оболочкой, то его сопротивление нулевой последовательности можно было бы определить так же, как и трехфазной воздушной линии, подставив в приведенные выше формулы средний геометрический радиус его жил.

Оболочка кабеля заземляется по его концам и на муфтах, образуя для токов нулевой последовательности путь параллельный земле. В этом отношении заземленная оболочка кабеля аналогична заземленному тросу воздушной линии. При замыкании токоведущей жилы на оболочку часть тока нулевой последовательности возвращается по оболочке, другая – по земле. Распределение токов между оболочкой и землей зависит от сопротивления оболочки и сопротивления ее заземления. Так как оболочка кабеля охватывает все его жилы, то магнитный поток от тока оболочки полностью сцеплен с жилами, т.е. не обладает потоками рассеяния. Следовательно, если пренебречь активным сопротивлением оболочки, то независимо от сопротивлений ее заземления токи нулевой последовательности будут возвращаться только по оболочке. Поэтому реактивная составляющая сопротивления нулевой последовательности  $x_0 = 4,5 - 4,5 x_1$  (при отсутствии данных можно приближенно принять  $x_1 = 0,07$  Ом/км). Истинные значения параметров нулевой последовательности кабелей можно получить только с помощью экспериментальных испытаний.

**Пример 2.1.** Для схемы, приведенной на рис.2.4. построить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

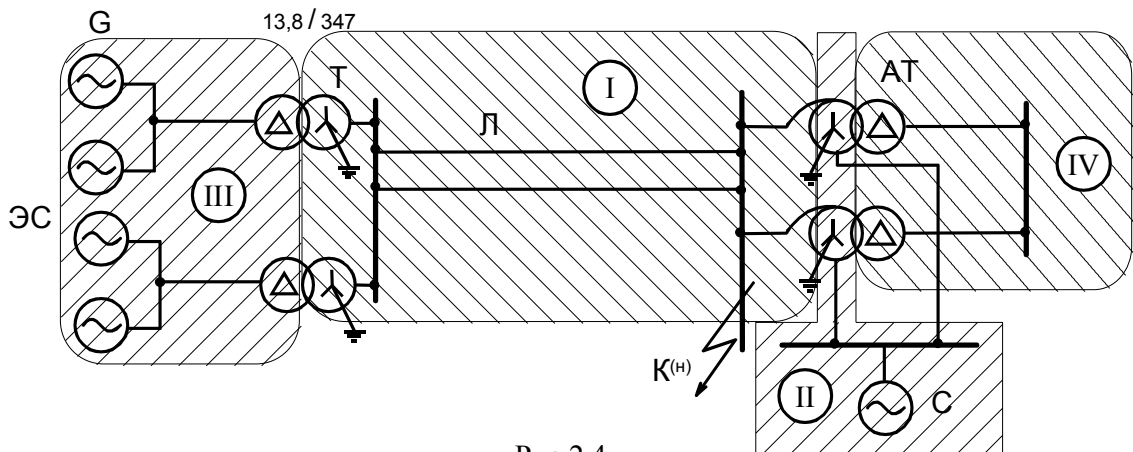


Рис.2.4

◁ Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей приведены на рис.2.5 (а – прямой, б – обратной, в – нулевой последовательности соответственно). Сопротивления элементов схемы замещения прямой последовательности такие же, как и в схеме замещения для трехфазного КЗ. В схеме замещения обратной последовательности величина сопротивления генератора в общем случае отличается от сопротивления прямой последовательности (поэтому использован другой порядковый номер).

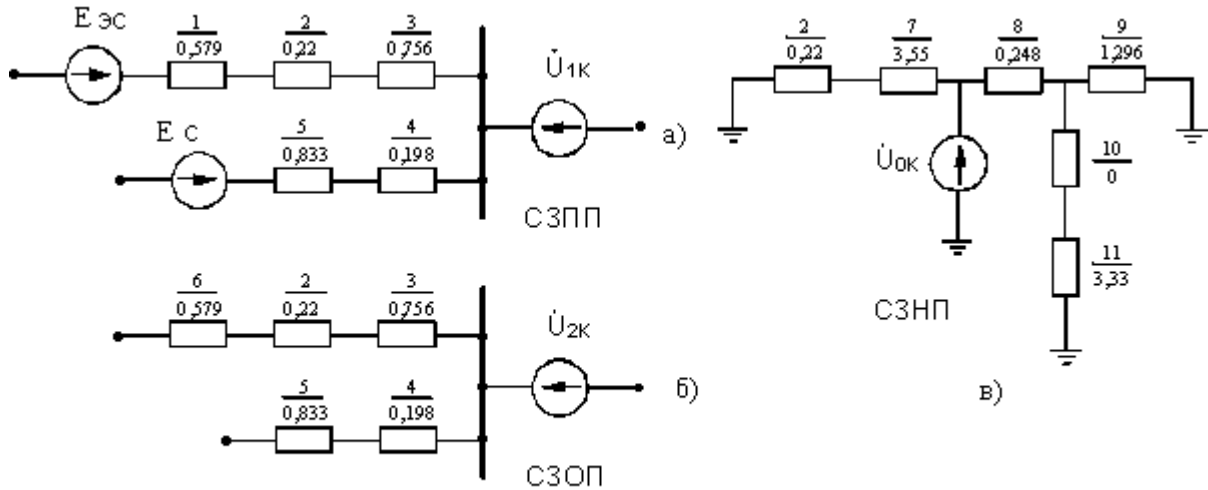


Рис.2.5

В схему замещения нулевой последовательности генератор не входит, так как присоединен к обмоткам трансформатора, соединенные в треугольник, а сопротивления линии и системы отличаются от сопротивлений прямой (обратной) последовательностей. ▷

## 2.4. Определение токов при несимметричных коротких замыканиях

В дальнейшем будем считать, что повреждение происходит на отпайке, что позволяет исключить из рассмотрения токи нагрузки.

Фазу *A* будем считать “особой фазой”, т.е. процессы в ней будут отличаться от процессов в двух других фазах (*B* и *C*). Так однофазное КЗ будет рассматриваться в фазе *A*, а двухфазное КЗ и двухфазное КЗ на землю – в фазах *B* и *C*. Переходное сопротивление в месте КЗ, если это специально не оговаривается будем считать равным нулю, т.е. будем рассматривать металлическое КЗ. На основании законов Кирхгофа имеем 3 уравнения (2.4), в которых 6 неизвестных. Недостающие 3 уравнения будем брать исходя из граничных условий (соотношений для фазных токов и напряжений).

**2.4.1. Двухфазное короткое замыкание.** Рассмотрим двухфазное КЗ между фазами *B* и *C* (рис.2.6).

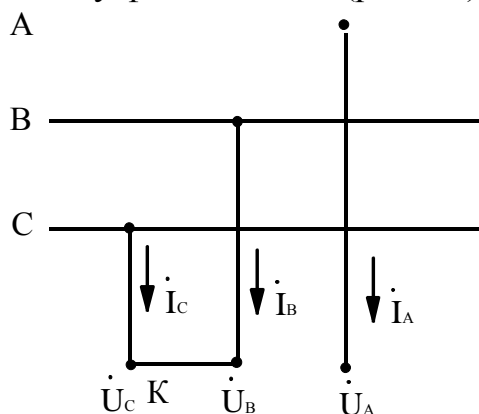


Рис.2.6.

Граничные условия при двухфазном КЗ:

$$I_A = 0, I_B = -I_C, U_B = U_C.$$

Подставив граничные условия для токов в систему уравнений (2.4), получим

$$I_{kA1} = \frac{aI_B - a^2I_C}{3}, I_{kA2} = \frac{a^2I_B - aI_C}{3},$$

$$I_{kA0} = \frac{I_B - I_C}{3} = 0.$$

Из первых двух соотношений  $I_{kA1} = -I_{kA2}$ . Из последнего выражения, следует, что и

$\dot{U}_{kA0} = 0$ , т.е. при  $K^{(2)}$  нулевая последовательность отсутствует.

Подставив граничные условия для напряжений в систему уравнений (2.3), получим

$$\frac{a^2 \dot{U}_{kA1} + a \dot{U}_{kA2}}{3} = \frac{a \dot{U}_{kA1} + a^2 \dot{U}_{kA2}}{3},$$

следовательно,  $\dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2}$ .

Таким образом, в месте двухфазного КЗ связь между симметричными составляющими устанавливается следующими соотношениями

$$\dot{I}_{kA1} = -\dot{I}_{kA2}, \dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2}, \dot{U}_{kA0} = 0, \dot{I}_{kA0} = 0. \quad (2.5)$$

Подставляя соотношения (2.5), в первое уравнение системы (2.4), получим

$$\dot{E}_{A\vartheta} - j\dot{I}_{kA1}x_{1\vartheta} = -j\dot{I}_{kA2}x_{2\vartheta} = j\dot{I}_{kA1}x_{2\vartheta}.$$

Откуда ток прямой последовательности

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{E_{A\vartheta}}{j(x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta})}. \quad (2.6)$$

Ток КЗ поврежденной фазы, например, фазы  $B$

$$\dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kB1} + \dot{I}_{kB2} = a^2 \dot{I}_{kA1} + a \dot{I}_{kA2} = (a^2 - a) \dot{I}_{kA1}.$$

Так как  $a^2 - a = -j\sqrt{3}$ , то  $\dot{I}_{kB} = j\sqrt{3}\dot{I}_{kA1}$ .

Модуль тока

$$I_{kB} = \frac{\sqrt{3}E_{A\vartheta}}{x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta}}.$$

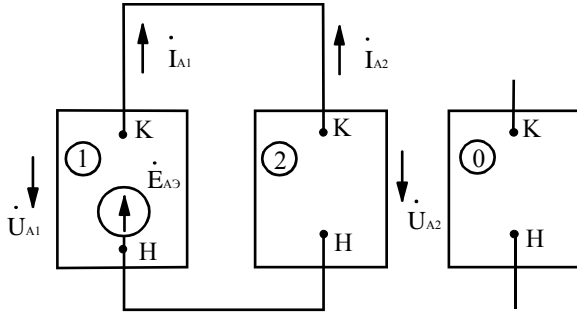


Рис.2.7.

Комплексная схема замещения при двухфазном КЗ, построенная в соответствие с соотношениями (2.6), изображена на рис.2.7, здесь "н"- начало, "к" – конец схемы, 1, 2, 0 – соответственно схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. При двухфазном КЗ токи и напряжения нулевой последовательности отсутствуют,

поэтому схема замещения нулевой последовательности в комплексную схему замещения не входит.

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте повреждения приведены на рис.2.8,а и б соответственно. Диаграммы построены для индуктивной цепи, поэтому токи прямой последовательности отстают от соответствующих напряжений на  $90^\circ$ .

Как видно из последнего рисунка здесь выполняются граничные условия.

#### 2.4.2. Однофазное короткое замыкание

Рассмотрим замыкание фазы *A* на землю (рис.2.9).

Граничные условия

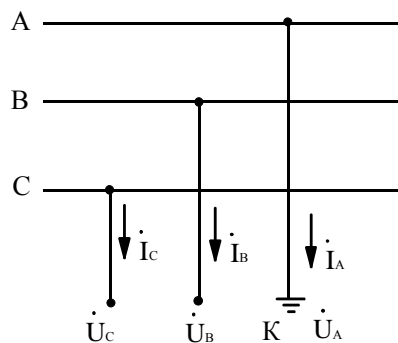
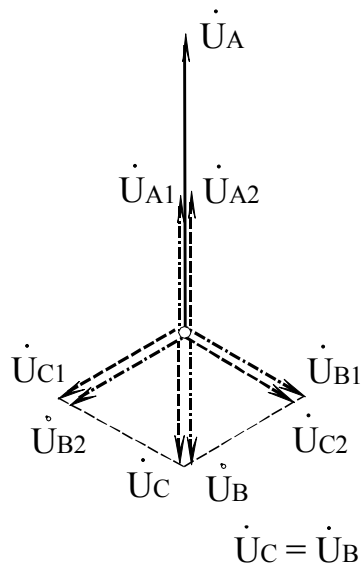
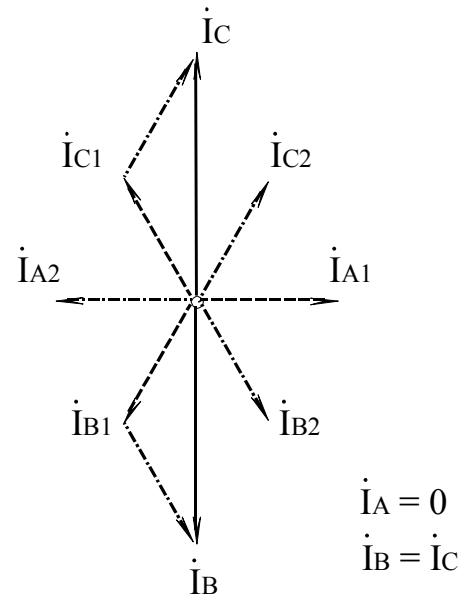


Рис.2.9.



а)



б)

Рис.2.8.

при однофазном замыкании

$$\dot{U}_A = 0, \dot{I}_B = 0, \dot{I}_C = 0.$$

Подставив граничные условия для токов в систему уравнений (2.3), получим

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\dot{I}_{kA2} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A$$

$$\text{т.е. } \dot{I}_{kA1} = \dot{I}_{kA2} = \dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3} \dot{I}_A$$

(2.7)

Из граничного условия для напряжения

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{kA1} + \\ \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0} &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Подставляя в последнее выражение значения

симметричных составляющих напряжений из системы (2.3), получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kA1} + \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0} &= E_{A9} - jx_{19}\dot{I}_{kA1} - jx_{29}\dot{I}_{kA2} - jx_{09}\dot{I}_{kA0} = \\ &= E_{A9} - j(\dot{I}_{19} + \dot{I}_{29} + \dot{I}_{09})\dot{I}_{kA1} = 0. \end{aligned}$$

Откуда

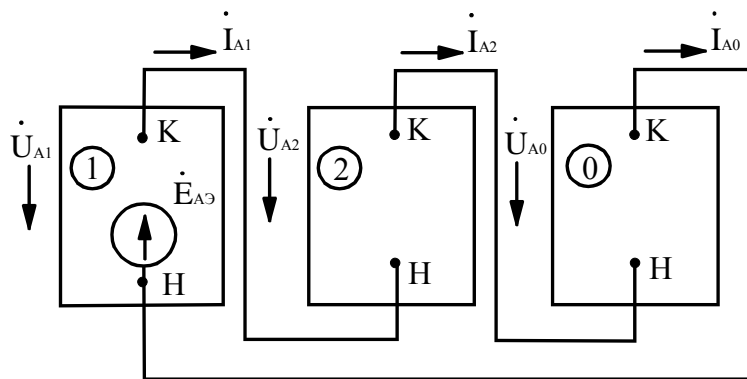


Рис.2.10.

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{j\omega L_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}}$$

Ток поврежденной фазы  $A$   $\dot{I}_{kA} = \dot{I}_{kA1} + \dot{I}_{kA2} + \dot{I}_{kA0} = 3\dot{I}_{kA1} = \frac{3\dot{E}_{A\vartheta}}{j\omega L_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}}$ .

В соответствие с соотношениями (2.7) и (2.8) комплексная схема замещения при однофазном КЗ приведена на рис.2.10.

Найдем значения симметричных составляющих напряжения

$$\dot{U}_{kA1} = j\dot{I}_{kA1}x_{2\vartheta}; \dot{U}_{kA2} = -j\dot{I}_{kA2}x_{2\vartheta}; \dot{U}_{kA0} = -j\dot{I}_{kA0}x_{0\vartheta}.$$

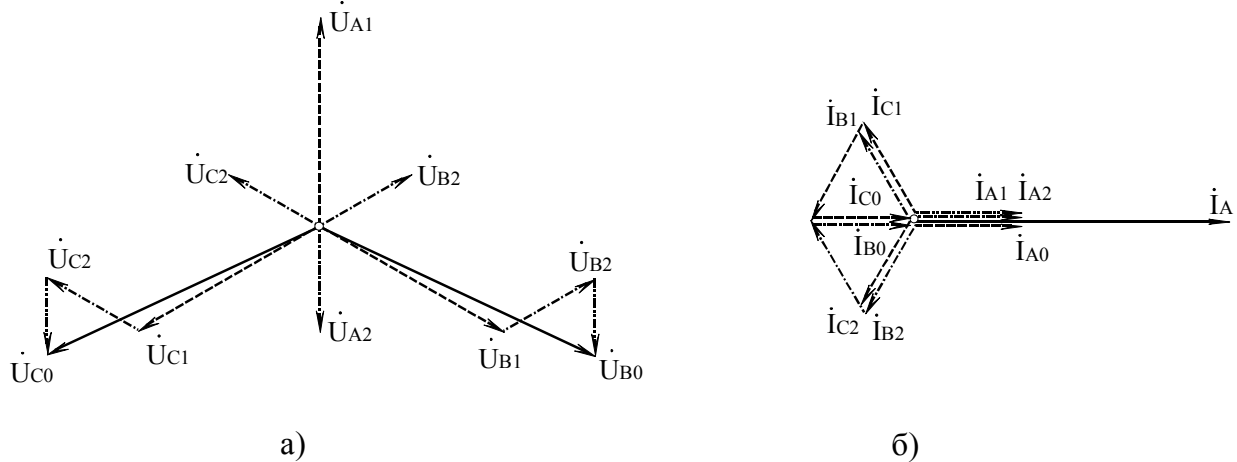


Рис. 2.11

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте повреждения приведены на рис.2.11,а и б соответственно.

#### 2.4.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

Рассмотрим двухфазное КЗ на землю между фазами  $B$  и  $C$  (рис.2.12). Граничные условия при этом:

$$\dot{I}_A = 0, \dot{U}_B = 0, \dot{U}_C = 0.$$

Сопоставляя граничные условия при однофазном КЗ и двухфазном КЗ на землю можно установить, что условия для напряжений и токов меняются местами, поэтому следует ожидать таким же образом изменятся соотношения между симметричными составляющими.

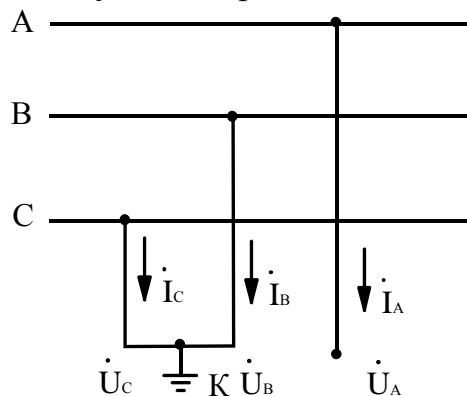


Рис.2.12

Подставив граничные условия для напряжений в систему уравнений (2.3), получим

$$\dot{U}_{kA1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) \stackrel{?}{=} \frac{1}{3}\dot{U}_A,$$

$$\dot{U}_{kA2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) \stackrel{?}{=} \frac{1}{3}\dot{U}_A,$$

$$\dot{U}_{kA0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \stackrel{?}{=} \frac{1}{3}\dot{U}_A,$$

т.е.

$$\dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2} = \dot{U}_{kA0} = \frac{1}{3} \dot{U}_A \quad (2.9)$$

Из граничного условия для тока

$$\dot{I}_{kA1} + \dot{I}_{kA2} + \dot{I}_{kA0} = 0. \quad (2.10)$$

Подставляя в последнее выражение значения симметричных составляющих токов из системы (2.2), получим

$$\frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{jx_{1\vartheta}} - \frac{\dot{U}_{kA1}}{jx_{1\vartheta}} - \frac{\dot{U}_{kA2}}{jx_{2\vartheta}} - \frac{\dot{U}_{kA0}}{jx_{0\vartheta}} = 0,$$

или

$$\frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{jx_{1\vartheta}} - \dot{U}_{kA1} \left( \frac{1}{jx_{1\vartheta}} + \frac{1}{jx_{2\vartheta}} + \frac{1}{jx_{0\vartheta}} \right) = 0.$$

Из последнего выражения

$$\dot{U}_{kA1} = \frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{jx_{1\vartheta} \left( \frac{1}{jx_{1\vartheta}} + \frac{1}{jx_{2\vartheta}} + \frac{1}{jx_{0\vartheta}} \right)} = \frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}},$$

откуда

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}},$$

где // - означает параллельное соединение (включение) элементов.

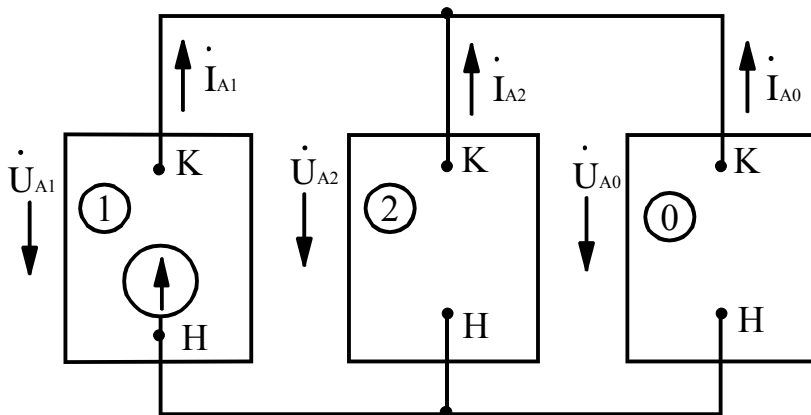
В соответствие с соотношениями (2.9) и (2.10) комплексная схема замещения при двухфазном КЗ на землю приведена на рис.2.13.

Из комплексной схемы замещения

$$\dot{I}_{kA2} = -\dot{I}_{kA1} \frac{x_{0\vartheta}}{x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}}, \quad \dot{I}_{kA0} = -\dot{I}_{kA1} \frac{x_{2\vartheta}}{x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}},$$

Ток одной из поврежденных фаз, например,  $B$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kB} &= a^2 \dot{I}_{kA1} + a \dot{I}_{kA2} + \dot{I}_{kA0} = \dot{I}_{kA1} \left( a^2 - \frac{x_{2\vartheta} + a \cdot x_{0\vartheta}}{x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}} \right) = \\ &= \dot{I}_{kA1} \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\vartheta} \cdot x_{0\vartheta}}{x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}}}. \end{aligned}$$



Найдем значения симметричных составляющих напряжения

$$\dot{U}_{kA1} = j \dot{I}_{kA1} \frac{x_{2\vartheta} \cdot x_{0\vartheta}}{x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}};$$

$$\dot{U}_{kA2} = -j \dot{I}_{kA2} x_{2\vartheta};$$

$$\dot{U}_{kA0} = -j \dot{I}_{kA0} x_{0\vartheta}.$$

Рис .2.13

Векторные диаграммы для напряжений и токов в месте повреждения приведены на рис.2.14,а и б соответственно.

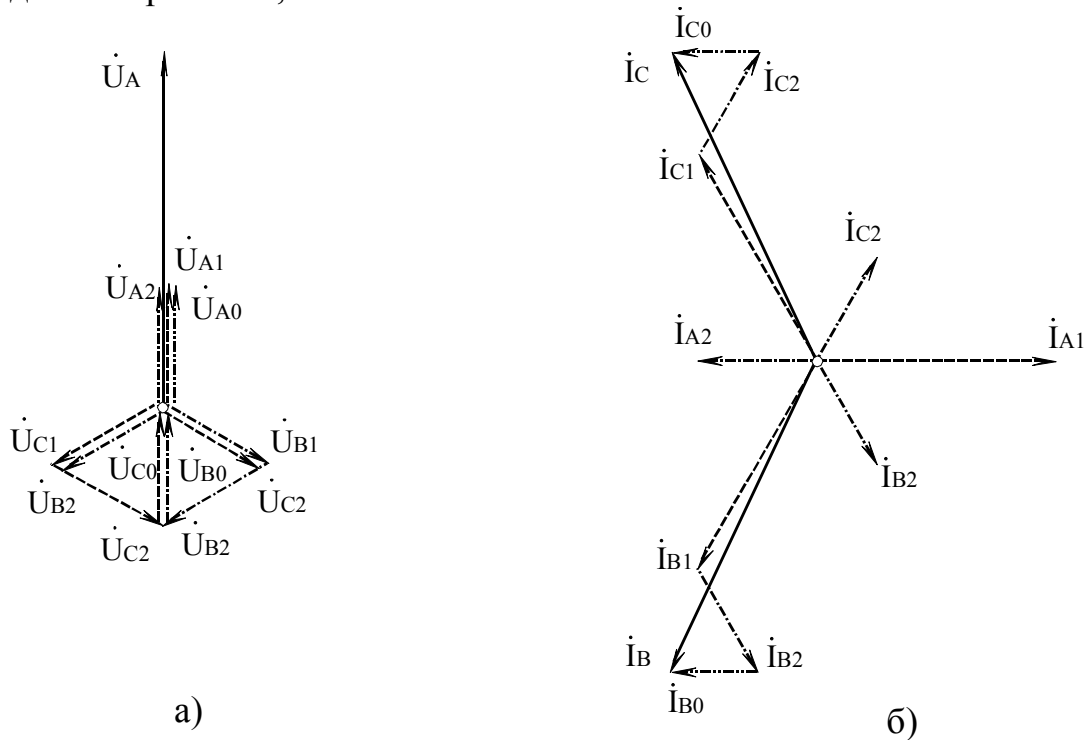


Рис. 2.14

#### 2.4.4. Правило эквивалентности прямой последовательности

Установленные п.п. 2.4.1-2.4.3 выражения для токов при несимметричных повреждениях показывают, что их величины пропорциональны току прямой последовательности, следовательно, абсолютную величину тока КЗ можно найти из общего выражения

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{1k}^{(n)},$$

где  $m^{(n)}$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ, величина которого приведена в таблице 2.1,  $I_{1k}^{(n)}$  - ток прямой последовательности для рассматриваемого вида КЗ.

Табл.2.1

Вид КЗ	$k^{(2)}$	$k^{(1)}$	$k^{(1,1)}$	$k^{(3)}$
$m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3}$	1
$x_{\Delta}^{(n)}$	$x_{2\vartheta}$	$x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}$	$\sqrt{1 - \frac{x_{2\vartheta} \cdot x_{0\vartheta}}{x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}}}$	0

Для расчета трехфазных КЗ МСС не используется, однако значения  $m^{(n)}$  и  $x_{\Delta}^{(n)}$  приведены для полноты понимания МСС.



Структура полученных выражений для тока прямой последовательности в общем случае имеет вид:

$$I_{1k}^{(n)} = \frac{E_9}{x_{19} + x_{\Delta}^{(n)}},$$

где  $x_{\Delta}^{(n)}$  дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности, величина которого зависит от вида КЗ и определяется соотношениями из табл.2.1.

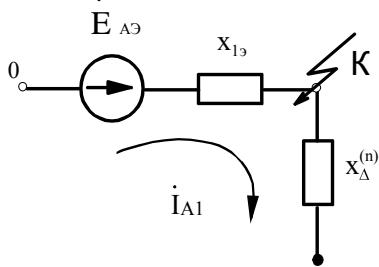


Рис. 2.15

На основании общего выражения для тока прямой последовательности Н.Н. Щедриным было сформулировано следующее правило эквивалентности прямой последовательности: **ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ может быть определен как ток трехфазного КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ за дополнительное сопротивление  $x_{\Delta}^{(n)}$ , которое не зависит от параметров схемы замещения прямой последовательности (рис.2.15).**

Такая трактовка тока прямой последовательности при несимметричных КЗ предполагает учет только основной гармоники тока КЗ.

Таким образом, вычисление токов при несимметричных КЗ производится в следующей последовательности:

- составляются схемы замещения: при междофазных замыканиях прямой и обратной последовательностей; при замыканиях на землю – прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- схемы замещения сворачиваются и находятся эквивалентные сопротивления;
- из схемы замещения прямой последовательности также находится эквивалентная ЭДС;
- определяются  $x_{\Delta}^{(n)}$  и ток прямой последовательности;
- вычисляется ток КЗ.

**Пример 2.2.** Для схемы, приведенной на рис.2.4. произвести расчет токов в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации при всех видах несимметричных КЗ.

Параметры элементов схемы:

- Генератор СВ1160/180-72:  $S_H = 103,5$  МВА;  $U_H = 13,8$  кВ;  $x_d'' = 0,24$ ;
- Трансформатор Т: ТДЦ-250000/330:  $S_H = 250$  МВА;  $U_{HH} = 13,8$  кВ;  $U_{BH} = 347$  кВ;  $U_{k\%} = 11\%$ ;
- Автотрансформатор АДЦТН-240000/330/220  $S_H = 240$  МВА;  $U_{BH} = 330$  кВ;  $U_{CH} = 220$  кВ;  $U_{HH} = 11,0$  кВ;  $U_{k*BC} = 9,5\%$ ;  $U_{k*BH} = 74\%$ ;  $U_{k*CH} = 60\%$ ;

- Линия Л1: длина  $l = 250$  км, погонное сопротивление  $x_{ноз} = 0,32$  Ом/км, линия имеет стальные грозозащитные тросы, заземленные на каждой опоре;
- Система:  $S_c = 1200$  МВА,  $x_0 = 4 * x_1$

◁ Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей приведены соответственно на рис.2.5,а, б и в. Выбираем базисные условия: базисную мощность  $S_{\delta} = 1000$  МВА и базисные напряжения ступеней, которые принимаем равными средним напряжениям:  $U_{\delta I} = 340$  кВ,  $U_{\delta II} = 230$  кВ,  $U_{\delta III} = 13,8$  кВ,  $U_{\delta IV} = 10,5$  кВ. Сопротивления элементов схемы замещения прямой последовательности выражаем в относительных единицах и приводим к принятым базисным условиям:

$$x_{1*\delta} = \frac{1}{4} x_d'' \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{1}{4} 0,24 \frac{1000}{103,5} = 0,579,$$

$$x_{2*\delta} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{11}{100} \frac{1000}{250} = 0,22,$$

$$x_{3*\delta} = x_{ноз} l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta I}^2} = \frac{1}{2} 0,32 \cdot 250 \frac{1000}{340^2} = 0,346,$$

$$x_{4*\delta} = \frac{1}{2} \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{1}{2} \frac{9,5}{100} \frac{1000}{240} = 0,198,$$

$$x_{5*\delta} = \frac{U_c^2}{S_c} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = \frac{S_{\delta}}{S_c} = \frac{1000}{1200} = 0,833.$$

Сворачивая схему замещения прямой последовательности найдем эквивалентное сопротивление прямой последовательности

$$x_{1\delta} = \frac{(x_1 + x_2 + x_3)(x_4 + x_5)}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5} = \frac{(0,579 + 0,22 + 0,346)(0,198 + 0,833)}{0,579 + 0,22 + 0,346 + 0,198 + 0,833} = 0,542.$$

При приближенном приведении ЭДС генератора и системы в относительных единицах равны 1, поэтому и эквивалентная ЭДС  $E_{\delta} = 1$ .

В схеме замещения обратной последовательности величина сопротивление генератора в общем случае отличается от сопротивления прямой последовательности (поэтому использован другой порядковый номер). Однако КЗ электрически удалено от генератора, поэтому будем считать сопротивление генератора обратной последовательности равным прямой. Так как все остальные элементы схем замещения прямой и обратной последовательностей одинаковы, то их эквивалентные сопротивления равны между собой  $x_{2\delta} = x_{1\delta} = 0,542$ .

В схеме замещения нулевой последовательности сопротивления линии и системы отличаются от сопротивлений прямой (обратной) последовательностей. Для указанной линии  $\frac{x_0}{x_1} = 4,7$ , поэтому

$$x_{7*6} = 4,7 x_{3*6} = 4,7 \cdot 0,346 = 1,626.$$

В схеме замещения нулевой последовательности участвуют все обмотки автотрансформатора:

$$U_{kB\%} = \frac{1}{2} (U_{kBC\%} + U_{kBH\%} - U_{kCH\%}) = \frac{1}{2} (9,5 + 74 - 60) = 11,75 \%,$$

$$U_{kC\%} = U_{kBC\%} - U_{kB\%} = 9,5 - 11,75 = -2,25 \%,$$

$$U_{kH\%} = U_{kBH\%} - U_{kB\%} = 74 - 11,75 = 62,25 \%,$$

соответствующие им сопротивления

$$x_{8*6} = \frac{1}{2} \frac{U_{kB\%}}{100\%} \frac{S_6}{S_H} = \frac{1}{2} \frac{11,75}{100} \frac{1000}{240} = 0,242,$$

$$x_{9*6} = \frac{1}{2} \frac{U_{kH\%}}{100\%} \frac{S_6}{S_H} = \frac{1}{2} \frac{62,25}{100} \frac{1000}{240} = 1,296.$$

$$x_{11*6} = 4 * x_{5*6} = 4 * 0,833 = 3,33$$

Так как  $U_{kC\%}$  представляет собой небольшую отрицательную величину, то сопротивление  $x_{10*6}$  можно принять равным нулю.

Сворачивая схему замещения нулевой последовательности, находим эквивалентное сопротивление нулевой последовательности

$$\begin{aligned} x_{0\delta} &= x_{2*6} + x_{7*6} // x_{8*6} + x_{9*6} // x_{10*6} + x_{11*6} \\ &= 0,22 + 1,626 // 0,242 + 1,296 // 3,33 = 0,719. \end{aligned}$$

Используя приведенные выше формулы, вычисляем токи двухфазного, однофазного и двухфазного КЗ на землю:

$$I_k^{(2)} = I_{k*6} I_6 = \frac{\sqrt{3} \cdot E_{\delta} S_6}{x_{1\delta} + x_{2\delta} \sqrt{3} U_{6I}} = \frac{\sqrt{3}}{0,542 + 0,542 \sqrt{3}} \frac{1000}{340} = 1,595 \text{ кА},$$

$$I_k^{(1)} = I_{k*6} I_6 = \frac{3 \cdot E_{\delta} S_6}{x_{1\delta} + x_{2\delta} + x_{0\delta} \sqrt{3} U_{6I}} = \frac{3}{0,542 + 0,542 + 0,719 \sqrt{3}} \frac{1000}{340} = 1,663 \text{ кА},$$

$$\begin{aligned} I_k^{(1,1)} &= I_{k*6} I_6 = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\delta} x_{0\delta}}{x_{2\delta} + x_{0\delta}}} \frac{E_{\delta} S_6}{x_{1\delta} + x_{2\delta} // x_{0\delta} \sqrt{3} U_{6I}} = \\ &= \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{0,542 \cdot 0,719}{0,542 + 0,719}} \frac{1}{0,542 + 0,542 // 0,719} \frac{1000}{\sqrt{3} 340} = 1,777 \end{aligned}$$

Ток трехфазного КЗ

$$I_k^{(3)} = I_{k*6} I_6 = \frac{E_{\delta} S_6}{x_{1\delta} \sqrt{3} U_{6I}} = \frac{1}{0,542 \sqrt{3}} \frac{1000}{340} = 3,23 \text{ кА. } \triangleright$$

#### 2.4.5. Учет активных сопротивлений в месте КЗ

Рассмотрим методы учета переходных сопротивлений в месте повреждения на двух примерах.

Двухфазное КЗ при замыкании через переходное сопротивление (рис.2.16,а). Граничные условия:  $\dot{I}_A = 0$ ,  $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$ ,  $\dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{I}_B R_n$ .

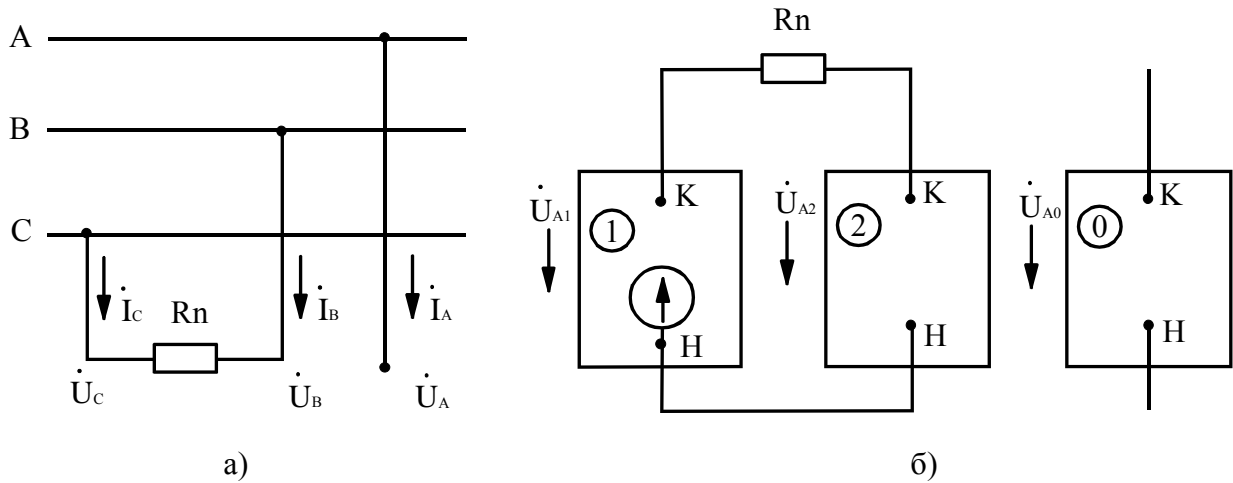


Рис. 2.16

Найдем симметричные составляющие для особой фазы  $A$ , используя систему уравнений (2.5)

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a \dot{I}_B + a^2 \dot{I}_C) = \frac{1}{3} (-a^2 \dot{I}_B),$$

$$\dot{I}_{kA2} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a^2 \dot{I}_B + a \dot{I}_C) = \frac{1}{3} (-a \dot{I}_B),$$

$$\dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = 0,$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_B - \dot{U}_C &= a^2 \dot{U}_{kA1} + a \dot{U}_{kA2} - a \dot{U}_{kA1} - a^2 \dot{U}_{kA2} = \\ &= (-a^2 - a) \dot{U}_{kA1} + (-a - a^2) \dot{U}_{kA2} = (-a^2 + a) \dot{I}_{kA1} R_n, \end{aligned}$$

следовательно,  $\dot{I}_{kA1} = -\dot{I}_{kA2}$  и  $\dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2} + \dot{I}_{kA1} R_n$ .

Комплексная схема замещения приведена на рис.2.16,б.

Выражение для вычисления тока КЗ при двухфазном повреждении

$$\dot{I}_{kB} = \frac{\sqrt{3} \dot{E}_{A\vartheta}}{R_n + j(\dot{x}_{1\vartheta} + x_{2\vartheta})}.$$

Однофазное КЗ при замыкании через переходное сопротивление (рис.2.17, а).

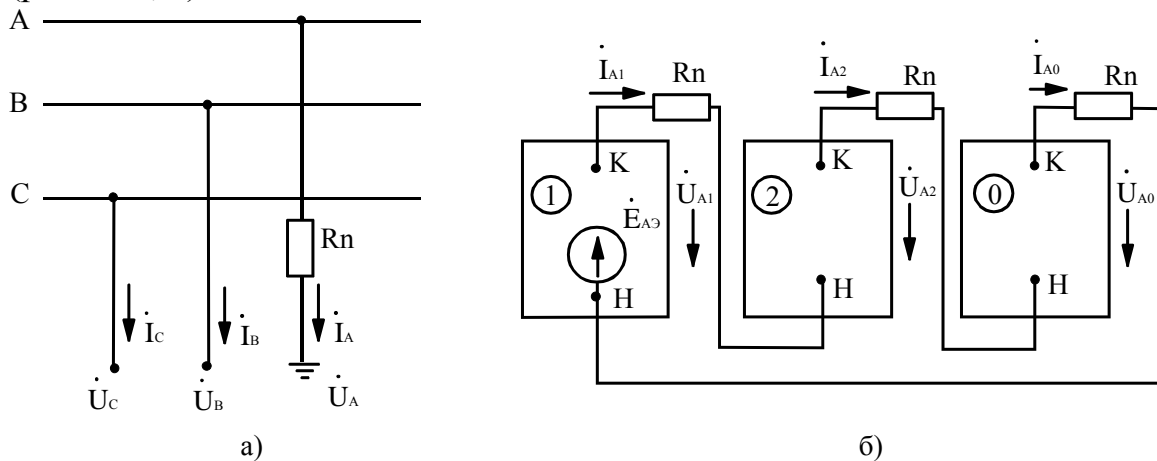


Рис. 2.17

Граничные условия:

$$\dot{I}_B = 0, \dot{I}_C = 0, \dot{U}_A = \dot{I}_A R_n.$$

Найдем симметричные составляющие для особой фазы  $A$ , используя систему уравнений (2.5)

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\dot{I}_{kA2} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

т.е.  $\dot{I}_{kA1} = \dot{I}_{kA2} = \dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$

следовательно,  $\dot{U}_A = \dot{U}_{kA1} + \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0} = 3\dot{I}_{kA1} R_n.$

Комплексная схема замещения приведена на рис.2.17, б.

Выражение для вычисления тока КЗ при однофазном повреждении

$$\dot{I}_{kA} = \frac{3\dot{E}_{A\vartheta}}{3R_n + j(x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta})}.$$

## 2.5. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей

Чтобы определить ток в любой ветви схемы при несимметричном КЗ необходимо сначала найти для этой ветви токи прямой, обратной и нулевой (при замыканиях на землю) последовательностей. Затем, пользуясь выражениями (2.2), можно определить действительные токи в фазах. Для практических расчётов часто ограничиваются графическим суммированием векторов отдельных последовательностей.

Для определения токов отдельных последовательностей в заданной ветви первоначально производится вычисление токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте КЗ соответствующих последовательностей.

Ток прямой последовательности распределяется также, как и ток трёхфазного КЗ. При этом должно быть лишь учтено, что в месте повреждения приложено напряжение прямой последовательности  $\dot{U}_{1k}$ , которое влияет на величину токов и напряжений прямой последовательностей.

Распределение напряжений отдельных последовательностей рассмотрим на схеме участка системы, приведенную на рис.2.18. Из рисунка видно, что по мере приближения к источнику  $U_{1k}$  растет, а  $U_{2k}$  и  $U_{0k}$  уменьшаются.

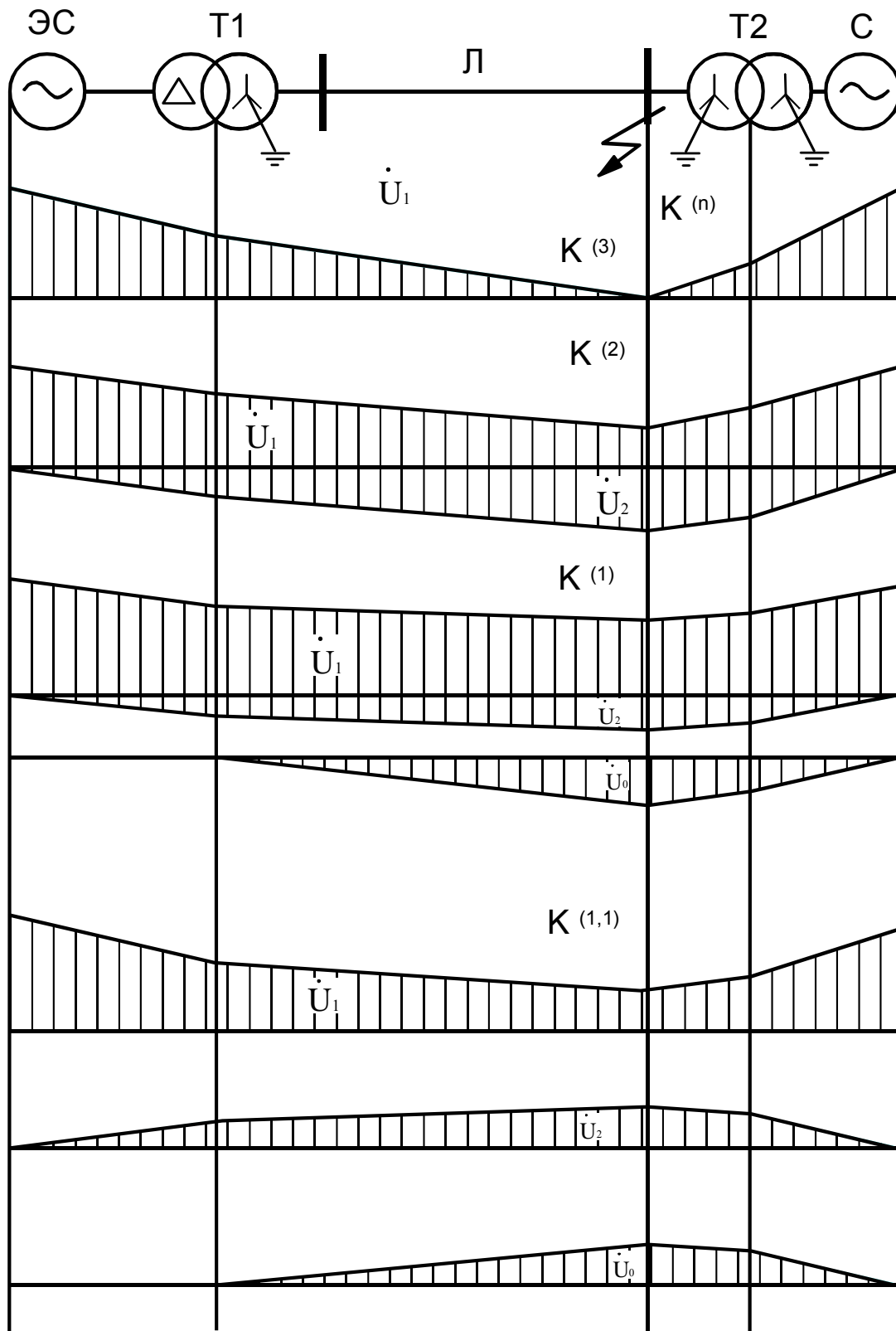


Рис. 2.18.

Симметричные составляющие токов и напряжений при переходе через трансформатор изменяются по величине и по фазе. Изменение токов и напряжений по величине зависит от коэффициента трансформации, а поворот векторов от группы соединения обмоток. Для трансформаторов с чётной

группой соединения обмоток  $\star / \star$  (или  $\nabla / \nabla$ ) обычно принимается группа 12, при этом угловое смещение токов и напряжений отсутствует.

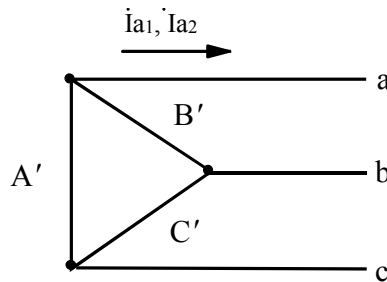
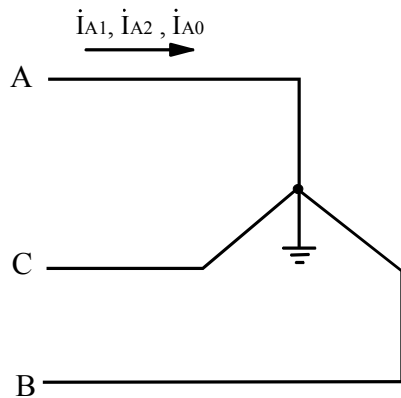


Рис. 2.19

Определим угловое смещение векторов токов и напряжений для наиболее часто встречающейся схемы  $\star / \nabla$  - 11 (рис.2.19).

Пусть коэффициент трансформации равен  $k_I$ . Выразим  $i_{a1}$  в функции от  $i_{A1}$ :

$$i_{A'1} = i_{A1} \frac{k_I}{\sqrt{3}}, \quad i_{B'1} = i_{B1} \frac{k_I}{\sqrt{3}} = a^2 i_{A1} \frac{k_I}{\sqrt{3}},$$

следовательно,

$$i_{a1} = i_{A'1} - i_{B'1} = \left( -a^2 \right) i_{A1} \frac{k_I}{\sqrt{3}} = i_{A1} k e^{j30^\circ}.$$

Аналогично для обратной последовательности

$$i_{a2} = i_{A'2} - i_{B'2} = \left( -a \right) i_{A2} \frac{k_I}{\sqrt{3}} = i_{A1} k e^{-j30^\circ}.$$

Подобные выражения можно получить и для напряжений.

Таким образом, при переходе со стороны звезды на сторону треугольника векторы напряжений и токов прямой последовательности поворачиваются на  $30^\circ$  против часовой стрелки, а обратной – на  $30^\circ$  по часовой стрелке. При переходе со стороны треугольника на сторону звезды угловое смещение симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

## 2.6. Сравнение токов при различных видах КЗ

Анализируя полученные в п.2.4. формулы для расчёта тока КЗ при несимметричных повреждениях можно для простейшего случая одного генератора получить соотношения между токами.

При различных видах КЗ:

$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_{\Delta}^{(3)} = 0.$$

Следовательно, между токами прямой последовательности в месте повреждения имеет место следующее соотношение

$$I_1^{(3)} > I_1^{(1,1)} > I_1^{(2)} > I_1^{(1)}.$$

Определим соотношения между полными токами.

Отношение тока двухфазного КЗ к трёхфазному

$$\frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\frac{\sqrt{3}E_9}{x_{19} + x_{29}}}{\frac{E_9}{x_{19}}}.$$

Если  $x_{29}$  близко по величине к  $x_{19}$ , что соответствует удалённому КЗ или начальному значению тока КЗ в сети питаемой турбогенератором, то

$$\frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Для установившихся значений токов КЗ вблизи генераторов  $x_{19}$  обычно значительно больше  $x_{29}$ , поэтому отношение  $I_k^{(2)}/I_k^{(3)}$  может достигать 1,6. Таким образом, тепловой импульс при двухфазном КЗ может быть больше, чем при трёхфазном, и, следовательно, аппаратура и токоведущие части на зажимах генератора должны проверяться на тепловую устойчивость при трёхфазном и двухфазном КЗ.

Для гидрогенератора в начальный момент времени  $x_{29} > x_{19}$ , поэтому

$$\frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} < 0,87.$$

Отношение тока однофазного КЗ к трёхфазному

$$\frac{I_k^{(1)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\frac{3E_9}{x_{19} + x_{29} + x_{09}}}{\frac{E_9}{x_{19}}} = \frac{3x_{19}}{x_{19} + x_{29} + x_{09}}.$$

В сетях 110 кВ часть нейтралей трансформаторов для уменьшения тока однофазного КЗ могут быть незаземлены. При этом в любой точке сети должно выдерживаться соотношение  $\frac{x_{09}}{x_{19}} < 4$ , при этом, полагая, что

$$x_{29} \approx x_{19}$$

$$\frac{I_k^{(1)}}{I_k^{(3)}} \approx 0,5.$$

При КЗ на шинах мощных электрических станций и подстанций имеет место соотношение  $x_{09} \ll x_{19}$ , то при  $x_{29} \approx x_{19}$   $\frac{I_k^{(1)}}{I_k^{(3)}} > 1,5$ .

Отношение тока двухфазного КЗ на землю к трехфазному

$$\frac{I_k^{(1,1)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\sqrt{2-1} \sqrt{x_{19}x_{29}} + \sqrt{2-a} \sqrt{x_{19}x_{09}}}{x_{19}x_{29} + x_{19}x_{09} + x_{29}x_{09}}.$$



Если  $x_{0\vartheta} \gg x_{2\vartheta}$ , то данный вид замыкания соответствует двухфазному КЗ, т.е.  $\frac{I_k^{(1,1)}}{I_k^{(3)}} = 0,87$ . При равенстве  $x_{1\vartheta} = x_{2\vartheta} = x_{0\vartheta}$  имеем  $\frac{I_k^{(1,1)}}{I_k^{(3)}} \approx 1$ .

## 2.7. Замыкания на землю в электрических сетях с незаземлённой нейтралью

При однофазных замыканиях на землю в электрических сетях с незаземлённой нейтралью в месте замыкания возникают только емкостные токи, обусловленные емкостью фаз относительно земли (рис. 2.20,а). При этом ток, как правило, не превышает 50 А, а само повреждение называется не КЗ, а простым замыканием на землю.

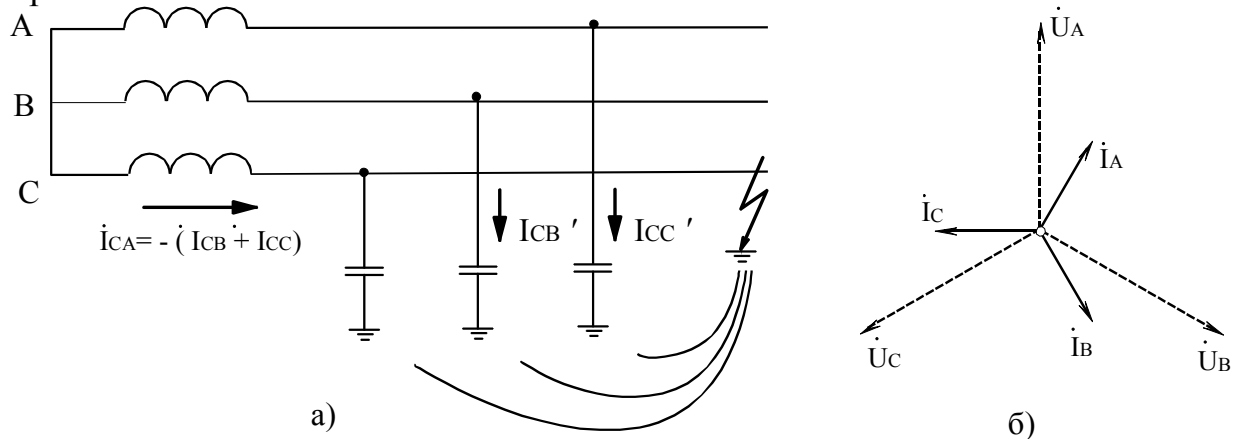


Рис. 2.20

При замыкании происходит смещение нейтрали источника. На нейтрали появляется фазное напряжение, а напряжение неповрежденных фаз увеличивается до линейного напряжения, т.е. в  $\sqrt{3}$  раза. Это называется перекосом напряжений фаз относительно земли. Линейные напряжения остаются без изменения.

Перекус напряжений не распространяется через трансформаторы на другую электрическую ступень. Через автотрансформаторы, имеющие в отличие от трансформаторов помимо магнитной и электрическую связь между обмотками, перекус фаз может перейти с обмотки высшего напряжения на обмотку низшего, если нейтраль не заземлена. Поэтому нейтрали автотрансформаторов всегда заземляются, и, следовательно, они не применяются в сетях с изолированными нейтральями (ниже 110 кВ).

В предшествующем замыканию режиме емкостные токи равны (рис.2.20,б)

$$I_{cA} = I_{cB} = I_{cC} = U_{\phi} \omega C,$$

где  $U_{\phi}$  - фазное напряжение.

При замыкании (рис.2.21)

$$I_{cB'} = \sqrt{3} U_{\phi} \omega C, \quad I_{cC'} = \sqrt{3} U_{\phi} \omega C, \quad I_{cA'} = \sqrt{3} U_{\phi} \omega C.$$

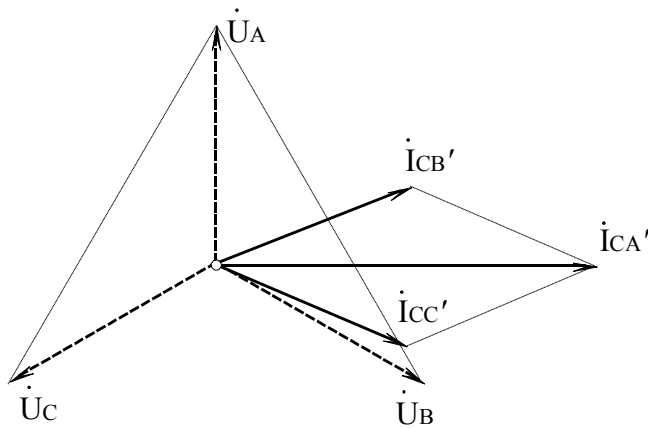


Рис. 2.21

Таким образом, ток в месте замыкания на землю, равен арифметической сумме емкостных токов фаз предшествующего режима. Система емкостных токов является неуравновешенной и поэтому ведет себя так же, как и система нулевой последовательности. При значительной величине тока замыкания возникают условия для перемежающейся дуги, что может привести к перенапряжениям в сети, опасными

для изоляции. Величина тока замыкания может быть уменьшена (скомпенсирована) с помощью реактора, включенного в нейтраль трансформатора.

### Контрольные вопросы к главе 2

1. Назначение и сущность метода симметричных составляющих.
2. Основные уравнения метода симметричных составляющих.
3. Сопротивление электрических машин токам обратной последовательности.
4. Схемы замещения трансформаторов при протекании токов нулевой последовательности.
5. Сопротивление линий электропередачи токам нулевой последовательности.
6. Схемы замещения отдельных последовательностей.
7. Двухфазное короткое замыкание. Расчет токов и напряжений. Построение векторных диаграмм.
8. Однофазное короткое замыкание. Расчет токов и напряжений. Построение векторных диаграмм.
9. Двухфазное короткое замыкание на землю. Расчет токов и напряжений. Построение векторных диаграмм.
10. Правило эквивалентности прямой последовательности.
11. Учет активных сопротивлений в месте КЗ.
12. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей.
13. Сравнение токов при различных видах КЗ.
14. Замыкания на землю в электрических сетях с незаземленной нейтралью.

## Задача к главе 2

Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ при трехфазном, двухфазном, однофазном и двухфазном КЗ на землю на шинах высокого напряжения электрической станции (ЭС) для схем участков энергосистемы, приведенных на рис.2.4 в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Генераторы до возникновения повреждения работали в номинальном режиме.

Параметры основных элементов схем приведены таблице. Недостающие параметры элементов схемы выбрать в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Все параллельно работающие элементы сети рекомендуется выбирать однотипными. Количество параллельно включенных элементов должно быть не менее двух. Суммарная мощность всех трансформаторов (ЭС) должна быть не менее полной мощности всех генераторов (ТГ-турбогенераторы, ГГ-гидрогенераторы). Принять, что все трансформаторы имеют четырехстержневой магнитопровод. Длина линии Л2 выбирается по напряжению обмотки среднего напряжения (авто) трансформатора подстанции (п/ст). Погонное сопротивление прямой последовательности линии выбирается по номинальному напряжению линии. От ударов молнии линии защищены стальными грозозащитными тросами, заземленными на каждой опоре.

Результаты расчетов свести в таблицу.

Последняя цифра шифра	Тип генераторов	$P_{ЭС}$ , МВт	Длина линии Л1: $l_L$ , км	Мощность п/ст, МВА	Сопротивление системы, $x_{1\varnothing}$ Ом	Сопротивление системы, $x_{0\varnothing}$ Ом
1	ГГ	170-220	240-260	120-150	18	26
2	ТГ	380-410	140-170	120-150	16	24
3	ТГ	580-620	280-300	200-260	25	32
4	ГГ	750-810	190-210	200-260	22	31
5	ГГ	1150-1400	900-990	800-900	26	33
6	ТГ	1600-1800	700-900	900-980	23	30
7	ТГ	50-60	130-160	120-140	9	12
8	ТГ	90-100	40-60	120-140	11	16
9	ТГ	180-210	230-250	150-260	12	18
0	ТГ	390-420	140-150	190-260	14	17

### 3. ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

#### 3.1. Общие сведения

В трехфазных сетях в некоторых случаях имеет место неравенство сопротивлений фаз, которое называется продольной несимметрией. Наиболее сильно выраженная несимметрия проявляется при обрыве проводов, а также при пофазном отключении фаз однофазными выключателями. В данном разделе рассмотрены методы расчета токов и напряжений при продольной несимметрии.

В общем случае несимметрии во всех фазах включены разные сопротивления (рис.3.1,а), которые могут быть связаны между собой взаимоиנדукциями. Падения напряжения на сопротивлениях в фазах обозначим  $\Delta\dot{U}_A$ ,  $\Delta\dot{U}_B$ ,  $\Delta\dot{U}_C$ . Вместо сопротивлений в схему могут быть включены соответствующие им ЭДС (рис.3.1,б). Индексы  $L$  и  $L'$  принято использовать для обозначения продольной несимметрии, аналогично как индекс  $k$  для обозначения поперечной несимметрии, т.е. коротких замыканий.

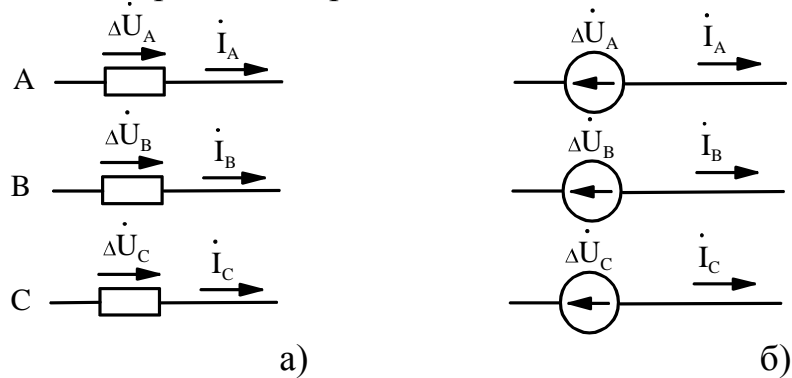


Рис.3.1

Используя МСС Напряжения  $\Delta\dot{U}_A$ ,  $\Delta\dot{U}_B$ ,  $\Delta\dot{U}_C$  можно разложить на симметричные составляющие и для особой фазы  $A$  составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для участка энергосистемы, состоящего из двух систем  $M$  и  $N$  (рис. 3.2).

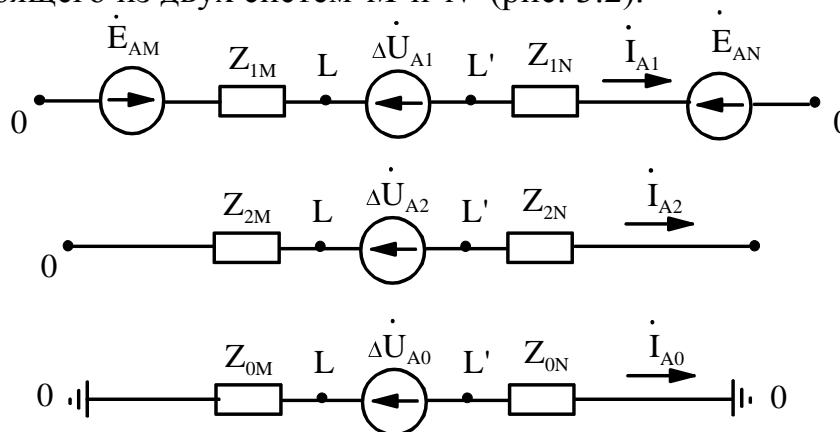


Рис.3.2

Этим схемам соответствуют уравнения

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{A\vartheta} &= \Delta \dot{U}_{LA1} + \dot{I}_{A1} Z_{1\vartheta} \\ 0 &= \Delta \dot{U}_{LA2} + \dot{I}_{A2} Z_{2\vartheta} \\ 0 &= \Delta \dot{U}_{LA0} + \dot{I}_{A0} Z_{0\vartheta} \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

где  $\dot{E}_{A\vartheta} = \dot{E}_{AM} - \dot{E}_{AN}$ ,  $Z_{1\vartheta} = Z_{1M} + Z_{1N}$ ,  $Z_{2\vartheta} = Z_{2M} + Z_{2N}$ ,  $Z_{0\vartheta} = Z_{1M} + Z_{1N}$ .

Таким образом, напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте продольной несимметрии появляются в результате разложения системы несимметричных векторов фазных напряжений.

Расчет токов и напряжений в случае продольной несимметрии может быть произведен путем решения системы уравнений (3.1). Система из трех уравнений содержит 6 неизвестных. Поэтому для ее решения используются три дополнительных уравнения исходя из граничных условий, зависящих от вида несимметрии. Далее рассматриваются два вида продольной несимметрии: разрыв одной и двух фаз.

### 3.2. Разрыв одной фазы

Рассмотрим разрыв особой фазы A (рис.3.3).

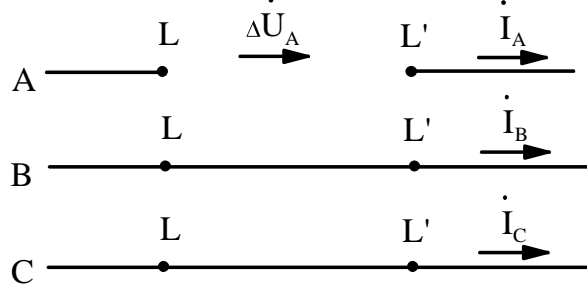


Рис.3.3

Этому случаю продольной несимметрии соответствуют граничные условия:

$$\dot{I}_{LA} = 0, \Delta \dot{U}_{LB} = 0, \Delta \dot{U}_{LC} = 0. \quad (3.2)$$

Эти условия аналогичны граничным условиям при двухфазном КЗ на землю, что обуславливает и аналогичные расчетные выражения.

Из системы уравнений (2.5) с учетом граничных условий (3.2) получим:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \frac{1}{3} \dot{U}_{LA}, \Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{1}{3} \dot{U}_{LA}, \Delta \dot{U}_{LA0} = \frac{1}{3} \dot{U}_{LA}.$$

Из системы уравнений (3.1)

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{\Delta \dot{U}_{LA2}}{jx_{L2\vartheta}}, \dot{I}_{LA0} = -\frac{\Delta \dot{U}_{LA0}}{jx_{L0\vartheta}}. \quad (3.3)$$

Так как  $\dot{I}_{LA} = 0$ , то

$$\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} = 0. \quad (3.4)$$

Подставив в (3.4) выражения (3.3), получим

$$\dot{I}_{LA1} - \Delta \dot{U}_{LA1} \left( \frac{1}{jx_{L2\varnothing}} + \frac{1}{jx_{L0\varnothing}} \right) = 0$$

или

$$\dot{I}_{LA1} \cdot jx_{\Delta}^{(1)} = \Delta \dot{U}_{LA1}, \quad (3.5)$$

где  $x_{\Delta}^{(1)} = x_{L2\varnothing} // x_{L0\varnothing}$  (индекс 1 означает разрыв одной фазы)

Из первого уравнения (3.1) с учетом (3.5) получим формулу для вычисления тока прямой последовательности при продольной несимметрии

$$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\varnothing}}{j(x_{L1\varnothing} + x_{\Delta}^{(1)})}. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) аналогична формуле для вычисления тока прямой последовательности при КЗ на основе правила эквивалентности прямой последовательности.

Используя соотношения между симметричными составляющими, получена комплексная схема замещения при разрыве одной фазы (рис. 3.4).

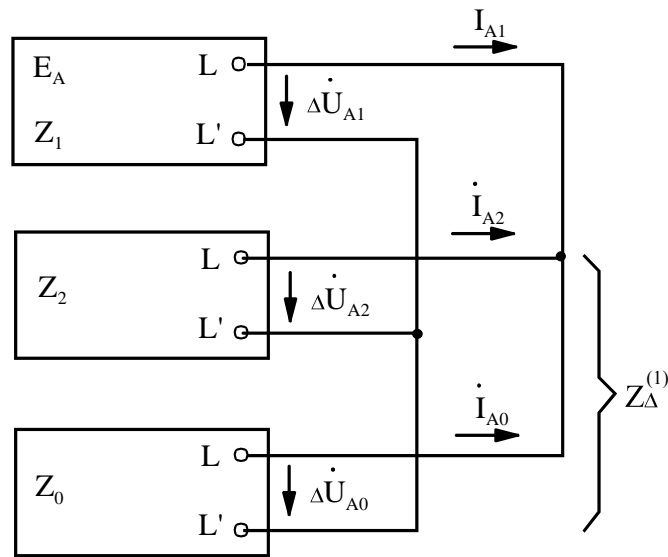


Рис.3.4

Из комплексной схемы замещения находим токи обратной и нулевой последовательностей

$$I_{LA2} = -\frac{x_{L0\varnothing}}{x_{L2\varnothing} + x_{L0\varnothing}} I_{LA1},$$

$$I_{LA0} = -\frac{x_{L2\varnothing}}{x_{L2\varnothing} + x_{L0\varnothing}} I_{LA1}.$$

Полные токи и напряжения получают путем суммирования векторов прямой обратной и нулевой последовательностей.

### 3.3. Разрыв двух фаз

Рассмотрим разрыв фаз  $B$  и  $C$  (рис.3.5).

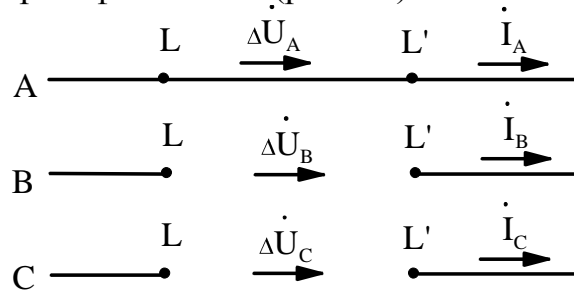


Рис.3.5

Этому случаю продольной несимметрии соответствуют граничные условия:

$$\dot{I}_B = 0, \dot{I}_C = 0, \Delta \dot{U}_{LA} = 0. \quad (3.7)$$

При этом граничные условия аналогичны граничным условиям при однофазном КЗ.

Из системы уравнений (2.3) с учетом граничных условий (3.7) получим:

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{LA0} = \frac{1}{3} \dot{I}_{LA}, \quad (3.8)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = 0. \quad (3.9)$$

Сложим уравнения системы (3.1) с учетом (3.8) и (3.9) и после несложных преобразований найдем

$$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{j(x_{L1\vartheta} + x_{\Delta}^{(2)})},$$

где  $x_{\Delta}^{(2)} = x_{L2\vartheta} + x_{L0\vartheta}$  (индекс 2 означает разрыв двух фаз).

Для тока в фазе  $A$   $\dot{I}_{LA} = 3\dot{I}_{LA1}$ . Разность фазных напряжений прямой последовательности в месте разрыва определяется путем сложения двух последних уравнений системы (3.1) с учетом (3.8) и (3.9)

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = -(\Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0}) = j x_{\Delta}^{(2)} \dot{I}_{LA1}.$$

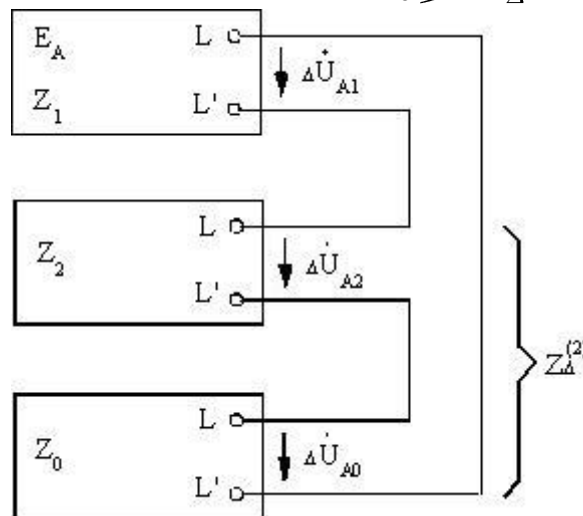


Рис.3.6

Используя соотношения между симметричными составляющими (3.8) и (3.9) построена комплексная схема при разрыве двух фаз (рис. 3.6).

**Пример 3.1.** Для схемы, приведенной на рис.3.7 построить комплексную схему замещения при разрыве одной фазы и двух фаз в начале линии.

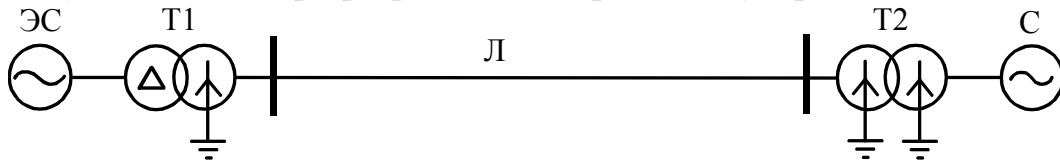


Рис.3.7

Требуемые схемы замещения приведены на рис.3.8 и 3.9 соответственно. Комплексные схемы замещения соответствуют особой фазе А.

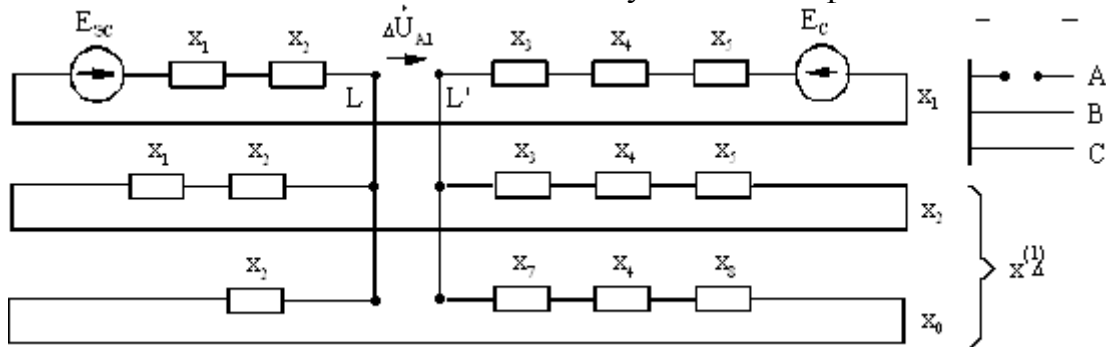


Рис.3.8

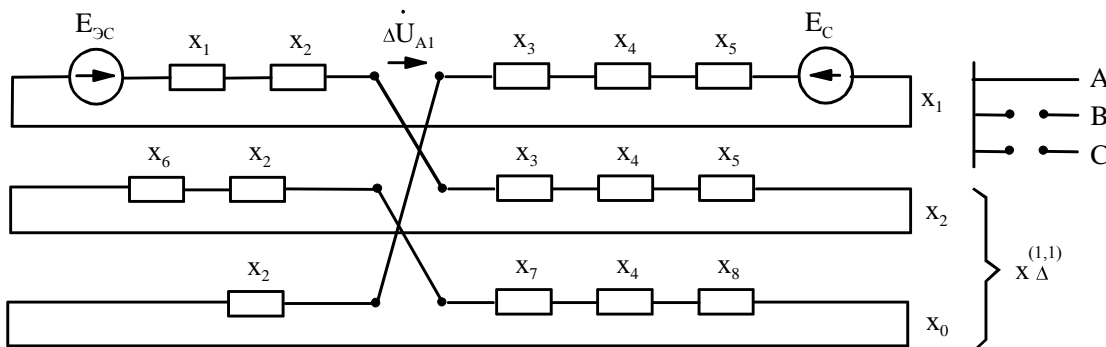


Рис.3.9

Подобные схемы используются, как правило, для расчета переходных электромеханических процессов, которые протекают сравнительно медленно (1-3 с). Поэтому для генератора задаются переходное сопротивление  $x'_1$  (без учета влияния демпферных контуров) и переходная ЭДС.  $\triangleright$

### Контрольные вопросы к главе 3

1. Назначение и сущность метода симметричных составляющих.
2. Основные уравнения метода симметричных составляющих.
3. Разрыв одной фазы. Расчет токов и напряжений.
4. Разрыв двух фаз. Расчет токов и напряжений.
5. Правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии.



#### 4 ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ИДЕАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭДС

В данном разделе рассматривается электромагнитный переходный процесс в симметричной цепи с сосредоточенными индуктивностями и активными сопротивлениями. Питание цепи осуществляется от источника бесконечной мощности, собственное сопротивление которого равно нулю, а его напряжение, изменяясь с постоянной частотой, имеет неизменную амплитуду. Это соответствует теоретическому пределу КЗ, в точке удаленной от мощных электрических станций. Переходные процессы в подобных условиях изучались в курсе ТОЭ, поэтому в данном разделе лишь кратко напоминаются основные выводы исследования таких переходных процессов.

##### 4.1. Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи

Рассмотрим переходный процесс, вызванный трехфазным КЗ, которое равносильно включению трехфазного выключателя  $Q$  (рис.4.1).

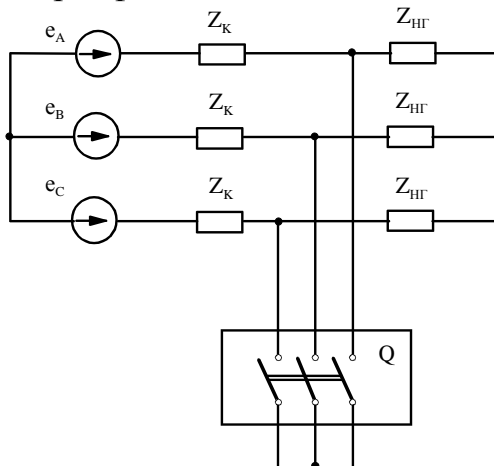


Рис.4.1

Предшествующий режим характеризуется векторами токов  $\dot{I}_{HA}$ ,  $\dot{I}_{HB}$ ,  $\dot{I}_{HC}$  (рис.4.2). Здесь  $Z_{HГ} = R_{HГ} + jX_{HГ}$ ,  $Z_K = R_K + jX_K$ . Предполагается, что взаимоиנדукция между фазами отсутствует ( $M_i = 0$ ).

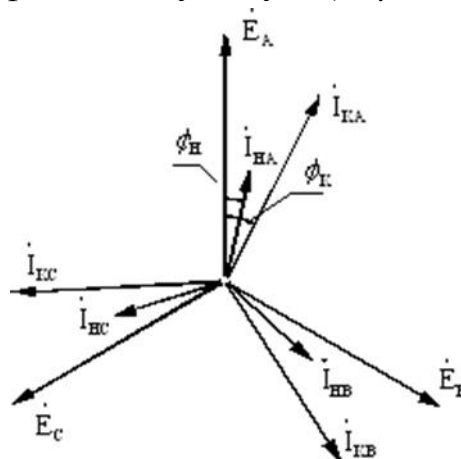


Рис.4.2.

В данном режиме ток в каждой из фаз является синусоидальным и описывается выражением

$$i_n = I_{mn} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_n),$$

где  $\alpha$  – начальная фаза источника,  $I_{mn} = E / \sqrt{Z_{нз}^2 + Z_{к}^2}$  – амплитуда тока в предшествующем режиме,  $\varphi_n$  – угол цепи в нормальном режиме.

После возникновения КЗ (включение выключателя) дифференциальное уравнение для участка цепи между источником и выключателем по 2-му закону Кирхгофа для каждой из фаз имеет вид

$$L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k = e. \quad (4.1)$$

При решении уравнения (4.1) классическим методом, искомый ток КЗ определяется как сумма принужденной и свободной составляющих

$$i_k = i_{k.np} + i_{k.cb} = I_{mk} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a(0)} \exp(-t/T_a), \quad (4.2)$$

где  $I_{mk} = E / Z_k$  – амплитуда тока КЗ,  $\varphi_k$  – угол цепи в режиме КЗ,  $T_a$  – постоянная времени цепи короткого замыкания. Напомним, что постоянная времени определяет скорость затухания свободного тока; свободный ток затухает практически за (3-5)  $T_a$ . Как правило  $\varphi_k \geq \varphi_n$  (рис.4.2), так как в нормальном режиме  $\cos \varphi_n \rightarrow 1$ .

Затухающий по экспоненте свободный ток называется аperiодической слагающей тока КЗ. Начальное значение этой слагающей определяется из первого закона коммутации, т.е. ток в индуктивности не может измениться скачком  $i_{L(0-)} = i_{L(0)} = i_{L(0+)}$ , в этом случае

$$i_{a(0)} = I_{mn} \sin(\alpha - \varphi_n) - I_{mk} \sin(\alpha - \varphi_k).$$

При заданном значении  $\alpha$  максимальное значение  $i_{a(0)}$  имеет место при  $I_{mn} = 0$ , т.е. в случае разомкнутой цепи (в предшествующем режиме); при этом

$$i_{a(0)} = -I_{mk} \sin(\alpha - \varphi_k).$$

В этом случае выражение для тока КЗ в каждой фазе трехфазной цепи имеет вид

$$i_k = I_{mk} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin(\alpha - \varphi_k) \exp(-t/T_a)]. \quad (4.3)$$

Величины  $i_{a(0)}$  в общем случае, во всех фазах различны (их сумма в трех фазах  $i_{aA} + i_{aB} + i_{aC} = 0$ ). Поэтому определение трехфазного КЗ, как симметричного, строго говоря, применительно только к периодическим слагающим фазных токов.

## 4.2. Ударный ток короткого замыкания

Выбор электрических аппаратов и токоведущих частей по условию механической прочности производится по максимально возможному значению тока КЗ. Максимальное мгновенное значение тока КЗ называется ударным током КЗ и обозначается  $i_{y\partial}$ . Ударный ток КЗ обусловлен наложением свободной аperiodической слагающей на принужденную периодическую слагающую тока КЗ. Величина периодической составляющей тока КЗ зависит от параметров цепи КЗ, а аperiodической, кроме того, и от момента КЗ. Максимальное значение аperiodической слагающей имеет место при  $\alpha - \varphi_k = \pm\pi/2$  (из уравнения 4.3). В этом случае уравнение (4.3) принимает вид

$$i_k = I_{mk} \left[ \exp\left(-t/T_a\right) \cos\left(\omega t\right) \right] \quad (4.4)$$

Кривая тока КЗ с наибольшей аperiodической слагающей, соответствующая уравнению (4.4), приведена на рис.4.3. Как видно из рисунка ударный ток КЗ наступает через время, равное примерно полупериоду промышленной частоты и для  $f = 50$  Гц  $t \approx 0,01$  с.

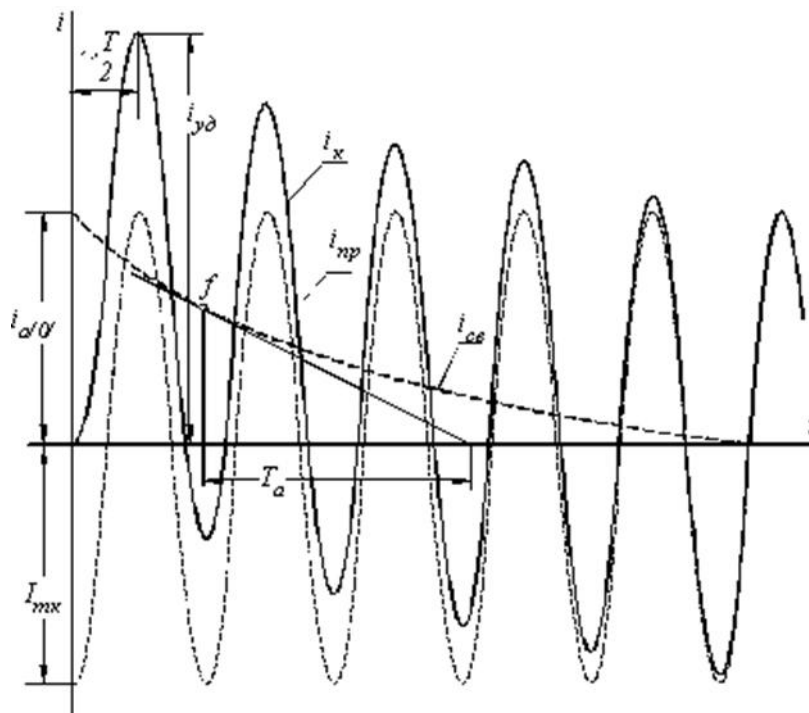


Рис.4.3

Подставив в выражение (4.4) значение  $t = 0,01$  с, получим

$$i_{y\partial} = I_{mk} \left[ 1 + \exp\left(-0,01/T_a\right) \right] = k_{y\partial} I_{mk} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_k'', \quad (4.5)$$

где  $k_{y\partial}$  - ударный коэффициент.

Ударный коэффициент показывает превышение ударного тока над амплитудным значением. При расчетах ударного тока в энергосистемах предполагается, что амплитуда периодической слагающей не затухает.

Ударный коэффициент зависит от постоянной времени первичной цепи; его величина находится в пределах  $1 < k_{y\partial} < 2$ , что соответствует предельным значениям  $T_a$ , т.е.  $T_a = 0$  (при  $L_k = 0$ )  $T_a \rightarrow \infty$  (при  $R_k = 0$ ). Чем меньше значение  $T_a$ , тем быстрее затухает апериодическая слагающая и тем соответственно меньше ударный коэффициент. Реально в электрических сетях  $T_a = 0,01-0,3$  с при этом  $k_{y\partial} = 1,3-1,95$ . С ростом номинального напряжения сети  $T_a$  и, соответственно,  $k_{y\partial}$  возрастают.

Ударный коэффициент может быть определен либо по формуле

$$k_{y\partial} = 1 + \exp(-0,01/T_a), \quad (4.6)$$

либо с помощью кривых на рис. 4.4, выражающих зависимости  $k_{y\partial} = f(C_a)$  или  $k_{y\partial} = f(X/R)$ .

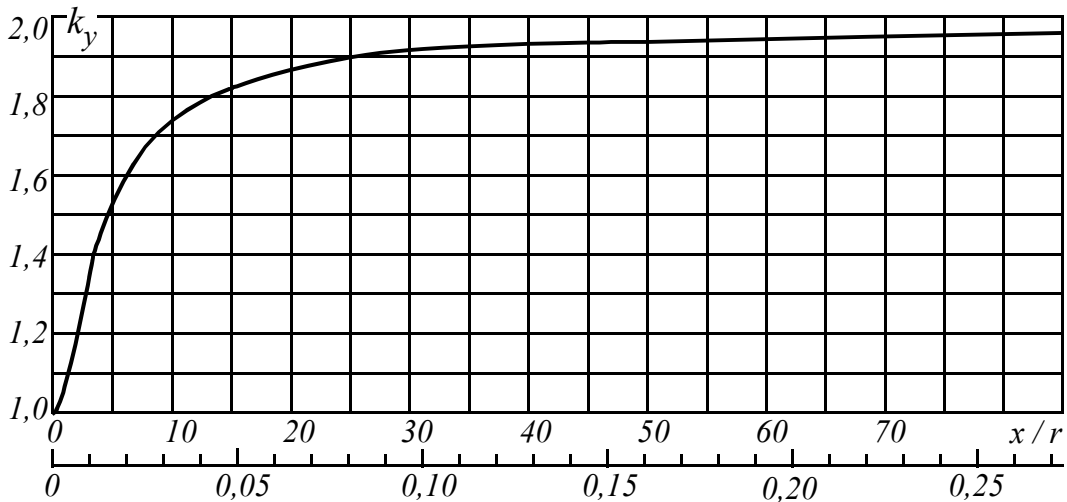


Рис.4.4

При отсутствии необходимых данных величину  $X/R$  для отдельных элементов можно найти из табл. 4.1.

Таблица 4.1.

№ п.п.	Наименование элемента	Отношение $\frac{X}{R}$
1	Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	15 - 85
2	Турбогенераторы мощностью 100 - 500 МВт	100 - 140
3	Гидрогенераторы с демпферными обмотками	40 - 60
4	Гидрогенераторы без демпферных обмоток	60 - 90
5	Трансформаторы мощностью 5 - 30 МВА	7 - 17
6	Трансформаторы мощностью 60 - 500 МВА	20 - 50
7	Реакторы 6 - 10 кВ	15 - 80
8	Воздушные линии	2 - 8
9	Электрическая система	10 - 20
10	Обобщенная нагрузка	2,5

Для разветвленных схем сумму апериодических слагающих токов приближенно заменяют одной экспонентой с эквивалентной постоянной времени

$$T_{aэ} = \frac{X_э}{\omega R_э},$$

где  $X_э$  – суммарное индуктивное сопротивление на промышленной частоте при равных нулю активных сопротивлений ( $R_i=0$ ),  $R_э$  – суммарное активное сопротивление при равных нулю индуктивных сопротивлений ( $X_i=0$ ).

Для снижения погрешности расчета ударного тока на шинах станции целесообразно ударный ток определять отдельно для генераторов ( $г$ ) станции и других источников системы ( $с$ )

$$i_{yд.э} = \sqrt{2}k_{yд.г}I''_{kг} + \sqrt{2}k_{yд.с}I''_{kc}. \quad (4.6)$$

### 4.3. Действующее значение тока короткого замыкания

Под действующим значением тока КЗ для заданного момента времени условно понимают среднеквадратичное значение тока за один период ( $T$ ), в центре которого находится рассматриваемый момент. Таким образом, действующее значение тока

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_k^2 dt}, \quad (4.7)$$

где  $i_k$  – мгновенное значение тока КЗ. Напомним, что действующее значение переменного тока численно равно постоянному току, который выделяет в проводнике такое же количество тепла, что и переменный.

Общее выражение для тока КЗ достаточно сложное, поэтому для упрощения вычисления действующего значения принимают, что за рассмотренный период его обе слагающие не изменяются. Амплитуда периодической слагающей остается постоянной, апериодическая слагающая остается неизменной и равной мгновенному значению свободного тока в рассматриваемый момент времени. При этом выражение (4.4) упрощается и при подстановке его в (4.6) последнее принимает вид

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}, \quad (4.8)$$

где  $I_{nt}$ ,  $I_{at}$  – действующие значения периодической и апериодической составляющих соответственно.

Наибольшее действующее значение тока КЗ имеет место в первый период переходного процесса и вызывает ударное действие на аппараты и токоведущие части. Его можно определить подстановкой (4.5) в (4.8). При неизменном  $I_{nt}$  в первом периоде

$$I_{yд} = I''_k \sqrt{1 + 2\epsilon_{yд} - 1}. \quad (4.9)$$

В соответствие с указанными выше пределами для  $k_{yд}$ , имеем

$$1 < i_{y\partial} / I_{y\partial} < \sqrt{3}.$$

Величина  $I_{y\partial}$  из (4.9) используется для проверки электрических аппаратов на динамическую устойчивость при КЗ.

**Пример 4.1.** Для схемы, приведенной на рис.4.5. произвести расчет сверхпереходного и ударного токов КЗ в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации при трехфазном КЗ.

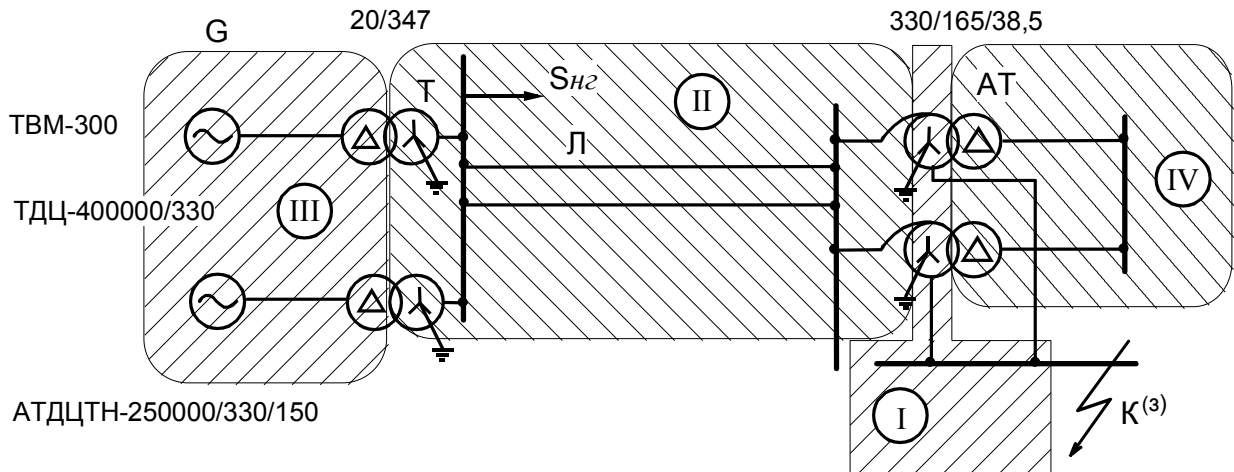


Рис.4.5

Параметры элементов схемы:

- Генератор ТВМ-300:  $P_H = 300$  МВт;  $U_H = 20$  кВ;  $x_d'' = 0,2$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ;
- Трансформатор Т: ТДЦ-400000/330:  $S_H = 400$  МВА;  $U_{HH} = 20$  кВ;  $U_{BH} = 347$  кВ;  $U_{k\%} = 11\%$ ;
- Линия Л: длина  $l = 200$  км, погонное сопротивление  $x_{ног} = 0,393$  Ом/км, провод АСО-600;
- Автотрансформатор АТДЦТН-250000/330/150  $S_H = 250$  МВА;  $U_{BH} = 330$  кВ;  $U_{CH} = 165$  кВ;  $U_{HH} = 38,5$  кВ;  $U_{k*BC} = 9,5\%$ ;  $U_{k*BH} = 74\%$ ;  $U_{k*CH} = 60\%$ .

◁ Схема замещения для расчета сверхпереходного тока приведена на рис.4.6. Здесь указаны только элементы, по которым протекает ток КЗ. Сопротивление  $x_4$  – для обмоток ВН и СН автотрансформатора.

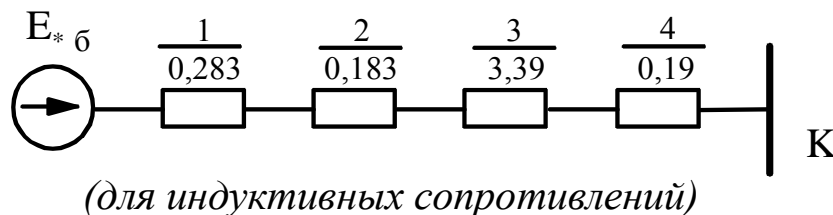


Рис.4.6

Выбираем базисные условия: базисную мощность  $S_{\text{б}} = 1000$  МВА и базисные напряжения ступеней, которые принимаем равными средним напря-

жениям:  $U_{\delta I}=154$  кВ,  $U_{\delta II}=340$  кВ,  $U_{\delta III}=20$  кВ. При приближенном приведении ЭДС генератора в относительных единицах равна 1. Индуктивные сопротивления элементов схемы замещения выражаем в относительных единицах и приводим к принятым базисным условиям:

$$x_{1*\delta} = \frac{1}{2} x_d'' \frac{S_{\delta} \cos \varphi}{P_n} = \frac{1}{2} 0,2 \frac{1000 \cdot 0,85}{300} = 0,283,$$

$$x_{2*\delta} = \frac{1}{2} \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_n} = \frac{1}{2} \frac{11}{100} \frac{1000}{400} = 0,137,$$

$$x_{3*\delta} = \frac{1}{2} x_{noz} l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = \frac{1}{2} 0,393 \cdot 200 \frac{1000}{340^2} = 0,339,$$

$$x_{4*\delta} = \frac{1}{2} \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{S_{\delta}}{S_n} = \frac{1}{2} \frac{9,5}{100} \frac{1000}{250} = 0,19.$$

Суммарное индуктивное сопротивление цепи

$$x_{\Sigma*\delta} = x_{1*\delta} + x_{2*\delta} + x_{3*\delta} + x_{4*\delta} = 0,949.$$

Сверхпереходный ток КЗ

$$I_k'' = \frac{E_{*\delta}''}{x_{\Sigma*\delta}} I_{\delta I} = \frac{E_{*\delta}''}{x_{\Sigma*\delta}} \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta I}} = \frac{1}{0,949} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 154} = 3,95 \text{ кА}.$$

Схема замещения для расчета активных сопротивлений схемы замещения приведена на рис. 4.7.

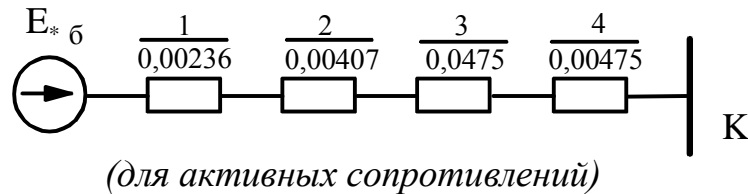


Рис.4.7

Определяем активные сопротивления элементов схемы замещения, приведенные к выбранным базисным условиям (отношения  $\frac{X}{R}$  из табл. 4.1):

$$R_{1*\delta} = x_{1*\delta} \left/ \left( \frac{X}{R} \right)_{ген} \right. = \frac{0,283}{120} = 0,00236,$$

$$R_{2*\delta} = x_{2*\delta} \left/ \left( \frac{X}{R} \right)_{тр} \right. = \frac{0,137}{45} = 0,003,$$

$$R_{3*\delta} = R_{noz} l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta II}^2} = \frac{1}{2} 0,055 \cdot 200 \frac{1000}{340^2} = 0,00475,$$

$$R_{4*\delta} = x_{4*\delta} \left/ \left( \frac{X}{R} \right)_{ам} \right. = \frac{0,19}{40} = 0,00475.$$

Так как активное сопротивление линии значительно превышает активные сопротивления других элементов схемы, то его расчет выполнен более точно с использованием реального значения из приложения.

Находим суммарное активное сопротивление заданного участка цепи

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 0,153.$$

и эквивалентную постоянную времени

$$T_{a\Sigma} = \frac{X_{\Sigma}}{\omega R_{\Sigma}} = \frac{0,949}{314 \cdot 0,153} = 0,198 \frac{1}{c}. \quad \left( \frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \right) = 62,03$$

Определяем ударный коэффициент

$$k_{y\partial} = 1 + \exp\left(-0,01/T_{a\Sigma}\right) = 1 + \exp\left(-0,01/0,198\right) = 1,951$$

и ударный ток

$$i_{y\partial} = \sqrt{2} k_{y\partial} I_k'' = \sqrt{2} \cdot 1,951 \cdot 3,95 = 10,866 \text{ кА}. \quad \triangleright$$

#### Контрольные вопросы к главе 4

1. Выражение для переходного тока КЗ с максимальной апериодической слагающей.
2. Когда возникают апериодические слагающие токов.
3. Что отражает постоянная времени электрической цепи.
4. Что такое ударный ток и ударный коэффициент.
5. Пределы изменения  $k_{y\partial}$ .
6. Действующее значение ударного тока КЗ.
7. Цель расчета  $k_{y\partial}$  и  $I_{y\partial}$ .

#### Задача к главе 4

Используя данные задачи №1 (глава 1) произвести расчет ударного тока КЗ при трехфазном КЗ (в заданной на схеме рис.1.12 точке КЗ) в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Длину и сечение линий выбрать по их номинальным напряжениям.

Активные сопротивления генераторов и трансформаторов определить используя данные табл.4.1, воздушных линий – используя рекомендации главы 1.



## 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Аналитическое исследование электромагнитного переходного процесса в электрических машинах представляет достаточно сложную задачу. Для ее упрощения вводится ряд допущений:

- учитывается только периодическая слагающая тока статора;
- скорость ротора считается неизменной и равной  $\omega$ ;
- рассматривается синхронная машина, работающая отдельно от других источников питания;
- трансформаторные ЭДС принимаются равными нулю, вследствие того, что обобщенные векторы потоков изменяются медленно.

Таким образом, в дальнейшем рассматривается в известной мере идеализированная машина. Это вносит погрешности в оценку отдельных величин. Однако, как показывают сопоставления полученных величин с экспериментальными данными, обычно погрешности находятся в допустимых пределах.

### 5.1. Уравнения синхронной машины в фазных координатах

Принципиальная схема синхронной машины, ротор которой имеет явно выраженные полюсы, представлена на рис.5.1. Первоначально предположим, что синхронная машина не имеет демпферных обмоток.

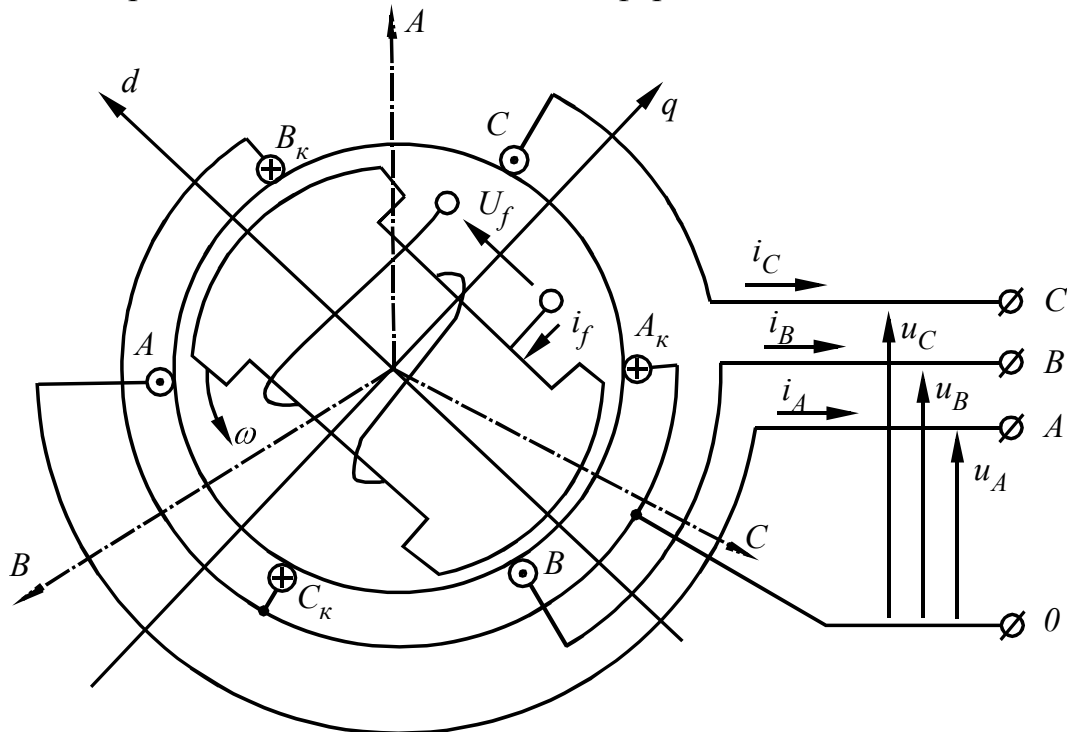


Рис.5.1

Дифференциальные уравнения для каждой из обмоток синхронной машины

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A &= u_A \\ \frac{d\Psi_B}{dt} - Ri_B &= u_B \\ \frac{d\Psi_C}{dt} - Ri_C &= u_C \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned} \right\}, \quad (5.1)$$

где  $R, R_f$  - активные сопротивления контуров каждой фазы цепи возбуждения соответственно,  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f$  - результирующие потокоцепления обмоток статора и обмотки возбуждения соответственно,  $u_A, u_B, u_C, u_f$  - напряжения на зажимах соответствующих обмоток.

При принятых допущениях выражения для потокоцеплений представляют линейные зависимости. Так для потокоцепления фазы  $A$

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f,$$

где  $L_A$  - индуктивность фазы  $A$ ;  $M_{AB}, M_{AC}, M_{Af}$  - взаимоиנדуктивности фазы  $A$  с фазами  $B$  и  $C$  и обмоткой возбуждения (индекс  $f$ ) соответственно.

Аналогично

$$\Psi_f = M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f,$$

где  $L_f$  - индуктивность обмотки возбуждения. Необходимо отметить, что по принципу взаимности  $M_{AB} = M_{BA}$ ,  $M_{Af} = M_{fA}$  и т.д.

Параметры  $L$  и  $M$  зависят от положения ротора относительно обмоток статора и, следовательно, являются функциями времени (только индуктивность обмотки возбуждения  $L_f$  можно считать неизменной).

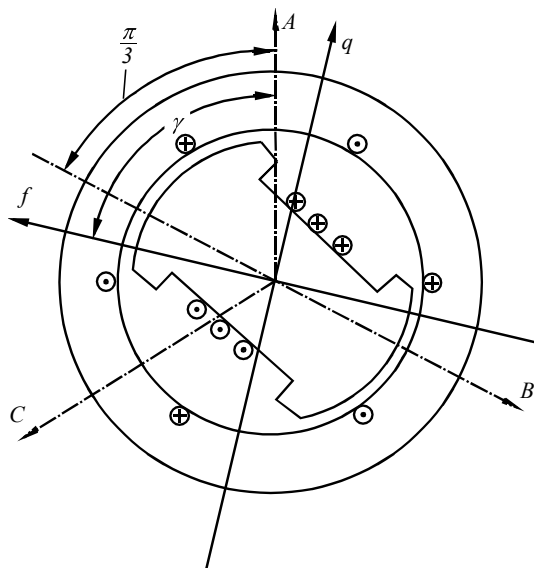


Рис.5.2

Положение ротора будем характеризовать углом  $\gamma = f(t)$  между магнитной осью фазы  $A$  и продольной осью  $d$  (рис.5.2).

Синусоидальность наводимых в статоре ЭДС указывает на закон изменения взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и каждой из фазных обмоток. Так, например, для фазы  $A$

$$M_{Af} = M_{fA} = M_d \cos \gamma,$$

где  $M_d$  - максимальное значение взаимоиנדукции при совпадении магнитных осей обмоток.

Изменение индуктивностей фазных обмоток и взаимных индуктивностей между ними обусловлены вращением явнополюсного ротора, поскольку при этом меняется сопротивление магнитным потокам, которые определяют данные величины. Изменение магнитных потоков происходит гармонически с периодом  $T_1 = T/2$ , так как при повороте ротора на  $180^\circ$  повторяется предыдущий цикл изменения магнитного сопротивления.

Так, например, индуктивность фазы  $A$  определяется выражением,

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma,$$

взаимная индуктивность между обмотками фаз  $A$  и  $B$

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2(\gamma - \pi/3),$$

где  $l_0$ ,  $m_0$  - постоянные составляющие соответствующих индуктивностей;  $l_2$ ,  $m_2$  - амплитуды вторых гармоник соответствующих индуктивностей.

Аналогично могут быть записаны выражения для  $L$  и  $M$  для остальных обмоток.

Таким образом, коэффициенты в уравнениях системы (5.1) являются переменными, что значительно усложняет ее решение. (Дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами называются параметрическими; аналитическое решение имеют только немногие из них).

## 5.2. Обобщенный вектор трехфазной системы и замена переменных синхронной машины

Мгновенные значения токов (напряжений, потоков и т.п.) трехфазной системы можно получить, проектируя один вектор на три оси времени, расположенные под углом  $120^\circ$  (рис.5.3,а). Такой вектор называется обобщенным (или изображающим) вектором трехфазной системы. При его вращении в ту же сторону, что и системы трех векторов, чередование осей времени фаз нужно заменить на противоположное.

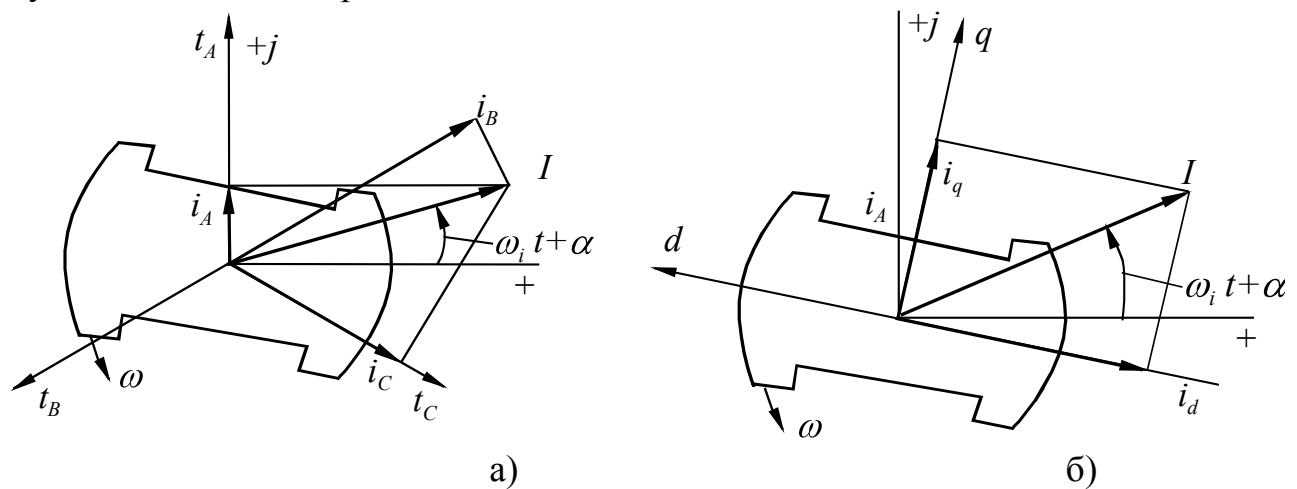


Рис.5.3

Замена фазных переменных величин обобщенным вектором позволяет разложить его на продольную ( $d$ ) и поперечную ( $q$ ) составляющие. Оси  $d, q, 0$  образуют декартову систему координат, вращающуюся вместе с ротором.

Переход от неподвижной фазной системы координат  $A, B, C$  к вращающейся, жестко связанной с ротором системы  $d, q, 0$  был впервые предложен Блонделем для установившегося режима. Парком Р.Х. и Горевым А.А. такой подход был распространен на переходный режим. Это позволяет параметрическую систему уравнений (5.1) свести к системе дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, что упрощает ее решение.

Величина обобщенного вектора  $I$  может быть определена исходя из следующих равенств

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I \sin(\omega_i t + \alpha) \\ i_B &= I \sin(\omega_i t - \pi/3 + \alpha) \\ i_C &= I \sin(\omega_i t + \pi/3 + \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где  $\omega_i$  - угловая скорость обобщенного вектора  $I$ , которая в переходном режиме может отличаться от угловой скорости вращения ротора  $\omega$ ,  $\alpha$  - начальный угол обобщенного вектора относительно оси, перпендикулярной оси обмотки  $A$ .

Если возвести равенства (5.2) в квадрат и просуммировать их, то получим величину обобщенного вектора

$$I = \sqrt{\frac{2}{3} (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}.$$

Фазные токи на основе рис.5.3,б (при  $I_0=0$ ):

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma \\ i_B &= i_d \cos(\gamma - 2\pi/3) + i_q \sin(\gamma - 2\pi/3) \\ i_C &= i_d \cos(\gamma + 2\pi/3) + i_q \sin(\gamma + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

### 5.3. Уравнения Парка-Горева для синхронной машины

В уравнение для фазы  $A$  обмотки статора (из системы (5.1))

$$\frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A = u_A$$

подставим выражения для фазных величин  $(\Psi, i, u)$ , выраженные через обобщенные векторы в продольной и поперечной осях ротора (из системы 5.3))  $i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma$ ,  $u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma$ ,  $\Psi_A = \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma$ .

С помощью этой подстановки заменим фазные переменные обобщенными. После дифференцирования и преобразования получим

$$\left( u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d \right) \cos \gamma + \left( u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q \right) \sin \gamma = 0. \quad (5.4)$$

Равенство (5.4) может быть удовлетворено при любом значении  $\gamma$ , только при условии, что каждое выражение в скобках тождественно равно нулю. Приравнявая выражения в скобках к нулю, получим два уравнения. Добавим к полученным уравнениям уравнение для обмотки возбуждения из

системы (5.1), получим систему уравнений при отсутствии демпферных контуров

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d &= -u_d \\ \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q &= -u_q \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Полученные уравнения называются уравнениями Парка-Горева. Они выражают теорию двух реакций обмоток статора синхронной машины и характеризуют переходный процесс в ней. Входящие в систему дифференциальные уравнения имеют постоянные коэффициенты.

Слагаемые  $\frac{d\Psi_d}{dt}$ ,  $\frac{d\Psi_q}{dt}$  представляют ЭДС трансформации, так как наводятся в обмотках статора и ротора благодаря изменению потокосцеплений. Трансформаторные ЭДС наводятся в переходном режиме, в стационарном режиме они отсутствуют.

Слагаемые, содержащие  $\frac{d\gamma}{dt}$ , представляют собой ЭДС вращения (резания), которые наводятся в обмотках статора благодаря вращающемуся полю. В обмотках ротора в стационарном режиме эти ЭДС отсутствуют, так как не создают в них изменяющегося потока. В переходном режиме происходит перемещение обобщенного вектора потока относительно ротора и в его обмотках наводятся ЭДС скольжения. Потокосцепления  $\Psi_d$  и  $\Psi_q$  включают потоки рассеяния обмоток статора. Полные синхронные индуктивности  $L_d = L_{ad} + L\sigma$ ,  $L_q = L_{aq} + L\sigma$ . При принятом положительном направлении потока из ротора в статор результирующее потокосцепление можно выразить через обобщенные векторы токов ротора и статора

$$\Psi_d = L_{ad} i_f - L_d i_d, \quad \Psi_q = -L_q i_q.$$

#### 5.4. Трехфазное короткое замыкание синхронной машины

*5.4.1. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток при отключенном регуляторе возбуждения.* При указанных выше допущениях и учитывая, что в месте КЗ  $u_d = u_q = 0$  из первого и второго уравнений системы (5.5) путем несложных преобразований можно получить

$$I = \frac{E_q}{\sqrt{x_d^2 + R^2}}, \quad (5.6)$$

где  $E_q = Ri_q + x_d i_d$  - синхронная ЭДС в установившемся режиме. Выражение (5.6) может быть использовано для расчета переходного режима при заданных значениях  $E'_q$  и  $x'_d$ .

Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока получим из третьего уравнения системы (5.5)

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f = u_f.$$

Разделим это уравнение на  $R_f$ , и учитывая, что  $\Psi_f = L_f i_f$ , получим

$$\frac{L_f}{R_f} \frac{di_f}{dt} + i_f = \frac{u_f}{R_f}, \quad (5.7)$$

где  $i_{fe} = \frac{u_f}{R_f}$  - вынужденный ток возбуждения.

Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора

$$T_{f0} = \frac{L_{f0}}{R_f};$$

при замкнутой обмотке статора постоянная времени свободного переходного тока статора

$$T'_d = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d}.$$

С учетом последнего выражения перепишем уравнение (5.7) в виде

$$T'_d \frac{di_f}{dt} + i_f = i_{fe}. \quad (5.8)$$

Так как относительных единицах ток возбуждения равен ЭДС  $i_{f*} = E_{q*}$ , то (5.8) представим в виде

$$T'_d \frac{dE_q}{dt} + E_q = E_{qe}, \quad (5.9)$$

где  $E_{qe}$  - вынужденная ЭДС, создаваемая возбудителем, равная при отключенном регуляторе возбуждения ЭДС предшествующего режима.

Решение дифференциального уравнения (5.9)

$$E_q = E_{q0} - E_{qe} \exp(-t/T'_d) + E_{qe}, \quad (5.10)$$

где  $E_{q0}$  - начальная полная ЭДС в первый момент КЗ с учетом возрастания за счет свободных токов ответной реакции ротора.

В соответствие с (5.6) разделим все члены уравнения (5.10) на  $(x_d + x_{вн})$  ( $x_{вн}$  - внешнее сопротивление по отношению к синхронной машине), пренебрегая активными сопротивлениями; получим действующее значение тока в любой момент времени

$$I_t = I_{dt} = (I'_0 - I_\infty) \exp(-t/T'_d) + I_\infty = I'_{св.0} \exp(-t/T'_d) + I_\infty, \quad (5.11)$$

где  $I'_{св.0} = I'_0 - I_\infty$  - начальный свободный переходный ток.

Начальный переходный ток КЗ определяется из формулы

$$I'_0 = \frac{E'_q}{x'_d + x_{вн}},$$

установившейся ток, соответствующий принужденной ЭДС  $E_{qe}$

$$I_\infty = \frac{E_{qe}}{x_d + x_{вн}}.$$

Выражение (5.11) определяет обобщенный ток трехфазной системы токов статора. Кривая действующего значения тока, соответствующая (5.11) приведена на рис.5.4. С течением времени в следствии реакции статора происходит размагничивание магнитной системы машины, что приводит к уменьшению тока в обмотке возбуждения  $L_f$  и пропорциональных ему  $E'_q$  и  $I_t$ .

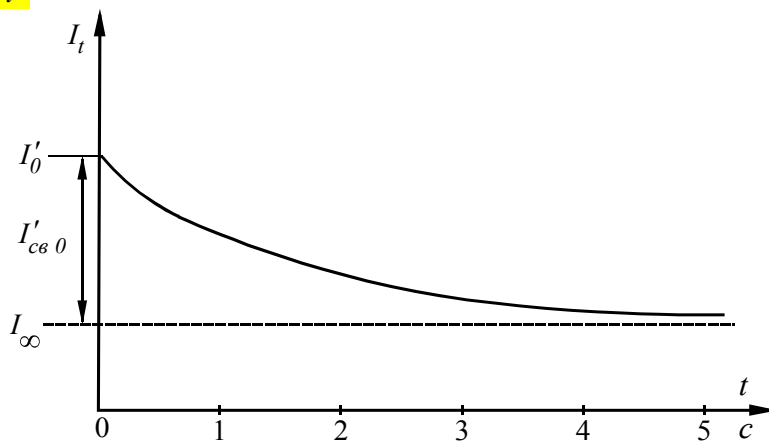


Рис.5.4

Следует дополнительно отметить появление небольших токов второй гармоники в статоре явнополюсной машины (гидрогенератора) вследствие несимметрии ротора по продольной и поперечной осям. Благодаря демпферной обмотке вторая гармоника практически уничтожается.

**5.4.2. Влияние демпферных обмоток на ток короткого замыкания.** Упрощенно можно считать, что демпферная обмотка приводит к возникновению дополнительного свободного сверхпереходного тока

$$I''_{св} \approx I''_{дсв} = (I''_0 - I') \exp(-t/T''_d)$$

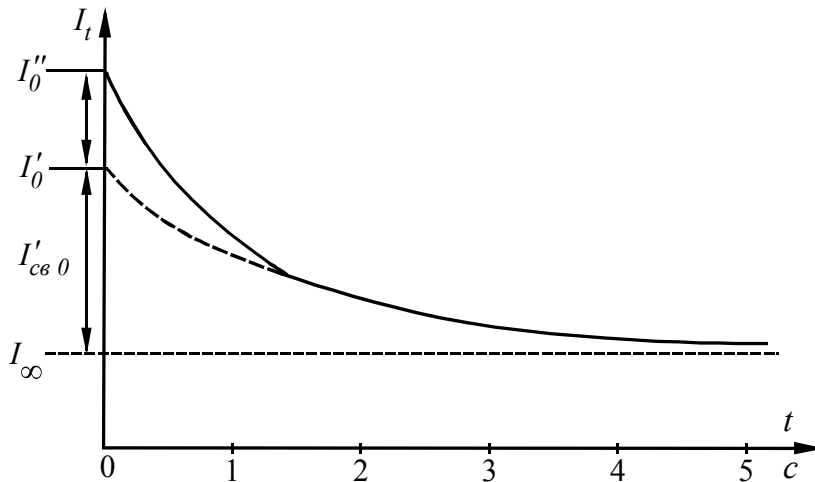
где  $T''_d$  - постоянная времени демпферной обмотки при замкнутой обмотке статора,  $I''_0 = E''_q / (x''_d + x_{вн})$  - начальный сверхпереходный ток.

Ток КЗ в любой момент времени

$$I_t = I''_{св.0} \exp(-t/T''_d) + I'_{св.0} \exp(-t/T'_d) + I_\infty. \quad (5.12)$$

Выражение (5.12) с двумя постоянными времени с допустимой для практики погрешностью (10-15%) позволяет определить периодический ток. В действительности процесс протекает сложнее. Демпферные обмотки и тело ротора имеют много контуров, свободные токи вначале протекают по поверхности, постепенно проникая внутрь. Магнитная связь между продольной

демпферной обмоткой и обмоткой возбуждения исключает независимое изменение тока в любой из них.



В начальный момент ответная реакция ротора проявляется благодаря демпферной обмотке. Затем апериодический ток проникает в демпферную обмотку. Демпферная обмотка несколько увеличивает свободный переходный ток (выражение 5.12), но уменьшает его постоянную времени.

ную времени.

Рис.5.5

Кривая тока в со-

ответствии с выражением (5.12) приведена на рис.5.5.

**5.4.3. Учет и влияние автоматического регулятора возбуждения.** Под устройством автоматического регулирования возбуждения (АРВ) в данном разделе будем понимать простейшее устройство релейной форсировки возбуждения, которое приходит в действие при определенном снижении напряжения генератора (например, при КЗ). Релейная форсировка является простой, но эффективной мерой повышения устойчивости работы генераторов, а также потребителей электроэнергии. Последняя характеризуется предельным (потолочным) током возбуждения, скоростью нарастания напряжения и вынужденного тока возбуждения.

Существенной особенностью данного режима работы является нелинейность характеристики возбудителя и машины (вследствие насыщения зубцов ротора и других элементов пути магнитного потока).

Для упрощения решения задачи расчета тока КЗ характеристики машины будем считать линейными, соответствующими некоторому среднему насыщению. При этом можно считать, что действие АРВ заключается в увеличении тока КЗ (независимо от наличия демпферных обмоток). Выражение для тока КЗ можно представить в виде

$$I_t = I_{t \text{ без АРВ}} + \Delta I_{np} F(t) \quad (5.13)$$

где  $\Delta I_{np}$  - предельное приращение установившегося тока КЗ за счет АРВ,  $F(t)$  - функция, определяющая закон приращения во времени синхронной ЭДС вследствие форсировки возбуждения машины (зависит от постоянных времени сверхпереходного тока и обмотки возбуждения);  $I_{t \text{ без АРВ}}$  - периодическая слагающая тока КЗ при отключенном АРВ (вычисляется по формулам (5.11) или (5.12) в зависимости от наличия демпферных обмоток). Кривая тока КЗ при наличии АРВ приведена на рис.5.6. Действие АРВ начинает



проявляться спустя некоторое время после КЗ (около 0,5 с) вследствие инерции магнитных потоков, сцепленных с обмотками.

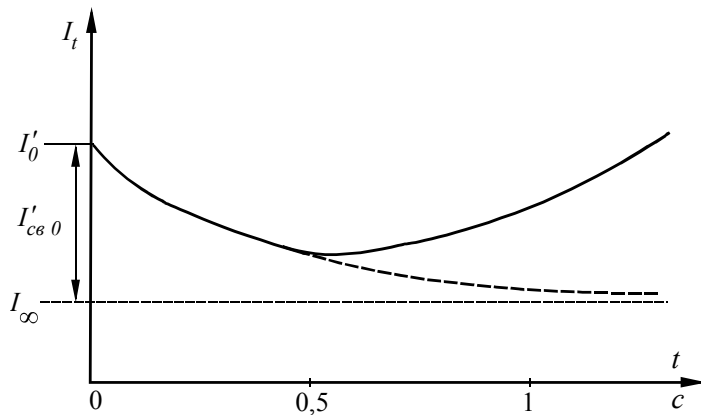


Рис.5.6

Выражение (5.13) предполагает увеличение тока возбуждения до предельного значения, что соответствует близким КЗ. При удаленных КЗ напряжение генератора через 1-5 с может достигнуть номинального  $U_H$ , после чего АРВ поддерживает ток возбуждения на достигнутом уровне. При этом ток КЗ в генераторе, также

неизменный

$$I_t = \frac{U_H}{x_{вн}}.$$

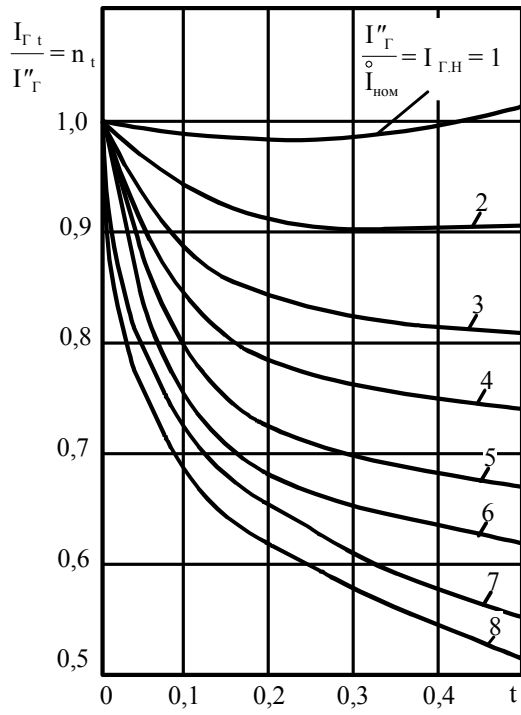
При включенном АРВ затухание свободных оков, возникших при КЗ, компенсируется увеличением токов от действия АРВ.

#### 5.4.4. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания методом типовых кривых

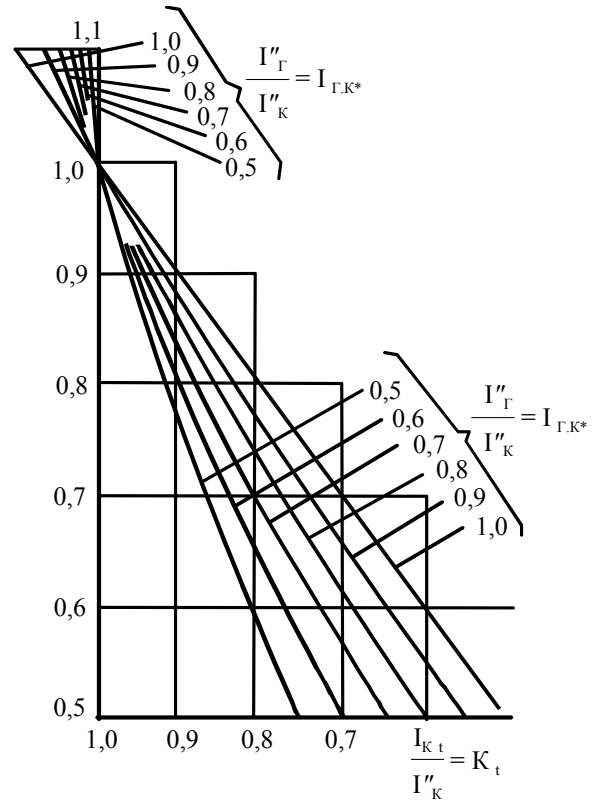
Наиболее важным и характерным является начальное значение периодической слагающей тока КЗ. В ряде случаев требуется учитывать изменение периодической слагающей тока КЗ: для проверки термической устойчивости аппаратов, отключаемого тока, анализа действия релейной защиты.

Для расчета периодической слагающей тока КЗ в разные моменты времени переходного режима используется инженерный метод типовых кривых (рис. 5.7., а, в. Известно, что параметры турбо- и гидрогенераторов различны, поэтому характер изменения тока во времени различен даже при одинаковой удаленности КЗ. Авторами метода типовых кривых на основании многочисленных расчетов по уравнениям Парка-Горева с использованием ЭВМ удалось получить средние кривые изменения тока во времени в относительных единицах между кривыми для турбо- и гидрогенераторов. Максимальная погрешность усреднения не превышает 10%, что является приемлемым для практических расчетов. Использование типовых кривых рекомендуется для турбогенераторов мощностью 12,5 – 800 МВт, гидрогенераторов до 500 МВт и всех крупных синхронных компенсаторов.

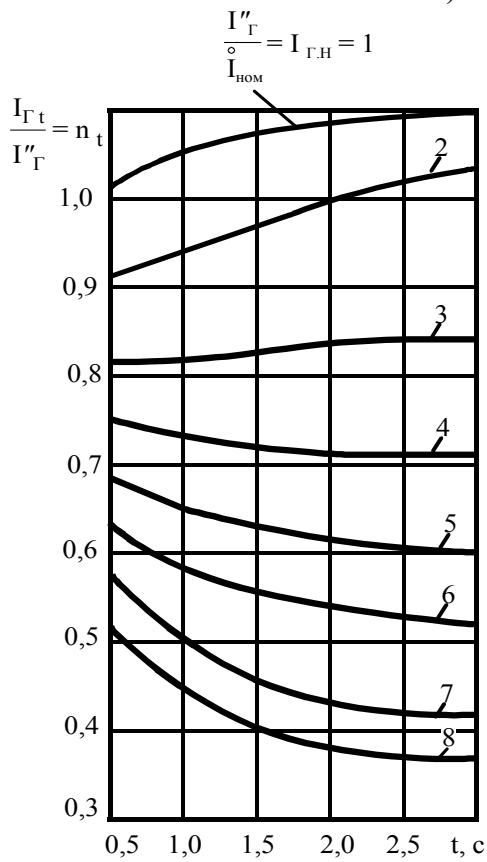
Типовые кривые представляют собой относительные значения токов (отнесены к сверхпереходным токам генератора) для различных моментов времени  $t$ . Для учета удаленности КЗ введено отношение начального тока КЗ генератора  $I''_{кз}$  к его номинальному току  $I_{ном}$ , т.е.  $I_{н.з*} = I''_{кз} / I_{ном}$ , характеризующие кратность тока КЗ к номинальному току.



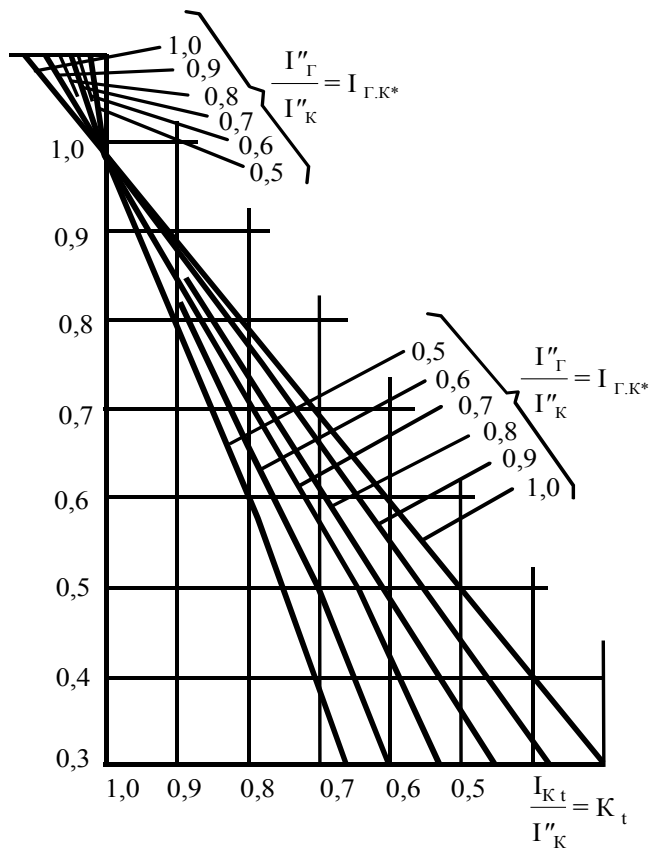
a)



б)



в)



г)

Рис.5.7

Таким образом, типовые кривые представляют собой семейство кривых  $f(t) = I_{ct}/I''_2$  при различных значениях  $I''_{k2}/I''_{ном} = const$ , которые характеризуют изменение во времени относительного тока.

Во многих случаях систему нельзя представить одним генератором, так как многие электрические станции имеют различную удаленность от места КЗ и, следовательно, различную скорость затухания периодической слагающей. В этом случае схему замещения представляют в виде двух источников: эквивалентного генератора станции и системы бесконечной мощности, у которой периодическая слагающая тока КЗ постоянна (рис.5.8).

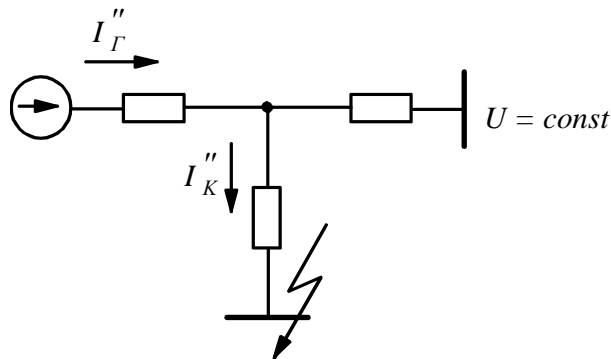


Рис.5.8

Для учета влияния системы Ульянов С.А. предложил ввести еще одну зависимость  $I_{2.k*} = I''_2/I''_K$  (рис. 5.7,б,г), удобную для непосредственного определения тока в месте КЗ. Кривые на рис. 5,7,а, б построены для диапазона времен 0-0,5 с; кривые на рис.5.7, в, г – для диапазонов времен 0,5-3 с.

Расчет токов КЗ с помощью типовых кривых при отсутствии системы бесконечной мощности производится в следующей последовательности.

1. Составляется схема замещения для начального сверхпереходного режима. Все генераторы и нагрузки вводятся своими сверхпереходными ЭДС.

2. Схема замещения преобразуется (упрощается) относительно точки КЗ и определяются эквивалентные ЭДС  $E''_2$  и сопротивление  $x''_2$ .

3. С помощью найденных значений ЭДС и сопротивления определяется начальный ток КЗ от обобщенного генератора  $I''_2$  (при расчете без учета нагрузок он равен току в месте КЗ).

4. Определяется номинальный ток генераторов, приведенный к ступени КЗ

$$I''_{ном} = \frac{P_{э.ном}}{\sqrt{3}U_{ном} \cos \varphi_n},$$

где  $P_{э.ном}$  - номинальная мощность всех генераторов станции,  $U_{ном}$  - напряжение генератора, приведенное к ступени КЗ (среднее номинальное напряжение ступени КЗ),  $\cos \varphi_n$  - коэффициент мощности.

5. По найденным в п.п. 3 и 4 значениям  $I''_2$  и  $I''_{ном}$  определяется кратность начального тока КЗ генератора

$$I_{2.k*} = I''_2 / I''_{ном}.$$

Для заданных моментов времени определяются действующие значения периодической составляющей тока КЗ, используя найденные по кривым значения  $n_t$

$$I_{zt} = I'' n_t.$$

**Пример 5.1.** Для схемы, приведенной на рис. 5.9, произвести расчет изменения во времени периодической составляющей тока КЗ в месте трехфазного повреждения, используя типовые кривые.

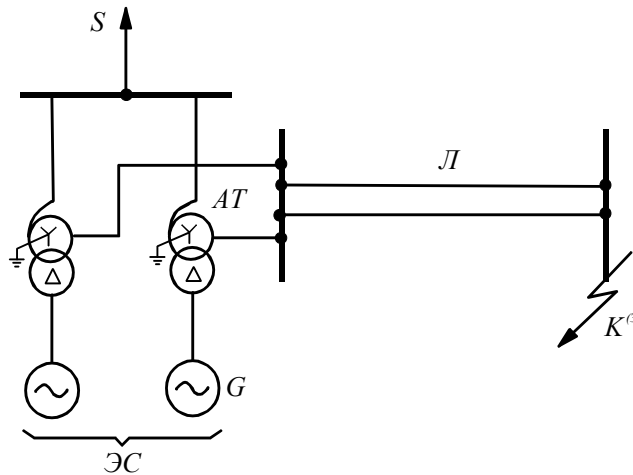


Рис.5.9

Параметры элементов схемы:

- Генератор  $G$ :  $S_H = 264,7$  МВА;  $U_H = 15,75$  кВ;  $x_d'' = 0,2$ ;
- Автотрансформатор Т:  $S_H = 250$  МВА;  $U_{BH} = 220$  кВ;  $U_{CH} = 121$  кВ;  $U_{HH} = 15,75$  кВ;  $U_{k\%BC} = 11\%$ ;  $U_{k\%BH} = 32\%$ ;  $U_{k\%CH} = 11\%$ ;
- Линия Л: длина  $l = 15$  км, погонное сопротивление  $x_{ног} = 0,4$  Ом/км.

◁ Схема замещения для расчета сверхпереходного тока приведена на рис.5.10. Здесь указаны только элементы, по которым протекает ток КЗ.  $x_2$  — сопротивление обмоток НН и СН автотрансформатора.

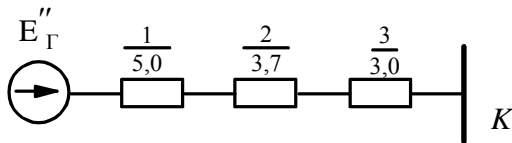


Рис.5.10

Определим сопротивления элементов схемы в именованных единицах, приведенные к ступени напряжения, на которой произошло КЗ:

$$x_1 = \frac{1}{2} x_d'' \frac{U_{cp.H}^2}{S_H} = \frac{1}{2} 0,2 \frac{115^2}{264,7} = 5,0 \text{ Ом},$$

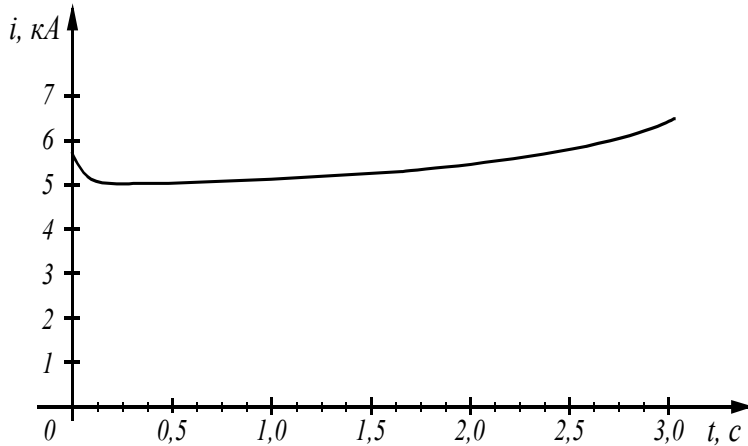
$$x_2 = \frac{1}{2} \frac{U_{kCH\%}}{100\%} \frac{U_{cp.H}^2}{S_H} = \frac{14}{100} \frac{115^2}{250} = 3,7 \text{ Ом},$$

Расчет с использованием типовых кривых проводится с приближенным приведением коэффициентов трансформации.

$$x_3 = \frac{x_{noz} l_1}{2} = \frac{1}{2} 0,4 \cdot 15 = 3,0 \text{ Ом},$$

Суммарное сопротивление цепи, приведенное к ОС

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 + x_3 = 11,7 \text{ Ом}.$$



Сверхпереходный ток КЗ

$$I''_{\Sigma} = \frac{E''}{\sqrt{3} x_{\Sigma}} = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 11,7} = 5,74 \text{ кА}$$

Номинальный ток объединенного генератора электростанции

$$I_{\Sigma.ном} = \frac{S_{\Sigma.ном}}{\sqrt{3} U_{\Sigma.ном}} = 1,35 \text{ кА}.$$

Рис 5.11

Относительные значения тока генератора  $I_{\Sigma t} / I''_{\Sigma} = n_t$  определяем по кривым рис.5.7,а, в. Действующие значения периодической составляющей тока  $I_{\Sigma t} = I''_{\Sigma} n_t$ . Кривая тока  $I_{\Sigma t}$  показана на рис. 5.11. ▷

## 5.5. Переходные процессы в электрических двигателях

Изложенное выше, относится не только к синхронным генераторам, но и синхронным двигателям и компенсаторам, так как последние вследствие инерции в первые периоды КЗ заметно не снижают скорость вращения ротора.

Синхронные двигатель и компенсатор являются дополнительными источниками тока КЗ, так как их сверхпереходная (или переходная) ЭДС больше подведенного напряжения ( $U_c$ ), которое при возникновении КЗ в любой точке сети уменьшается. Схема замещения синхронного двигателя такая же, как и синхронного генератора. Параметры схемы замещения синхронного двигателя находятся, используя параметры предшествующего режима. При отсутствии справочных данных для синхронного двигателя можно приближенно принять  $E''_{*CD} = 1,1$  и  $x''_{*CD} = 0,2$ .

Для определения ударного тока от синхронного двигателя, необходимо предварительно определить постоянную времени, для нахождения которой находится его активное сопротивление

$$R_{CD*} = 0,25 \left( 1 - \eta_n \right) \frac{1}{\cos \varphi},$$

где  $\eta_n$  - КПД двигателя.

Недовозбужденный синхронный двигатель также работает в режиме генератора при значительных снижениях напряжения, возникающих при КЗ (при малой удаленности КЗ). При малых снижениях напряжения, когда со-

храняется неравенство  $E'' < U_c$ , он по-прежнему будет потреблять ток из сети.

Асинхронные двигатели, составляющие основную часть промышленной нагрузки, работают с малым скольжением  $s=2-5\%$ . Как показано Щедриным Н.Н., для практических расчетов можно считать, что они работают с синхронным числом оборотов. Следовательно, в начальный момент КЗ асинхронный двигатель можно рассматривать как недовозбужденный синхронный.

Существенный ток КЗ генерируют только асинхронные двигатели, непосредственно связанные с точкой КЗ или находящиеся в зоне малой удаленности от нее, т.е. те, у которых сверхпереходные ЭДС превышают напряжения сети в точке присоединения двигателей. Этот ток обусловлен электромагнитной энергией, запасенной в обмотках АД до возникновения КЗ.

Ротор асинхронного двигателя в начальный момент КЗ продолжает по инерции вращаться. В цепи ротора протекает остаточный ток, а соответствующий ему поток пронизывает обмотку статора, и, вследствие его изменения в ней наводится ЭДС. Так как цепь обмотки статора замкнута, протекает ток к точке КЗ. После затухания свободного тока ротора (вследствие активного сопротивления цепи ротора) генерирование тока асинхронным двигателем прекращается.

Исходя из неизменности потокосцепления с обмоткой ротора в начальный момент КЗ, для асинхронного двигателя можно установить его сверхпереходные ЭДС и сопротивление. Схема замещения асинхронного двигателя для определения сверхпереходных параметров идентична схеме замещения синхронного генератора. Сверхпереходное сопротивление асинхронного двигателя по существу является сопротивлением КЗ (т.е. когда АД заторможен), относительную величину которого можно определить из выражения  $x_{*AD}'' = 1/k_{пуск}$ , ( $k_{пуск}$  - кратность пускового тока). Сверхпереходная ЭДС определяется из условий предшествующего режима. При отсутствии справочных данных она приближенно может быть принята равной  $E_{*AD}'' = 0,9$ .

Относительно большие активные сопротивления обмоток статора и ротора АД обуславливают весьма быстрое затухание периодической и апериодической составляющих генерируемого АД тока. На рис.5.12 показана характерная кривая тока, генерируемого АД в начальный момент времени после возникновения КЗ.

Дополнительный ударный ток от АД

$$i_{уд.АД} = \frac{E_{AD}''}{x_{AD}''} \sqrt{2} k_{уд.АД},$$

где  $k_{уд.АД}$  - ударный коэффициент асинхронного двигателя. Кривые изменения ударного коэффициента в зависимости от мощности АД показаны на рис. 5.13 в виде заштрихованной зоны. Кривые построены с учетом затухания периодической составляющей тока КЗ.

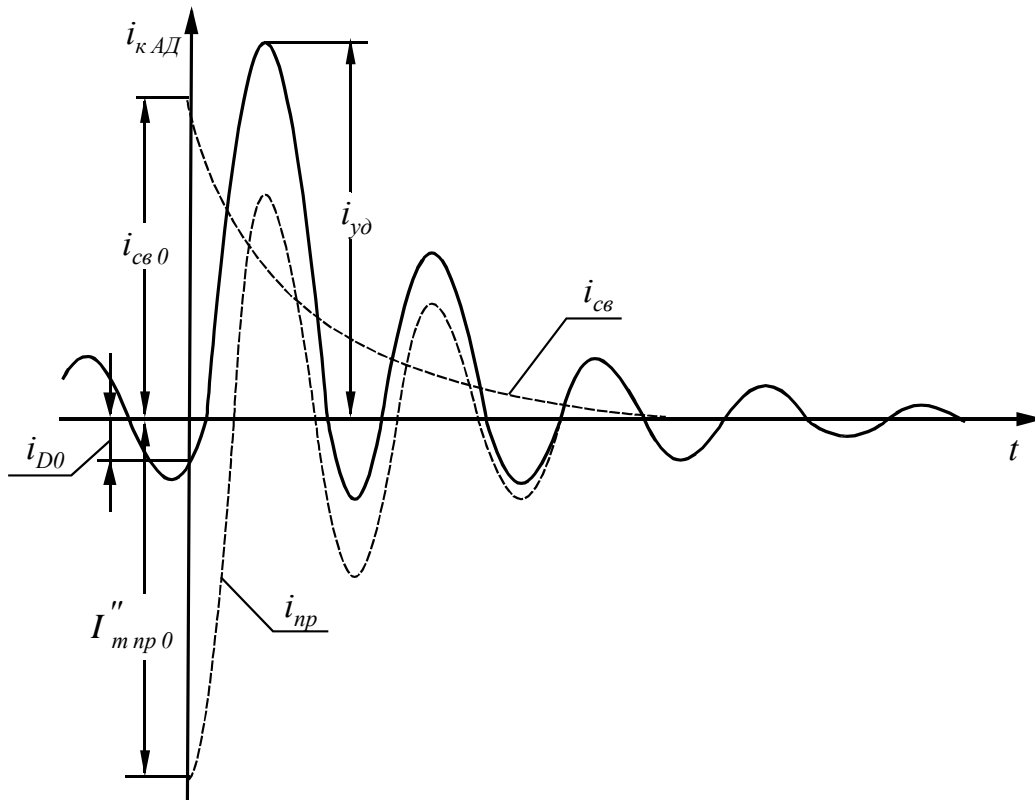


Рис.5.12

Совокупность мелких асинхронных двигателей может быть заменена одним эквивалентным двигателем и называется обобщенной нагрузкой. Аналогично асинхронному двигателю обобщенная нагрузка в начальное время КЗ генерирует ток КЗ. Схема замещения обобщенной нагрузки в начале переходного режима КЗ идентична схеме замещения синхронного генератора.

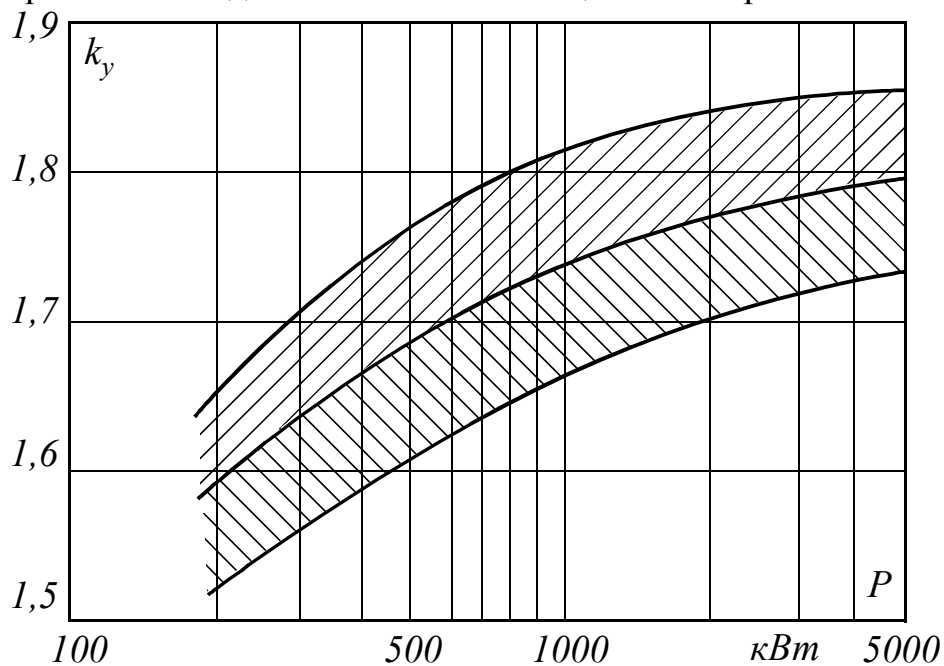


Рис.5.13

Для обобщенной нагрузки рекомендуются следующие параметры, отнесенные к полной рабочей мощности и среднему номинальному напряжению:  $E'' = 0,85$ ;  $x'' = 0,35$ ;  $X/R = 2,5$ ;  $k_{уд} = 1$ .

Дополнительный ударный ток, генерируемый обобщенной нагрузкой

$$i_{уд.нагр} = k_{уд.нагр} \sqrt{2} I''_{нагр} = 1 \cdot \sqrt{2} \frac{0,85}{0,35} \frac{S_{раб}}{\sqrt{3} U_{ср}}.$$

### Контрольные вопросы к главе 5

1. Дифференциальные уравнения синхронной машины в фазных координатах.
2. От чего зависят собственные и взаимные индуктивности синхронной машины.
3. Обобщенный вектор трехфазной системы.
4. Уравнения Парка-Горева для синхронной машины.
5. Объяснить вид кривой зависимости периодической слагающей тока при КЗ на зажимах синхронного генератора без демпферных обмоток и отключенном АРВ.
6. Объяснить вид кривой зависимости периодической слагающей тока при КЗ на зажимах синхронного генератора с демпферными обмотками и отключенном АРВ.
7. Влияние АРВ на вид кривой периодической слагающей тока при КЗ на зажимах синхронного генератора.
8. Последовательность расчета периодической слагающей тока КЗ с помощью типовых кривых.
9. Поведение синхронного двигателя в первый момент времени после КЗ на его зажимах.
10. Поведение асинхронного двигателя в первый момент времени после КЗ на его зажимах.
11. Поведение обобщенной нагрузки в первый момент времени после КЗ на ее зажимах.

### Задача к главе №5

С помощью типовых кривых произвести расчет периодической слагающей тока КЗ, используя исходные данные задачи №1 (глава 1). Влиянием системы пренебречь. Построить кривую изменения тока во времени.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

П1. Справочные данные по синхронным генераторам.

П2. Краткие сведения о трансформаторах с расщепленными обмотками.

П3. Справочные данные по силовым трансформаторам.

П4. Пропускная способность одной цепи лэп и предельное расстояние передачи.

П5. Индуктивные сопротивления воздушных линий с алюминиевыми и стале-алюминевыми проводами.

П6. Характеристики алюминиевых и сталеалюминевых проводов

П7. Активные и индуктивные сопротивления трехжильных кабелей.

П8. Краткие сведения о сдвоенных реакторах.

П9. Справочные данные по реакторам.

П10. Справочные данные по синхронным двигателям серий СД и СДН.

П11. Преобразование двух параллельно включенных ветвей.

## Приложение 1

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРАМ  
ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

Тип	$P_H$ , МВт	$\cos \varphi$	$U_H$ , кВ	$x_d''$	$x_d'$	$x_d$
ТВС-30	30	0,8	6,3;10,5	0,152	0,257	2,53
ТВ-50-2	50	0,8	10,5	0,135	0,2	1,84
ТВ-100-2	100	0,85	13,8	0,14	0,2	1,8
ТВ2-150-2	150	0,9	18,0	0,122	0,18	1,49
ТВФ-60-2	60	0,8	6,3	0,195	0,28	1,61
ТВФ-100-2	100	0,85	10,5	0,183	0,26	1,79
ТВФ-200-2	200	0,85	11,0	0,165	0,25	1,88
ТВВ-160-2	160	0,85	18,0	0,22	0,329	2,3
ТВВ-200-2	200	0,85	15,75	0,191	0,275	1,88
ТВВ-320-2	320	0,85	20,0	0,173	0,26	1,7
ТВВ-500-2А	500	0,85	20,0	0,24	0,326	2,57
ТВВ-800-2	800	0,9	24,0	0,219	0,307	2,33
ТВВ-1200-2	1200	0,9	24,0	0,247	0,357	2,42
ТГВ-200	200	0,85	15,75	0,19	0,295	1,85
ТГВ-300	300	0,85	20,0	0,195	0,3	2,2
ТГВ-500	500	0,85	20,0	0,243	0,373	2,413
ТВМ-300	300	0,85	20,0	0,2	0,33	2,11

## ГИДРОГЕНЕРАТОРЫ

№ п.п.	Тип	$S_H$ , МВА	$U_H$ , кВ	$x_d''$
1	СВ375/195-12	65,5	10,5	0,16
2	СВ640/170-24	78,8	13,8	0,2
3	СВ795/230-32	134	11,0	0,18
4	СВ1160/180-72	103,5	13,8	0,24
5	СВ1190/250-48	264,7	15,75	0,24
6	СВ1690/175-64	590	15,75	0,3
7	ВГС375/89-28	9,4	6,3	0,2

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ

Двухобмоточный трансформатор с двумя расщепленными обмотками на низшем напряжении можно рассматривать как трехобмоточный трансформатор, поэтому его схема замещения также представляется в виде трехлучевой звезды. Однофазный и трехфазный двухобмоточный трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на две одинаковые цепи (обмотки), характеризуется сквозным реактивным сопротивлением  $x_{скв}$  равным  $x_{B-H}$ , где  $x_{B-H}$  - реактивное сопротивление этого трансформатора при параллельной работе расщепленных обмоток, т.е. без расщепления. Условное изображение трансформатора с расщепленными обмотками и схема его замещения приведены на рис.П.2.1.

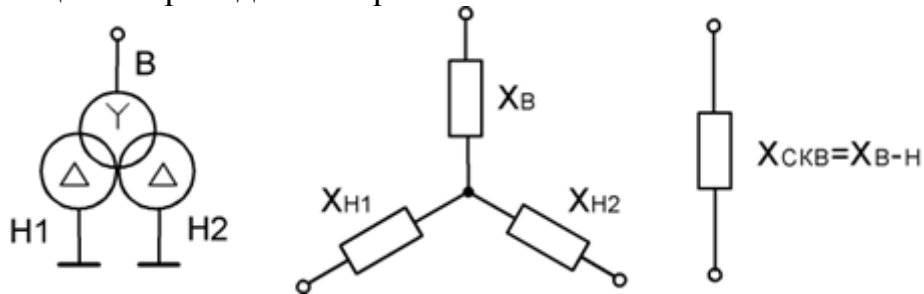


Рис.П.2.1.

При раздельной работе расщепленных обмоток такой трансформатор характеризуется реактивным сопротивлением расщепления  $x_{расц}$ , определенным по напряжению КЗ между двумя одинаковыми расщепленными обмотками. Из схемы замещения следует  $x_{расц} = x_{H1} + x_{H2}$ . Так как обмотки  $H1$  и  $H2$  одинаковы, то

$$x_{H1} = x_{H2} = 0,5x_{расц}. \quad (\text{П.2.1})$$

Из схемы замещения (рис.П.2.1) с учетом (П.2.1) имеем

$$x_{скв} = x_{B-H} = x_B + \frac{x_{H1} \cdot x_{H2}}{x_{H1} + x_{H2}} = x_B + 0,25x_{расц},$$

откуда

$$x_B = x_{B-H} - 0,25x_{расц}.$$

(П.2.2)

Токоограничивающий эффект двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой характеризуется коэффициентом расщепления

$$k_{расц} = x_{расц} / x_{скв} = x_{расц} / x_{B-H}.$$

(П.2.3)

Если в каталоге приводится только значение  $x_{B-H}$ , то зная  $k_{расц}$  по (П.2.3) определяют  $x_{расц}$ , а по (П.2.1) и (П.2.2) определяют сопротивления схемы замещения. Для однофазных двухобмоточных трансформаторов (и автотрансформаторов) при расщеплении обмотки низкого напряжения на две

цепи (обмотки)  $k_{расц} = 4$ . Для трехфазных двухобмоточных трансформаторов классов напряжений 35, 110 и 220 кВ с расщепленными обмотками низкого напряжения на две цепи можно принять  $k_{расц} = 3,5$ .

### Приложение 3

## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИЛОВЫМ ТРАНСФОРМАТОРАМ

### ДВУХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

№ п.п.	Тип	Мощность, МВА	Напряжение обмотки высокого напряжения, кВ	Напряжение обмотки низкого напряжения, кВ	Напряжение короткого замыкания, $U_{k\%}$
1	ТМН-200/110-73У1	2,5	110	6,6; 11,0	10,5
2	ТДН-10000/110-70У1	10	115	6,6; 11,0	10,5
3	ТРДЦН-63000/110-75У1	63	115	6,3; 10,5	10,5
4	ТРДЦН-125000/110-74У1	125	115	10,5	10,5
5	ТДЦ-200000/110-72У1	200	121	13,8; 15,75; 18	10,5
6	ТДЦ-250000/110-70У1	250	121	15,75	10,5
7	ТДЦ-400000/110-71У1	400	121	20,0	10,5
8	ТРДЦН-160000/110-74У1	160	230	11,0; 38,5	12,0
9	ТДЦ-80000/220-78У1	80	242	10,5; 6,3; 13,8	11,0
10	ТДЦ-125000/220-71У1	125	242	10,5; 13,8	11,0
11	ТДЦ-250000/220-71У1	250	242	13,8; 15,75	11,0
12	ТДЦ-400000/220-73У1	400	242	13,8; 15,75	11,0
13	ТДЦ-630000/220-74У1	630	242	15,75; 20,0	12,5
14	ТРДЦ-63000/330-74У1	63	330	6,3; 10,5	12,0
15	ТДЦ-250000/330-76У1	250	347	13,8; 15,75	11,0
16	ТДЦ-400000/330-78У1	400	347	15,75; 20,0	11,0
17	ТДЦ-630000/330-74У1	630	347	15,75; 20,0	11,0
18	ТДЦ-1000000/330-69У1	1000	347	24,0	11,5
19	ОРЦ-53300/500-74У1	533	$525/\sqrt{3}$	15,75; 18,0; 24,0	13,0

20	ТДЦ-250000/500-74У1	250	525	13,8 – 36,75	13,0
21	ТДЦ-400000/500-79У1	400	525	13,8 – 36,75	12,6
22	ТДЦ-630000/330-78У1	630	525	13,8 – 36,75	14,0

## ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Тип	$S_H$ , МВА	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ	$U_H$ , кВ	$U_{k,BC\%}$	$U_{k,BH\%}$	$U_{k,CH\%}$
ТДТН-6300/110-76у1	6,3	115	38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,0
ТДТН-10000/110-76у1	10	115	38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,0
ТДТН-25000/110-76у1	25	115	38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,0
ТДТН-63000/110-76у1	63	115	11;0 38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,5
ТДТН-80000/110-69у1	80	115	11;0 38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,5
ТДТН-25000/110-76у1	25	230	38,5	6,6; 11,0	12,5	20,0	6,5
ТДТН-40000/110-76у1	40	230	38,5	6,6; 11,0	12,5	22,0	9,5
ТДТН-400000/110-76у1	400	230	38,5	6,6; 11,0	12,5	22,0	9,5

## ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ

Тип	$S_H$ , МВА	$U_B$ , кВ	$U_H$ , кВ	$U_{k\%}$	$k_{расц}$
ТРДН-25000/110-76у1	25	115	6,3-6,3; 10,5-10,5	10,5	3,5
ТРДН-63000/110-76у1	63	115	6,3-6,3; 10,5-10,5	10,5	3,5
ТРДН-125000/110-76у1	125	115	6,3-6,3; 10,5-10,5	10,5	3,5

Обмотки НН имеют мощность, равную 50%

## АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Тип	$S_H$ , МВА	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ	$U_H$ , кВ	$U_{k,BC\%}$	$U_{k,BH\%}$	$U_{k,CH\%}$
АТДЦТН-125000/110	63	115	11;0 38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,5
АТДЦТН-63000/220/110	63	230	121	6,3; 10,5;13,8	11,0	34,0	21,0
АТДЦТН-125000/220/110	125	230	121	6,3; 10,5;13,8	11,0	31,0	19,0
АТДЦТН-200000/220/110	200	230	121	10,5;13,8;38,5	11,0	32,0	20,0
АТДЦТН-250000/220/110	250	230	121	11,0;13,8;15,75;38,5	11,0	32,0	20,0
АТДЦТН-125000/330/110	125	330	115	6,6;11,0;15,75;38,5	10,0	35,0	22,0
АТДЦТН-200000/330/110	200	330	115	6,6	10,0	33,0	22,0

АТДЦТН- 250000/330/150	250	330,347	165	10,5; 38,5	9,5	74,0	60,0
АТДЦТН- 240000/330/150	240	330,347	242	38,5	9,5	74,0	60,0
АТДЦТН- 250000/500/150	250	500	121	11,0;38,5	9,5	74,0	60,0

Приложение 4

**ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОДНОЙ ЦЕПИ ЛЭП И ПРЕДЕЛЬНОЕ  
РАССТОЯНИЕ ПЕРЕДАЧИ**

№ п.п.	$U$ , кВ	$P$ , МВт	длина, км
1	до 1	до 0,1	до 3
2	1-10	1-3	15-3
3	35	5-10	50-60
4	110	25-50	50-150
5	220	100-200	150-250
6	330	300-400	200-300
7	500	700-900	800-1200
8	750	1800-2200	1200-2000

Приложение 5

**ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С АЛЮМИ-  
НИВЫМИ И СТАЛЕАЛЮМИНЕВЫМИ ПРОВОДАМИ**

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 1 м

Марка провода	A-16	A-25	A-35	A-50	A-70	A-95	A-120	A-150	A-185
$x_{y0}$	0,391	0,377	0,366	0,355	0,341	0,332	0,324	0,319	0,313

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 4 м

Марка провода	АС-50	АС-70	АС-95	АС-120	АС-185	АСО-240
$x_{y0}$	0,435	0,425	0,414	0,408	0,394	0,376

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 7 м

Марка провода	АСО-240	АСО-300	АСО-400	АСО-500	АСО-600	АСО-700
$x_{y0}$	0,41	0,405	0,396	0,39	0,384	0,378

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 8 м

Марка провода	АСО-300	АСО-400	АСО-500	АСО-600	АСО-700
$x_{y0}$	0,414	0,405	0,399	0,393	0,385

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 9 м

Марка	АСО-300	АСО-400	АСО-500	АСО-600	АСО-700
-------	---------	---------	---------	---------	---------

провода					
$x_{y0}$	0,422	0,414	0,405	0,4	0,393

## Приложение 6

### ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ

№ п.п.	Марка провода	Активное сопротивление при температуре +20°C, Ом/км	Наружный диаметр провода, мм
1	A-70	0,46	10,7
2	A-95	0,34	12,4
3	A-120	0,27	14,0
4	A-150	0,21	15,8
5	A-185	0,17	17,5
6	AC-70	0,46	11,4
7	AC-95	0,33	13,5
8	AC-120	0,27	15,2
9	AC-150	0,21	17,0
10	AC-185	0,17	19,0
11	ACO-240	0,13	21,6
12	ACO-300	0,108	23,5
13	ACO-400	0,08	27,2
14	ACO-500	0,065	30,2
15	ACO-600	0,055	33,1
16	ACO-700	0,044	37,1

## Приложение 7

### АКТИВНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

№ п.п.	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Активное сопротивление Ом/км		Индуктивное сопротивление Ом/км, при номинальном напряжении		
		Алюминий	Медь	6 кВ	10 кВ	35 кВ
1	70	0,443	0,26	0,08	0,086	0,137
2	95	0,326	0,194	0,078	0,083	0,126
3	120	0,258	0,153	0,076	0,081	0,12
4	150	0,206	0,122	0,074	0,079	0,116
5	185	0,167	0,099	0,073	0,077	0,113
6	240	0,129	0,077	0,071	0,075	-

## Приложение 8

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СДВОЕННЫХ РЕАКТОРАХ

Для ограничения токов КЗ применяются также сдвоенные реакторы (СДР). Условное изображение СДР и его схема замещения приведены на рис. П.8.1. Сдвоенный реактор состоит из двух одинаковых катушек (ветвей) с

индуктивностями  $L_{0,5}$  каждая. Эти катушки магнитно связаны при взаимной индуктивности  $M$ .

Для ограничения токов КЗ применяются также сдвоенные реакторы (СДР). Условное изображение СДР и его схема замещения приведены на рис. П.8.1. Сдвоенный реактор состоит из двух одинаковых катушек (ветвей) с индуктивностями  $L_{0,5}$  каждая. Эти катушки магнитно связаны при взаимной индуктивности  $M$ .

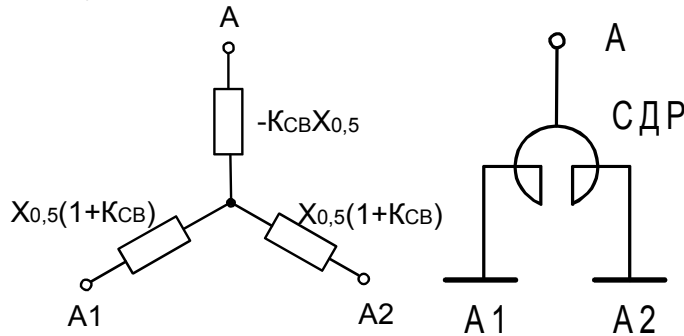


Рис. П.8.1

При протекании тока только по одной ветви (рис. П.8.2,а) сопротивление этой ветви  $x_{0,5} = \omega L_{0,5}$ . В нормальных условиях (рис. П.8.2,б) через обе катушки протекают одинаковые токи в противоположных направлениях, поэтому сопротивление каждой катушки в этих условиях составляет

$$x_{0,5} = \omega (L_{0,5} - M). \quad (\text{П.8.1})$$

Степень индуктивной связи двух катушек характеризуется коэффициентом связи  $k_{св} = M / \sqrt{L_1 L_2}$ , где  $L_1, L_2$  - индуктивности катушек. У сдвоенного реактора  $L_1 = L_2 = L_{0,5}$ , поэтому

$$M = k_{св} L_{0,5}.$$

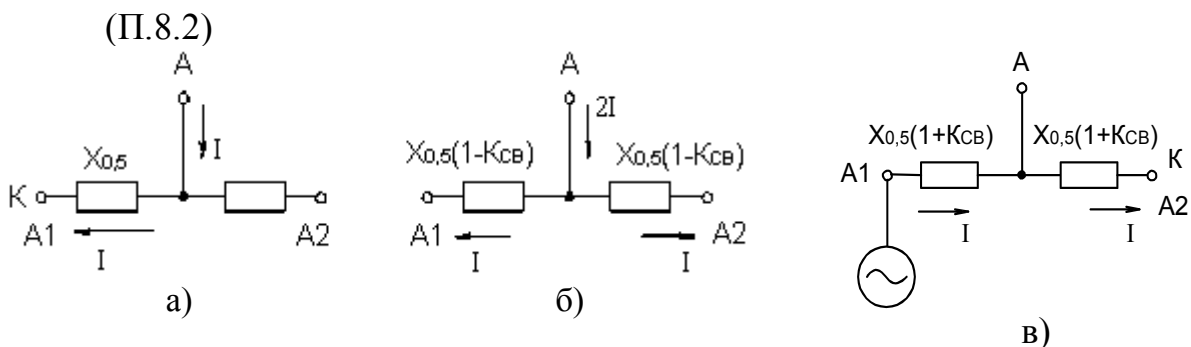


Рис. П.8.2

Подставляя (П.8.2) в (П.8.1) и учитывая, что  $x_{0,5} = \omega L_{0,5}$ , получаем

$$x'_{0,5} = \omega (L_{0,5} - k_{св} L_{0,5}) = x_{0,5} (1 - k_{св}). \quad (\text{П.8.3})$$

Как видно из (П.8.3), сопротивление каждой ветви в нормальном режиме уменьшается, так как,  $k_{св} = 0,4 \div 0,5$ . В этом заключается достоинство сдвоенного реактора. При протекании тока в обеих катушках в одном направлении (рис. П.8.3,в) сопротивление каждой катушки



$$x'_{0,5} = \omega C_{0,5} + M \frac{1}{\tau} = \omega C_{0,5} + k_{cв} L_{0,5} \frac{1}{\tau} = x_{0,5} (1 + k_{cв} \tau)$$

и для всего реактора для этого случая  $x_p = 2x_{0,5}(1 + k_{cв} \tau)$ .

## Приложение 9

## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО РЕАКТОРАМ

ОДИНАРНЫЕ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЕ РЕАКТОРЫ (номинальное напряжение 10 кВ)

№ п.п.	Тип	$I_H$ , кА	$x_{pH}$ , %
1	РБ – 10-400-0,35	0,4	2,5
2	РБУ – 10-630-0,45	0,63	3,0
3	РБГ – 10-1600-0,14	1,6	3,9
4	РБГ – 10-1000-0,14	1,0	4,9
5	РБГ – 10-1600-0,20	1,6	5,5
6	РБГ – 10-1000-0,35	1,0	6,0
7	РБГ – 10-1600-0,25	1,6	7,0
8	РБГ – 10-1000-0,45	1,0	8,0
9	РБГ – 10-1600-0,35	1,6	10,0
10	РБДГ – 10-2500-0,35	2,5	15,0

## СДВОЕННЫЕ РЕАКТОРЫ (номинальное напряжение 10 кВ)

Тип	$I_H$ , кА	Индуктивное сопротивление ветви, %	Индуктивное сопротивление при встречном токе, %	Коэффициент связи
РБСГ 10-2×630-0,25	0,63	2,7	0,135	0,46
РБСГ 10-2×630-0,40	0,63	4,4	0,2	0,5
РБСГ 10-2×2500-0,14	2,5	6,1	0,056	0,6

Последняя цифра в обозначении реактора – сопротивление в Омах

## Приложение 10

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ СЕРИЙ СД И СДН (номинальное напряжение 6 кВ;  $\cos \varphi = 0,9$ ;  $\eta = 99\%$ )

№ п.п.	$P_H$ , МВт	$x_d''$
1	0,4	0,172
2	1,25	0,158
3	6,3	0,144
4	10,0	0,167

## СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИНХРОННЫМ КОМПЕНСАТОРАМ

№ п.п.	Тип	$S_H$ , МВАр	$U_H$ , кВ	$x_d''$
1	КС-5000-6	5	6,3	0,16
2	КС-7500-6	7,5	6,6	0,15
3	КС-10000-6	10	6,6	0,22
4	КС-15000-11	15	11	0,165
5	КС-30000-11	30	10,5	0,21
6	КСВ-50000-11	50	11 (10,5)	0,28
7	КСВ-100000-11	100	11(10,5)	0,2
8	КСВ-160000-15	160	15,75	0,205

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
(с номинальным напряжением 6 кВ)

№ п.п.	Тип	кВт	$\cos \varphi$	$k_{пуск}$
1	A2-560M-8	800	0,85	6,0
2	A2-560S-4	1000	0,9	6,0
3	A2-560M-4	1250	0,905	6,6
4	A4-400XK-4Y3	400	0,87	5,7
5	A4-400X-4Y3	500	0,88	5,7
6	A4-400Y-4Y3	630	0,88	5,7
7	A4-450X-4Y3	800	0,88	5,7
8	A4-450Y-4Y3	1000	0,89	5,7
9	AB-8000/6000	8000	0,91	5,4
10	АДО-1250/600Y3	1250	0,75	6,0
11	АДО-1600/750Y1	1600	0,83	5,5
12	АДО-2500/1000Y1	2500	0,88	5,7
13	АДО-3150/1000Y1	3150	0,89	6,5
14	АН-14-49-6	1000	0,88	6,0
15	АН-14-59-6	1250	0,88	6,0
16	АН-15-41-6	1600	0,88	6,0
17	АН-15-51-6	2000	0,88	6,5
18	АО113-4М	200	0,88	6,6
19	АО114-4М	250	0,88	7,0
20	АО113-6М	160	0,865	7,0
21	АО114-6М	200	0,86	7,3
22	АР-500/6000	500	0,89	6,0
23	АРП-500/6000	630	0,895	6,2
24	АР-630/6000	800	0,905	6,4
25	АРП-1000/6000	1000	0,905	5,7

Приложение 11

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ВЕТВЕЙ

При выполнении преобразований наиболее часто требуется нахождение эквивалентной ЭДС двух параллельно включенных ветвей (рис.П.11.1, а) с различными ЭДС и сопротивлениями (при расчетах токов КЗ значения ЭДС и сопротивлений отличаются незначительно друг от друга). Преобразованная схема приведена на рис. П.11.1, б, при этом

$$E_3 = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2} \text{ и } x_3 = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} + x_3.$$

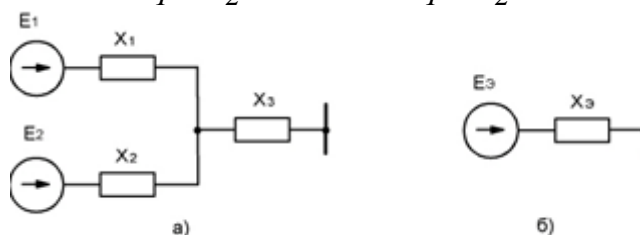


Рис.П.11.1

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 519 с.
2. Ульянов С.А. Сборник задач по переходным электромагнитным процессам. – М.: Энергия, 1968. – 496 с.
3. Дроздов А.Д. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие. – Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1976. – 79 с.
4. Дроздов А.Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты: Учебное пособие. – Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1977. – 75 с.
5. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей: Учебное пособие/ В.М. Блок, Г.К. Обушев, Л.Б. Паперно, С.А. Гусева и др. – М.: Высшая школа, 1981. – 304 с.
6. Гармаш В.А., Подгорный Э.В. Методические указания по курсу Электромагнитные переходные процессы. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2001. – 39 с.
7. Цыгулев Н.И. Токи короткого замыкания в электрических системах: Учебное пособие. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 70 с.

### Учебное издание

Цыгулев Николай Иосифович, Шелест Владимир Александрович,  
Хлебников Владимир Константинович  
Электромагнитные переходные процессы в электрических системах  
Учебное пособие

Компьютерная вёрстка Ликман Л.Г., Тютин Н.М.

Усл. п.л. 6,065. Уч.-изд. л. 6,45. Тираж 250 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

Южно-Российский государственный технический университет  
(Новочеркасский политехнический институт)  
Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ (НПИ)  
Адрес: 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132