



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический  
университет»  
(ФГБОУ ВПО «СамГТУ»)

# Расчет токов трехфазного замыкания в ЭС в именованных единицах

По дисциплине  
**Электромагнитные переходные процессы в  
электрических системах**

Самара-2018

- **Типовые формулы и алгоритм расчета.**
- при расчётах в именованных единицах все сопротивления схемы замещения должны быть выражены в Омах и приведены к одному базисному напряжению (к среднему напряжению одной электрической ступени). Такое приведение необходимо, если между источником и точкой КЗ. имеется одна или несколько ступеней трансформации.
- За базисное напряжение удобно принимать среднее напряжение той ступени, на которой имеется место КЗ. Приведение сопротивления, выраженного в Омах, к выбранному базисному напряжению производят по формуле:
- $X' = (n_1, n_2, n_3 \dots n_k)^2 X$ , где  $n_1, n_2, n_3, n_n$  — коэффициенты трансформации трансформаторов, через которые сопротивление  $x$  связано со ступенью базового напряжения;
- Коэффициенты трансформации определяют в направлении от выбранной базовой ступени к той ступени, на которой включено рассматриваемое сопротивление.

- Так как для каждой электрической ступени принято определенное среднее напряжение, то коэффициенты трансформации, используемые для приведения сопротивлений, представляют собой отношения средних напряжений двух ступеней. В связи с этим промежуточные коэффициенты трансформации сокращаются и пересчет сопротивлений можно вести по следующей формуле:
- $X' = U_{\text{б}}^2 / U_{\text{ср}}^2 X$ , где  $X$  – индуктивное сопротивление данного элемента, Ом, заданное при  $U_{\text{ср}}$  ступени, на которой включен данный элемент;
- $X'$  – индуктивное сопротивление данного элемента, Ом, приведённое к принятому базисному напряжению  $U_{\text{б}}$

- сопротивления элементов сети с учётом приведения рассчитывают по формулам:
- 1) Для системы:  $X_c = X_c(U_b/U_{cp})^2$  если известна
- Ск.з.:  $X_c = U^2_b / S_{к.з.}$
- 2) Для ЛЭП:  $X_l = x_0 \cdot l \cdot (U_b/U_{cp})^2$ ;  $R_l = r_0 \cdot l \cdot (U_b/U_{cp})^2$
- 3) Для трансформатора:  $U_r = U_{k\%} / 100\%$ ;  $U_b^2 / S_{ном}$
- Где  $U_{k\%}$  - напряжение К.З. трансформатора, % по справочным данным
- $S_{ном}$  - Номинальная мощность трансформатора, МВ\*А.
- После расчёта всех сопротивлений определяют одно эквивалентное сопротивление до точки КЗ

- $Z_e = \sqrt{X_e^2 + R_e^2}$ , Ом Где  $X_e$  и  $R_e$  - суммарные индуктивное и активное сопротивление сети до места КЗ.
- Целесообразно учитывать активное сопротивление, если  $R_e \geq X_e / 3$ . Для генераторов, трансформаторов, воздушных линий и коротких участков распределительной сети обычно учитывают только индуктивные сопротивления.

В пример возьмем расчет токов к.з. в сетях до 1 кВ.

В электрических сетях до 1 кВ составление схемы замещения и определение начального значения тока КЗ имеют некоторые особенности. В этих сетях, прежде всего, надо учитывать индуктивное и активное сопротивление элементов цепей, т.к. они соизмеримы.

В установках до 1 кВ на ток КЗ существенное влияние оказывают сопротивления таких элементов, как короткие проводники небольшого сечения, трансформаторы тока, токовые катушки автоматов, сопротивления контактных соединений, которые в установках высокого напряжения не учитываются.

- В тоже время без значительного загробления расчётов можно пренебречь сопротивлением внешних связей и считать, что шины высшего напряжения трансформатора, питающего сеть низшего напряжения, являются шинами неизменного напряжения.
- Параметры схем замещения для установок ниже 1 кВ удобно представлять в именованных единицах. За среднее напряжение принимают значения из следующего ряда: 690, 525, 400, 230, 127 В.
- Величины  $x_i$  и  $r_i$  для  $i$ -го элемента сети определяют с использованием соответствующих справочных данных.

- Для силового трансформатора:
- $N_r = (\Delta P_k \cdot U_{ном}^2 / S_{ном}^2) \cdot 10^6 (\text{мОм})$
- $X_r = (\sqrt{U_k^2 - (100 \cdot \Delta P_k / S_{ном})} - U_{ном}^2 / S_{ном}) \cdot 10^4$
- где  $S_{ном}$  - номинальная мощность трансформатора, кВА;
- $U_{ном}$  – номинальное линейное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;
- $P_k$  – потери КЗ в трансформаторе, кВт;
- $U_k$  – напряжение КЗ трансформатора, %.



- Под начальным сверхпереходным током понимают действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент КЗ при . В расчётах применяют укрупнённые именованные величины: кВ, кА, МВА и т.п.
- Расчёт ТКЗ начинается с составления схемы замещения, используя схемы замещения отдельных элементов, приведенные в п.1.2. Схему замещения изображают однолинейной (для одной из фаз), используя симметрию схемы; обратный путь тока в схемах не показывают. Расчётная схема замещения соответствует аварийному режиму энергосистемы и на ней изображаются только те элементы, по которым протекает ток КЗ. Ток КЗ протекает от источников к месту повреждения. Элементы схемы замещения обозначают в виде обыкновенной дроби, в числителе которой находится порядковый номер, а в знаменателе – величина сопротивления.

- Затем выбирается основная ступень напряжения, к которой 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 он равен отношению: напряжения обмотки, обращённой к основной ступени к напряжению обмотки, обращённой к приводимому элементу.

- При наличии между основной ступенью и приводимым элементом нескольких трансформаторов (или автотрансформаторов) результирующий (эквивалентный) коэффициент трансформации равен произведению всех коэффициентов трансформации трансформаторов, расположенных между приводимым элементом и основной ступенью:  $k_{\Sigma} = k_1 k_2 \dots k_n = \prod k_i$
- Приведенные параметры обозначают, например, . Для приведения используют следующие формулы:
- $E = E^* k_{\Sigma}$  ;  $U = U^* k$  ;  $I = I / k_{\Sigma}$  ;  $z = z^* k_{\Sigma}$

- После вычисления всех ЭДС и сопротивлений и приведения к основной ступени исходная схема замещения сворачивается - преобразуется к простейшему виду – эквивалентная ЭДС и эквивалентное сопротивление. При этом используются правила преобразования электрических схем, основными из которых являются: сложение последовательно соединённых сопротивлений, замена параллельно соединённых сопротивлений одним эквивалентным, преобразование «звезды» в «треугольник» и обратное преобразование, преобразование «звезды» с произвольным числом лучей в многоугольник.
- При выполнении преобразований часто требуется нахождение эквивалентной ЭДС двух параллельно включённых ветвей с различными ЭДС и сопротивлениями (при расчётах токов КЗ значения ЭДС отличаются незначительно друг от друга). при этом :
- $E_{\text{э}} = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{X_1 + X_2}$  и  $X_{\text{э}} = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} + X_3$ ....

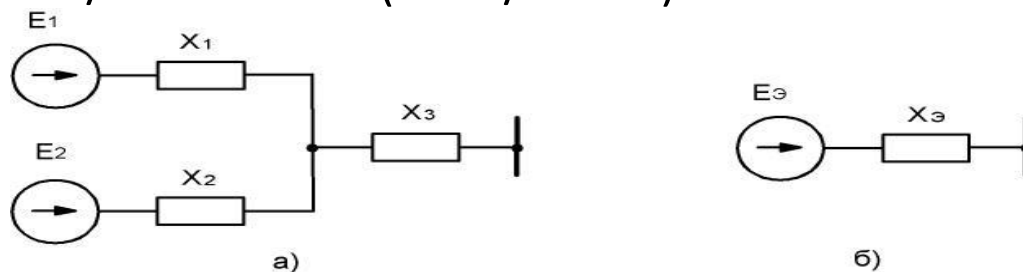


Рис. 1.9

- **Преобразование схемы с двумя параллельными элементами**
- Найденные из преобразованной схемы эквивалентные ЭДС и сопротивление, используются для вычисления тока КЗ. Учитывая, что ЭДС линейная (междуфазная), а ток КЗ определяется фазный, то сверхпереходный ток КЗ вычисляется по формуле
- $I_k = E / \sqrt{3} \cdot X_\Sigma$

- Расчёт ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформации. Сопротивления всех элементов схемы выражаются в именованных единицах с использованием выражений (1.7, 1.9). Сопротивления генератора, трансформатора, линии реактора определяются с помощью

$$X_G = X_d \frac{U_H^2}{S_H} = X_d \frac{\cos \phi \cdot U_H^2}{P_H},$$

$$X_T = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H},$$

$$X_l = X_0 l,$$

$$X_p = X_{p^*H} \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H},$$

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 кВ, то на 10%, если кВ – на 5 %. Напряжение 220 кВ является граничным,

Un, кВ	6	10	35	110	220	330	500
Уповыш тр-ра, кВ	6,6	11	38,5	121	242	347	525

- Расчёт ТКЗ с приближённым приведением коэффициентов трансформации. На практике часто используется приближённое приведение коэффициентов трансформации, при этом упрощаются расчёты токов КЗ. Для каждой ступени принимают, что все номинальные напряжения обмоток трансформаторов и генераторов одинаковы и равны среднему номинальному напряжению трансформатора или расчётному напряжению. В соответствии с "Правилами устройства электротехнических установок" (ПУЭ) среднее номинальное значения напряжения принимается выше стандартных номинальных напряжений соответствующего класса: если В, то на 5%, если кВ – на 2,5 %.



- Шкала номинальных напряжений:

Un, кВ	6	10	35	110	220	330	500
Уср.н., кВ	6,3	10,5	37	115	230	340	515

Средние номинальные напряжения генераторов и непосредственно присоединённых к ним трансформаторов (блоков) равны номинальным: 6,3; 10,5; 13,8; 18; 20; 24 кВ.

- В приближённом приведении нескольких последовательно соединённых 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 расчёта применимы все формулы, приведенные в п.1.3.1. Погрешность расчёта токов КЗ при приближённом приведении по сравнению с точным приведением не превышает 10-15%.



# Выбор электрооборудования и проводников по условиям сохранения электродинамической стойкости после воздействия КЗ

- **Электродинамическое действие токов КЗ.** При коротких замыканиях в результате возникновения ударных токов КЗ в шинах и других конструкциях распределительных устройств возникают электродинамические усилия, создающие изгибающие моменты, которые приводят к механическим напряжениям в металле проводников. Механические напряжения в проводниках не должны превышать максимально допустимые, определяемые по справочнику для конкретного металла.
- Электродинамическое действие ударного тока ( ) определяется силой взаимодействия между проводниками при протекании по ним ударного тока.

- **Термическое действие токов КЗ.** Токоведущие части при КЗ могут нагреваться до критической температуры. Проводники термически устойчивы, если расчётная температура () не превышает для используемого материала (например, для медных шин, а алюминиевых).
- Время протекания тока КЗ определяется как сумма времени действия защиты и времени выключающей аппаратуры:
- (8.3)
- При проверке токоведущих частей на термическую устойчивость используют приведённое время, в течение которого установившейся ток КЗ выделяет тоже количество теплоты, что и изменяющийся во времени ток КЗ за действительное время  $t$ .
-

- Общие положения по выбору электрических аппаратов и параметров токоведущих устройств
- Электрические аппараты, изоляторы и токоведущие устройства работают в условиях эксплуатации в трех основных режимах: длительном, перегрузки (с повышенной нагрузкой, которая для некоторых аппаратов достигает значения до 1,4номинальной) и короткого замыкания.
- Выбор электрических устройств по длительному режиму работы
- **Выбор по номинальному напряжению.** Электрические аппараты изначально имеют запас электрической прочности, что позволяет им работать при напряжении на 10-15%выше номинального. Поэтому в условиях эксплуатации при выборе аппаратов по напряжению используют следующие условие:
- Где  $U_{ном}$  - номинальные напряжения установки и аппарата.

- Выбор электрических устройств по току КЗ
- Выбранные по номинальным условиям электрические аппараты, изоляторы и токоведущие устройства проверяют на электродинамическую и термическую стойкость при КЗ. Отключающие аппараты, кроме того, должны быть проверены и по отключающей способности относительно токов КЗ.
- **Проверка на электродинамическую стойкость.** Расчётным видом КЗ для проверки аппаратов на электродинамическую стойкость может быть трехфазное или однофазное короткое замыкание.

- **Проверка на термическую стойкость.** Для электрических аппаратов должно выполняться одно из условий:
- где - номинальный ток термической стойкости, который аппарат может выдержать в течение времени (определяется по справочным данным);- тепловой импульс, т.е. количество тепла выделенного в аппарате во время протекания тока КЗ;- установившейся ток КЗ;- приведённое время действия тока КЗ.
- Выбор и проверка элементов системы электроснабжения выше 1кВ
- Предохранители выбирают по номинальному току, номинальному напряжению и отключающей способности. При выборе по номинальному напряжению учитывают возможность превышения рабочего напряжения установки над номинальным напряжением на 10%.

## Использование ПЭВМ для расчетов режимов симметричных замыканий в ЭС

- **Расчет коротких замыканий** вручную требуют значительных трудозатрат. По этим причинам после появления **ЭВМ**, а далее **ПВМ** начались попытки применить их для расчета уставок релейной защиты. Эти программы для распредсетей были относительно простыми и разрабатывались непосредственно теми, кто занимался расчетами на любительском уровне. Для раз-работки программ использовались алгоритмические языки программирования: Бейсик, Фортран, Паскаль, Дельфи и т.д.



- Для выполнения даже сложных профессиональных программ можно использовать любые имеющиеся ПВМ, начиная с I-386 серии. В дальнейшем к разработке программ подключились профессионалы, и простые программы превратились в сложные комплексы программ, позволяющие автоматизировать выполнение всех этапов расчета: подготовку данных, расчет параметров, составление схемы замещения, расчет аварийных величин, выбор уставок защиты и сохранение результатов.

- Институтом Электродинамики Украины разработан **«Комплекс программ расчета аварийных режимов в сложной электрической сети объемом до 3000 узлов»**. В настоящее время эксплуатируется программный комплекс V-VI-50, позволяющий выполнить самые сложные расчеты в сетях любой сложности с учетом токов нагрузки, емкостных токов в сети, сложных несимметричных режимов.

- Этими программами оснащены все энергетические системы Украины. Этот комплекс можно применить и для расчета в распредсетях, однако для этого он слишком сложен.
- Аналогичные программы разработаны и внедрены Новосибирским политехническим институтом (Техническим университетом), Московским институтом «Энергосетьпроект».

- Кроме того, множеством других организаций – проектных и электросетевых – разработаны и эксплуатируются собственные программы, приспособленные к их нуждам. У авторов в настоящее время отсутствуют сводные данные по возможности приобретения программ расчета ТКЗ, а также по их особенностям.

- Ряд этих организаций предлагает указанные программы на продажу. У авторов в настоящее время отсутствуют сводные данные по возможности приобретения программ расчета ТКЗ, а также по их особенностям.

- . Поэтому мы рекомендуем обратиться к информации в сети «Интернет» или в ближайшей службе РЗА. При выборе необходимой программы следует четко представлять задачи, которые должна выполнять программа, и выяснить, насколько соответствует данная программа этим задачам.
-

# Список использованных источников:

- 1) Ульянов С.А., Электромагнитные переходные процессы в электрических системах, изд-во «Энергия», 1970
- 2) Крючков И.П., Переходные процессы в электрических системах, МЭИ, 2008