**Практическая работа № 10**

**Расчёт токов короткого замыкания в сети выше 1000 В**

**Цель работы:** овладение методикой расчета токов КЗ в сетях выше 1000 В.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При расчете токов КЗ в сетях выше 1000 В обязателен учет индуктивных сопротивлений элементов сети: электродвигателей, трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий, токопроводов. Активное сопротивление учитывается для воздушных ЛЭП с малым сечением проводов и со стальными проводами, а также для кабельных линий большой протяженности с малым сечением жил. Целесообразно учитывать активное сопротивление, если *r*  *х* / 3, где *r*, *х* – суммарные активное и реактивное сопротивления сети от источника питания до места КЗ.

Активное сопротивление трансформаторов также необходимо учитывать в расчетах токов КЗ, если *r*тр  0,3*х*тр. Кроме этого, на сопротивление влияет изменение числа витков обмоток устройствами регулирования напряжения. Учесть действительное положение ответвлений каждого трансформатора в распределительных сетях практически невозможно, поскольку их положение изменяется в зависимости от значения нагрузки, схемы и режима работы сети. Поэтому при расчетах принимается, что все трансформаторы включены на основное ответвление, соответствующее их номинальному напряжению.

Все сопротивления схемы замещения подсчитывают в именованных (Ом) или в относительных единицах. При расчете в относительных единицах задаются базовыми величинами: напряжением *U*б и мощностью *S*б.

**Пример расчета**

Для схемы электроснабжения цеховой подстанции (рис. 1) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

К1 К2 К3 К4 ГПП ТП

ВГБЭ-35-630-41,5

**~**

*U*ном=35 кВ

ВЛ АС-120

*l* = 1,5 км

ТДНС-16000/35

КЛ ААШв-3х95

*l* = 0,42 км

*U*ном=6 кВ

Рисунок 1 – Расчетная схема распределительной сети

Определение сопротивлений.

На подстанции энергосистемы установлен выключатель высокого напряжения ВГБЭ-35-630-41,5 с номинальным током отключения КЗ *I*откл.ном = 41,5 кА.

Принимаем *U*б = 37 кВ.

Определяем мощность КЗ системы:

Расчет ведем в относительных единицах. Производим расчёт сопротивлений сети, принимая базисную мощность *S*б = 100 МВА.

1. Сопротивление энергосистемы:
2. Сопротивление воздушной линии 35 кВ:

где *l* = 1,5– длина воздушной линии, км;

*U*б – базисное напряжение данной ступени трансформации, кВ;

*r*о= 0,27 – активное сопротивление провода АС-120, Ом/км (табл.7);

*x*о= 0,309 Ом/км – индуктивное сопротивление провода АС-120, Ом/км (табл.7).

1. Сопротивление трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

где *S*ном.тр = 16 МВА – номинальная мощность трансформатора;

*u*кз= 10,5% – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Активным сопротивлением пренебрегаем, так как трансформатор большой мощности.

1. Сопротивление кабельной линии:

где *l* = 0,42 км – длина кабельной линии;

*U*б = 6,3 кВ – базисное напряжение данной ступени трансформации;

*r*о = 0,329 Ом/км – активное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (табл.7);

*х*о= 0,0602 Ом/км – индуктивное сопротивление кабеля ААШв–(3х95) (табл.6).

Составляем схему замещения – рис. 2.

К1 К2 К3 К4



**~**

*х*сист

*х*вл

*r*вл

*х*тр

*х*кл

*r*кл

Рисунок 2 – Схема замещения участка распределительной сети

Расчет токов КЗ

В сетях среднего напряжения (6-35 кВ) применяют изолированную нейтраль. Ток однофазного замыкания на землю в таких сетях невелик, его величина определяется емкостью линии (зависит от напряжения, длины и типа линии), и этот режим не является аварийным. Соответственно, рассчитывать токи однофазного КЗ в сетях среднего напряжения нет необходимости.

Ток двухфазного КЗ легко определяется по рассчитанному току трехфазного:

Ток трехфазного КЗ определяется по формуле:

где *Z*рез – полное сопротивление до точки КЗ, Ом.

При расчете в системе относительных единиц сначала находят базисный ток КЗ на рассматриваемой ступени трансформации:

а затем определяют реальное значение периодической составляющей тока КЗ:

Будем определять токи трехфазного КЗ по намеченным точкам.

Точка К1:

Zрез  *x*сист  0*,*038.

Ударный ток КЗ:

*k* уд  1*.*8 по таблице 13.

Точка К2:

Ударный ток КЗ:

Точка К3:

Ударный ток КЗ:

Точка К4:

Ударный ток КЗ:

Сводная ведомость токов КЗ

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Расчетные точки | | К1 | К2 | К3 | К4 |
| Токи КЗ, кА |  | 41,05 | 20,0 | 12,57 | 10,46 |
| *i*уд | 104,5 | 50,91 | 31,99 | 26,83 |

# ЗАДАНИЕ

Для схемы электрической сети выше 1000 В (рис. 3) требуется составить схему замещения для расчета токов КЗ; определить сопротивления элементов схемы электроснабжения; наметить и обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ; определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ». Кабельные линии к цеховой ТП и высоковольтному синхронному двигателю (СД) выполнены кабелями с бумажной поясной изоляцией. Среднее геометрическое расстояние между проводами воздушной линии электропередачи (ВЛ) принимаются любым, в соответствии с табл.1.11.

РП 10 кВ

ТП

КЛ1

ГПП

СД

**~**

ВЛ

КЛ2

*U*ном=35кВ Трансформатор ГПП *U*ном= 10 кВ

Рисунок 3 – Расчетная схема распределительной сети

Варианты заданий приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Варианты заданий

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар | Система | ВЛ | | Трансформатор  ГПП | | КЛ1 | | КЛ2 | |
| *S*кз,  МВА | S, мм2 | *l*.  км | S,  МВА | *u*кз, % | S, мм2 | *l*.  км | S, мм2 | *l*.  км |
| 1 | 5000 | АС-240 | 5,6 | 40 | 11 | 150 | 1,2 | 95 | 0,5 |
| 2 | 4000 | АС-185 | 10,2 | 32 | 10,5 | 120 | 0,6 | 70 | 1,2 |
| 3 | 3000 | АС-150 | 5,4 | 25 | 10,5 | 120 | 0,8 | 95 | 0,6 |
| 4 | 2000 | АС-120 | 6,8 | 16 | 10,5 | 95 | 1,2 | 50 | 0,8 |
| 5 | 2000 | АС-150 | 10,5 | 25 | 11 | 95 | 1,2 | 120 | 0,3 |
| 6 | 3000 | АС-120 | 4,1 | 32 | 11 | 70 | 0,4 | 70 | 0,2 |
| 7 | 1000 | АС-95 | 2,2 | 16 | 10,5 | 50 | 0,2 | 70 | 0,5 |
| 8 | 1000 | АС-70 | 3,4 | 10 | 10,5 | 35 | 0,4 | 50 | 0,2 |
| 9 | 2000 | АС-240 | 12,5 | 32 | 11 | 120 | 2,2 | 95 | 1,1 |
| 10 | 3000 | АС-185 | 5 | 25 | 10,5 | 70 | 3,5 | 50 | 0,4 |

# КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы цели расчета КЗ ?
2. Какие условия и основные допущения принимаются при расчете токов КЗ в системах электроснабжения и почему ?
3. Назовите отличия принципиальной схемы, расчетной схемы и схемы замещения.
4. Почему при моделировании элементов схемы электроснабжения для расчета токов КЗ не учитываются их поперечные составляющие?
5. В каких случаях допускается не учитывать активные сопротивления элементов схемы электроснабжения?
6. Объясните понятие ударного тока КЗ, периодической и апериодической составляющих
7. На каких участках электрической сети необходимо определять токи КЗ?
8. Что понимается под термином «относительные единицы»?
9. Как выбираются и пересчитываются базисные условия для различных ступеней напряжения электроэнергетической системы?
10. Зависит ли результат расчета тока КЗ от выбора базисных условий?

Таблица 2

Ударные коэффициенты в зависимости от места короткого замыкания

|  |  |
| --- | --- |
| Место короткого замыкания | куд |
| Выводы явнополюсного генератора с успокоительной обмоткой | 1,93 |
| Выводы турбогенератора | 1,91 |
| В цепи без учета активного сопротивления | 1,8 |
| На стороне до 1000 В трансформаторов мощностью: 1600, 2500 кВ∙А  630, 1000 кВ∙А  100, 250, 400 кВ∙А | 1,4  1,3  1,2 |
| Удаленные точки КЗ с учетом активного сопротивления | по рис.1 |

Таблица 3

Сопротивления понижающих трансформаторов мощностью

до 1600 кВ∙А, приведенные к вторичному напряжению 0,4/0,23 кВ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мощность, кВА | Верхний предел первичного напряжения, кВ | Схема соединений обмоток | Δ*P*кз, кВт | *u*кз,  % | *R*тр, мОм | *Х*тр, мОм | *Z*тр, мОм | *Z* (1) ,  тр  мОм |
| 63 | 10 | Y/YH | 1,28 | 4,5 | 52 | 102 | 114 | 1237 |
| 100 | 10 | Y/YH | 1,97 | 4,5 | 31,5 | 64,7 | 72 | 779 |
| 160 | 10 | Y/YH | 2,65 | 4,5 | 16,6 | 41,7 | 45 | 487 |
| 250 | 10 | Y/YH | 3,7 | 4,5 | 9,4 | 27,2 | 28,7 | 312 |
| 400 | 10 | Y/YH | 5,5 | 4,5 | 5,5 | 17,1 | 18 | 195 |
| 630 | 10 | Y/YH | 7,6 | 5,5 | 3,1 | 13,6 | 14 | 129 |
| 1000 | 10 | Y/YH | 12,2 | 5,5 | 2 | 8,5 | 8,8 | 81 |
| 1600 | 10 | Y/YH | 18 | 5,5 | 1 | 5,4 | 5,4 | 54 |

Таблица 4

Удельные сопротивления комплектных шинопроводов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Тип комплектного шинопровода | | | | | | |
| ШМА | | | | ШРА | | |
| *I*ном, А | 1250 | 1600 | 2500 | 3200 | 250 | 400 | 630 |
| *r*0, мОм/м | 0,034 | 0,030 | 0,017 | 0,015 | 0,21 | 0,15 | 0,10 |
| *х*0, мОм/м | 0,016 | 0,014 | 0,008 | 0,007 | 0,21 | 0,17 | 0,13 |
| *r*0(ф-0), мОм/м | 0,068 | 0,060 | 0,034 | 0,030 | 0,42 | 0,30 | 0,20 |
| *х*0(ф-0), мОм/м | 0,053 | 0,060 | 0,075 | 0,044 | 0,42 | 0,24 | 0,26 |
| *z*0(ф-0), мОм/м | 0,086 | 0,087 | 0,082 | 0,053 | 0,59 | 0,38 | 0,33 |

Таблица 5

Переходные сопротивления на ступенях распределения

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ступень | Место | *R*ступ., мОм | Дополнительные сведения |
| 1 | Распределительные устройства  подстанции | 15 | Используются при отсутствии достоверных данных о контактах и их переходных сопротивлениях в сетях, питающихся от цеховых трансформаторов мощностью до 2500 кВА включительно |
| 2 | Первичные распределительные  цеховые пункты | 20 |
| 3 | Вторичные распределительные  цеховые пункты | 25 |
| 4 | Аппаратура управления электроприемников,  получающих питания от вторичных РП | 30 |

Таблица 6

Активное и индуктивное сопротивления проводов и кабелей с алюминиевыми и медными жилами

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Сечение, мм2 | Сопротивление, мОм/м | | | | | |
| активное | | индуктивное | | | |
| алюминий | медь | провода открыто проложен- ные | кабель с бумажной поясной изоляцией | провода в трубах, кабель с любой изоляцией (кроме бумажной) | воздушная линия до 1000 В |
| 2,5 | 12,5 | 7,4 | 0,358 | 0,104 | 0,116 | — |
| 4,0 | 7,81 | 4,63 | 0,343 | 0,095 | 0,107 | — |
| 6,0 | 5,21 | 3,09 | 0,330 | 0,09 | 0,1 | — |
| 10 | 3,12 | 1,84 | 0,307 | 0,073 | 0,099 | — |
| 16 | 1,95 | 1,16 | 0,293 | 0,0675 | 0,095 | 0,354 |
| 25 | 1,25 | 0,74 | 0,278 | 0,0662 | 0,091 | 0,339 |
| 35 | 0,894 | 0,53 | 0,268 | 0,0637 | 0,088 | 0,330 |
| 50 | 0,625 | 0,37 | 0,256 | 0,0625 | 0,085 | 0,317 |
| 70 | 0,447 | 0,265 | 0,245 | 0,0612 | 0,082 | 0,307 |
| 95 | 0,329 | 0,195 | 0,236 | 0,0602 | 0,081 | 0,297 |
| 120 | 0,261 | 0,154 | 0,229 | 0,0602 | 0,080 | 0,293 |
| 150 | 0,208 | 0,124 | 0,21 | 0,0596 | 0,079 | — |
| 185 | 0,169 | 0,1 | 0,21 | 0,0596 | 0,078 | — |
| 240 | 0,130 | 0,077 | 0,20 | 0,0587 | 0,077 | — |

Таблица 7 Активное сопротивление 1 км кабельных и воздушных линий, Ом/км

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Площадь  сечения, мм2 | Жила трехжильного кабеля | | Фаза, выполненная проводом марки | | | |
| алюминиевая | медная | А | АС и АСО | АСУ | М |
| 1 | — | 18,5 | — | — | — | — |
| 1,5 | — | 12,5 | — | — | — | — |
| 2,5 | 12,5 | 7,4 | — | — | — | — |
| 4 | 7,81 | 4,63 | — | — | — | — |
| 6 | 5,21 | 3,09 | — | — | — | 3,06 |
| 10 | 3,12 | 1,84 | — | — | — | 1,84 |
| 16 | 1,95 | 1,16 | 1,98 | 2,06 | — | 1,2 |
| 25 | 1,25 | 0,74 | 1,28 | 1,31 | — | 0,74 |
| 35 | 0,894 | 0,53 | 0,92 | 0,85 | — | 0,54 |
| 50 | 0,625 | 0,37 | 0,64 | 0,65 | — | 0,39 |
| 70 | 0,447 | 0,265 | 0,46 | 0,46 | — | 0,28 |
| 95 | 0,329 | 0,195 | 0,34 | 0,37 | — | 0,2 |
| 120 | 0,261 | 0,154 | 0,27 | 0,27 | 0,28 | 0,158 |
| 150 | 0,208 | 0,124 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,128 |
| 185 | 0,169 | 0,1 | 0,185 | 0,17 | 0,17 | 0,103 |
| 240 | 0,13 | 0,077 | — | 0,132 | 0,131 | 0,078 |
| 300 | — | — | — | 0,107 | 0,106 | — |
| 400 | — | — | — | 0,08 | 0,079 | — |

Таблица 8

Среднее значения погонных реактивных сопротивлений линий сети

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристика линий | *х*0, мОм/м |
| Кабельные линии напряжением: до 1000 В  6–10 кВ | 0,06  0,08 |
| Изолированные провода внутренней проводки | 0,11 |
| Шинопроводы | 0,15 |
| Воздушные линии напряжением: до 1000 В  6–10 кВ  35–220 кВ  500 кВ (с тремя проводами в фазе) | 0,31  0,38  0,40  0,29 |

Таблица 9 Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Кабель | | Комплектный шинопровод | |
| *S*, мм2 | *R*к, мОм | *I*ном, А | *R*к, мОм |
| 16 | 0,085 | *Распределительный* | |
| 25 | 0,064 | 250 | 0,009 |
| 35 | 0,056 | 400 | 0,006 |
| 50 | 0,043 | 630 | 0,0037 |
| 70 | 0,029 | *Магистральный* | |
| 95 | 0,027 | 1600 | 0,0034 |
| 120 | 0,024 | 2500 | 0,0024 |
| 185 | 0,021 | 3200 | 0,0012 |
| 240 | 0,012 | 4000 | 0,0011 |

Таблица 10

Средние значения сопротивлений первичных обмоток трансформаторов тока

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Коэффициент трансформации | Сопротивления, мОм, трансформаторов тока класса точности | | | |
| 1 | | 3 | |
| *Х*т.т | *R*т.т | *Х*т.т | *R*т.т |
| 20/5 | 67 | 42 | 17 | 19 |
| 30/5 | 30 | 20 | 8 | 8,2 |
| 40/5 | 17 | 11 | 4,2 | 4,8 |
| 50/5 | 11 | 7 | 2,8 | 3 |
| 75/5 | 4,8 | 3 | 1,2 | 1,3 |
| 100/5 | 1,7 | 2,7 | 0,7 | 0,75 |
| 150/5 | 1,2 | 0,75 | 0,3 | 0,33 |
| 200/5 | 0,67 | 0,42 | 0,17 | 0,19 |
| 300/5 | 0,3 | 0,2 | 0,08 | 0,09 |
| 400/5 | 0,17 | 0,11 | 0,04 | 0,05 |
| 600/5 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |

Таблица 11

Средние значения сопротивлений отключающих аппаратов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номинальный ток, А | Сопротивления расцепителей автоматических выключателей  при 65С, мОм | | Переходные сопротивления контактов, *R*к, мОм | | |
| *R*а | *Х*а | автоматических  выключателей | рубильников | разъединителей |
| 50 | 5,50 | 4,50 | 1,3 | — | — |
| 70 | 2,40 | 2,00 | 1,00 | — | — |
| 100 | 1,30 | 1,20 | 0,75 | 0,50 | — |
| 150 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,45 | — |
| 200 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,40 | — |
| 400 | 0,15 | 0,17 | 0,40 | 0,20 | 0,20 |
| 600 | 0,12 | 0,13 | 0,25 | 0,15 | 0,15 |
| 1000 | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,08 | 0,08 |
| 1600 | 0,08 | 0,08 | 0,10 | — | 0,06 |
| 2000 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | — | 0,03 |
| 2500 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | — | 0,03 |
| 3000 | 0,05 | 0,07 | 0,06 | — | 0,02 |
| 4000 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | — | — |

Таблица 12

Реактивное сопротивление неизолированных алюминиевых и сталеалюминиевых проводов, Ом/км

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка | При среднем геометрическом расстоянии между проводами, мм | | | | | | | | | |
| 800 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 |
| А-35 | 0,352 | 0,366 | 0,391 | 0,410 | — | — | — | — | — | — |
| А-50 | 0,341 | 0,355 | 0,380 | 0,398 | 0,413 | 0,423 | 0,433 | 0,442 | — | — |
| А-70 | 0,331 | 0,345 | 0,370 | 0,388 | 0,402 | 0,413 | 0,423 | 0,431 | — | — |
| А-95 | 0,319 | 0,333 | 0,358 | 0,377 | 0,393 | 0,402 | 0,413 | 0,421 | — | — |
| А-120 | 0,313 | 0,327 | 0,352 | 0,371 | 0,385 | 0,396 | 0,405 | 0,414 | — | — |
| А-150 | 0,305 | 0,315 | 0,344 | 0,363 | 0,376 | 0,388 | 0,398 | 0,406 | 0,416 | 0,422 |
| А-185 | 0,298 | 0,311 | 0,339 | 0,355 | 0,370 | 0,382 | 0,391 | 0,399 | 0,409 | 0,416 |
| А-240 | — | 0,304 | 0,329 | 0,347 | 0,361 | 0,372 | 0,382 | 0,391 | 0,401 | 0,406 |
| А-300 | — | 0,297 | 0,322 | 0,340 | 0,354 | 0,366 | 0,376 | 0,381 | 0,394 | 0,401 |
| А-400 | — | 0,289 | 0,315 | 0,331 | 0,344 | 0,356 | 0,366 | 0,374 | 0,386 | 0,391 |
| А-500 | — | 0,281 | 0,305 | 0,324 | 0,337 | 0,348 | 0,389 | 0,366 | 0,377 | 0,383 |
| А-600 | — | 0,275 | 0,300 | 0,318 | 0,330 | 0,343 | 0,353 | 0,361 | 0,370 | 0,377 |
| АС-16 | 0,374 | 0,389 | 0,411 | 0,430 | 0,442 | — | — | — | — | — |
| АС-25 | 0,362 | 0,376 | 0,398 | 0,407 | 0,417 | 0,431 | — | — | — | — |
| АС-35 | 0,346 | 0,362 | 0,385 | 0,403 | 0,412 | 0,429 | 0,438 | 0,446 | — | — |
| АС-50 | 0,338 | 0,353 | 0,374 | 0,392 | 0,406 | 0,418 | 0,427 | 0,435 | — | — |
| АС-70 | 0,327 | 0,341 | 0,364 | 0,382 | 0,396 | 0,408 | 0,417 | 0,425 | 0,433 | 0,440 |
| АС-95 | 0,317 | 0,331 | 0,353 | 0,371 | 0,385 | 0,397 | 0,406 | 0,414 | 0,422 | 0,429 |
| АС-120 | 0,309 | 0,323 | 0,347 | 0,365 | 0,379 | 0,391 | 0,400 | 0,408 | 0,416 | 0,423 |
| АС-150 | — | — | — | 0,358 | 0,372 | 0,384 | 0,398 | 0,401 | 0,409 | 0,416 |
| АС-185 | — | — | — | — | 0,365 | 0,377 | 0,386 | 0,394 | 0,402 | 0,409 |
| АС-240 | — | — | — | — | — | 0,369 | 0,378 | 0,386 | 0,394 | 0,401 |
| АС-300 | — | — | — | — | — | 0,358 | 0,368 | 0,379 | 0,385 | 0,395 |

Таблица 13

Ударные коэффициенты в зависимости от места короткого замыкания

|  |  |
| --- | --- |
| Место короткого замыкания | Kуд |
| Выводы явнополюсного генератора с успокоительной обмоткой | 1,93 |
| Выводы турбогенератора | 1,91 |
| В цепи без учета активного сопротивления | 1,8 |
| На стороне до 1000 В трансформаторов мощностью: 1600, 2500 кВ∙А  630, 1000 кВ∙А  100, 250, 400 кВ∙А | 1,4  1,3  1,2 |