



Ток короткого замыкания: размер имеет значение

Сегодня Александр Ярошенко, автор блога СамЭлектрик.ру, популярно расскажет о токе короткого замыкания и сопротивлении петли фаза-ноль. С одной стороны, в этой теме нет ничего сложного — все можно объяснить на законе Ома, с другой — это очень и очень обширная часть электротехнической науки, поэтому в одну журнальную статью втиснуть всю информацию невозможно. Тем не менее, попытаемся разобраться вместе с Александром, как ток короткого замыкания и петля «фаза-ноль» связаны между собой, и какую ценность несет эта информация для практикующего электрика.

Что такое короткое замыкание?

Многие знают такое устойчивое выражение — «короткое замыкание». Кроме названия известного блокбастера из 90-х, эти слова ассоциируются у обывателя с частой причиной пожаров. На эту тему гуляет множество мифов и штампов. Я решил разобраться, что тут к чему и зачем все это нужно.

Короткое замыкание (КЗ) — это такой режим работы электросети, или явление, при котором в цепи в месте замыкания протекает максимально возможный ток. При возникновении КЗ вся энергия источника питания тратится только на нагрев проводов. Кроме того, возможны динамические (механические) последствия. Процесс этот обычно очень скоротечный и взрывообразный, поскольку тепловая энергия выделяется колоссальная. Если не прекратить это безобразие как можно быстрее, КЗ может привести к большим материальным и человеческим потерям.

Время отключения автоматических выключателей бытовых серий при КЗ на землю — менее 0,1 с. Если выключение происходит посредством устройств, реагирующих на дифференциальный ток (УЗО, АВДТ), время реакции будет менее 0,04 с.

Замыкание может происходить между любыми точками электрической цепи, обладающими разным потенциалом. Вот как это выглядит в трехфазном варианте — рисунок 1.

На рисунке условно показана вторичная обмотка понижающего трансформатора, установленного в трансформаторной подстанции (ТП), пятипроводная линия электропередачи и трехфазная электроустановка. Электроустановкой может быть частный или многоквартирный дом, а может и что-то промышленное.

РИСУНОК 1

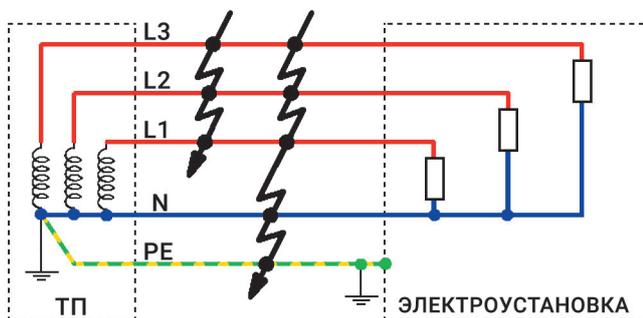
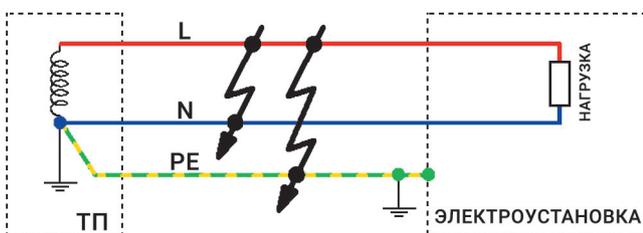
Короткие замыкания в электросети с системой заземления TN-S»

РИСУНОК 2

Короткое замыкание на нейтральный и защитный проводники**Замыкания могут быть в разных вариантах:**

- двух- и трехфазные (межфазные),
- одно- двух- или трехфазные на нейтральный N или защитный PE проводник.

Если рассматривать наиболее безопасную систему заземления TN-S с глухозаземленной нейтралью трансформатора, то наиболее часто (на практике — около 90%) встречается однофазное замыкание между фазным проводом и нейтралью N (либо защитным проводником PE). Поэтому далее будет рассматривать более простой, однофазный вариант — рисунок 2.

Замыкание может произойти где угодно — хоть около трансформаторной подстанции (ТП) из-за невнимательности экскаваторщика, хоть в квартире из-за кота, уронившего елку. В любом случае, защита должна отработать четко, сведя к минимуму последствия КЗ.

Причины короткого замыкания

КЗ может возникнуть по разным причинам, основная из которых — нарушение изоляции или взаимного расположения токоведущих частей. Очень часто в возникновении КЗ виноват человеческий или природный фактор.

Пример, который оценят женщины (чудо, если они будут читать эту статью) — из-за постоянных

**Водосточная труба в старой части Батуми**

перегибов ухудшается изоляция, и в один «прекрасный» момент фен или утюг «бахают» на вводе или около вилки.

Другой пример — из-за механической поломки или внешнего воздействия токоведущие части по какой-то причине оказываются слишком близко друг к другу, вплоть до полного соприкосновения. Это может случиться из-за природных явлений (упало дерево на провода), ударов, падений электроприборов.

Ну и классический пример — КЗ из-за вмешательства в электропроводку домашних «мастеров на все руки». По законам жанра, у мастера после этого инцидента обязательно должны стоять дыбом волосы, а лицо быть черным. Мне от таких картинок не смешно — все происходит по-другому.

Как избежать КЗ?

Понятно, что полностью избежать этого неприятного явления невозможно — тут велик элемент случайности. Однако, в наших силах существенно снизить риск возникновения КЗ. И тут колоссальное значение приобретает регулярный осмотр и техническое обслуживание электросетей.

Как думаете, какие нужны превентивные меры защиты от КЗ на фото с водосточной трубой?

Примеры превентивных мер:

- чистка токоведущих частей, контактов и изоляторов от пыли и грязи;
- проверка защиты от влажности;
- проверка целостности укладки и монтажа, протяжка контактов;
- ограждение и дополнительная защита опасных участков;
- вывешивание и наклеивание предупреждающих табличек и надписей;
- обрезка деревьев и устранение других опасных факторов.

В серьезных организациях регулярно проводят проверку кабелей и контактов тепловизором, а также измерение сопротивления изоляции и испытания изоляции высоковольтным напряжением.

Замыкание и перегрузка

Чем отличаются эти два явления — короткое замыкание и перегрузка?

В электрической цепи можно выделить 4 принципиально разных режима, которые отличаются по току потребления:

- 1. Режим холостого хода.** Ток равен нулю, напряжение номинальное, потерь никаких нет. Розетка, к которой ничего не подключено, работает как источник напряжения в режиме холостого хода.
- 2. Номинальный режим.** Иначе — нормальный режим, когда мощность нагрузки не превышает расчетную. В этом режиме все хорошо, мы спокойно наслаждаемся благом электрификации страны. «Просадка» напряжения если и будет, то незначительная — единицы процента.
- 3. Режим перегрузки.** В этом режиме ток может в несколько раз превышать номинальный, а потери напряжения могут достигать десятков вольт. Перегрузка может произойти из-за частичного ухудшения изоляции, превышения суммарной мощности подключенных потребителей, либо из-за неисправности внутри отдельного электроприбора (например, межвитковое замыкание либо заклинивание электродвигателя, или замыкание внутри ТЭНа).
- 4. Режим короткого замыкания.** Это самый тяжелый, разрушительный режим. Ток в месте замыкания — максимально возможный для данных условий. Другие побочные эффекты КЗ — понижение напряжения у других потребителей.

Любые токи выше номинального называются сверхтоком.

Из-за перегрузки может легко возникнуть КЗ — провода греются, изоляция плавится, и так далее, со всеми вытекающими, стреляющимися и взрывающимися последствиями.

Не стоит путать перегрузку, короткое замыкание и искрение (дуговой пробой). Если первые два понятия отличаются значением сверхтока, то при последовательном дуговом пробое (например, ослабла затяжка клеммы в розетке) действующее значение тока может быть совсем незначительным (единицы ампер), что не вызовет срабатывания ни автоматического выключателя, ни УЗО. Спасти ситуацию от пожара сможет лишь Устройство защиты от искрения (от дугового пробоя), которое еще встречается сравнительно редко.

Чем определяется напряжение и ток при коротком замыкании?

Выше я сказал, что КЗ может произойти в любой точке линии. Давайте разбираться, как будет зависеть ток и напряжение в зависимости от места КЗ.

Короткое замыкание — это физическое явление. Ток короткого замыкания — это параметр питающей электросети, измеряемый в амперах или килоамперах (кА).

Немецкий физик Ом со школьных лет учит нас, что напряжение и ток определяются через сопротивление цепи. Ток короткого замыкания тоже рассчитывается по закону Ома и зависит от напряжения и сопротивления на данном участке цепи. Поскольку сопротивление проводов в реальной жизни — это не только то, что показывает мультиметр, но и индуктивная составляющая, закон Ома для тока КЗ запишем в более общем виде:

$$I_{кз} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{Z}$$

В числителе U — номинальное напряжение в сети. Число в знаменателе — полное сопротивление цепи Z , от которого и зависит ток КЗ. Вот как будет выглядеть полная схема однофазного питания квартиры и реальный случай КЗ с замкнувшим феном — рисунок 3.

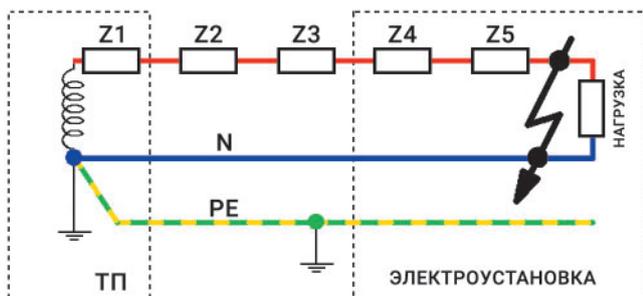
В схеме обозначены полные сопротивления различных участков питающей сети:

- Z_1 — внутреннее сопротивление трансформатора на подстанции с учетом пересчитанного сопротивления высоковольтной части;
- Z_2 — кабельная линия от ТП к распределительному пункту (РП) многоквартирного дома;

- Z3 — кабельная линия от РП до квартирного щитка;
- Z4 — кабель от щитка до розетки в одной из комнат;
- Z5 — переноска от розетки до замкнувшего фена.

РИСУНОК 3

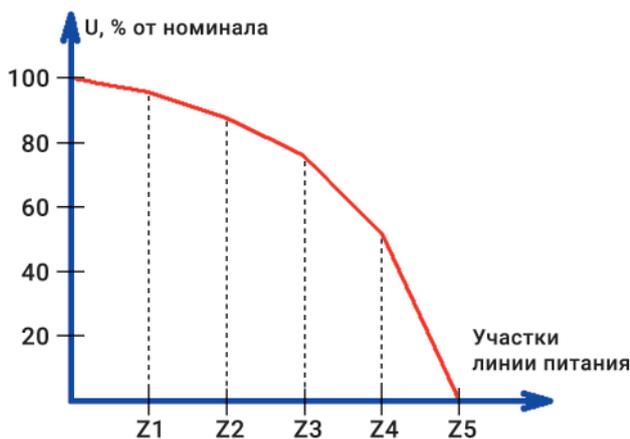
Замыкание в конце питающей линии — при этом ток КЗ минимальный



Вот как может выглядеть график уровня напряжения на разных участках — от клемм трансформатора на подстанции до замкнувшей вилки фена — рисунок 4.

РИСУНОК 4

Понижение напряжения до нуля в результате КЗ в конце линии

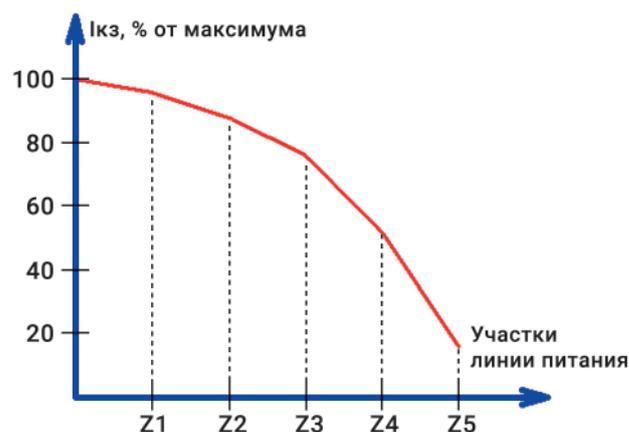


В результате КЗ напряжение в точке аварии упадет до нуля. Но напряжение упадет и у других потребителей, подключенных к той же трансформаторной подстанции. На мощных участках с большим сечением проводов доля «квартирного» тока КЗ ничтожна, поэтому там падение небольшое (участки с сопротивлением Z1, Z2). Но лампочки в соседних домах и подъездах станут гореть тусклее. Бывало?

Примерно так выглядит изменение тока КЗ от источника до места замыкания — рисунок 5.

РИСУНОК 5

Уменьшение тока КЗ при удалении от источника электроэнергии



Типичное значение тока КЗ на клеммах трансформатора мощностью около 1000 кВА, от которых питаются наши «районы, кварталы, жилые массивы» — порядка 10 кА. В розетках наших квартир ток КЗ может быть менее 1000 А, а в частном секторе и сельских районах ток КЗ может быть еще меньше — до 100 А.

Как же узнать ток КЗ?

Казалось бы — что трудного? Подставляем значения в формулу и считаем!

Однако, полный расчет тока КЗ весьма сложен, и ему можно посвятить курсовой, а то и дипломный проект. При этом нужно знать много исходных данных (например, мощность трансформатора на ТП и индуктивное сопротивление кабельных линий), и все равно результат будет теоретическим, не учитывающим реальность — например, переходные сопротивления контактов.

Поэтому расчеты обычно оставляют дипломникам и проектировщикам, а на практике измеряют фактический ток КЗ при помощи специальных приборов. Если все-таки нужен точный расчет, можно воспользоваться книгами, либо специальными программами для расчета.

Как измерить ток короткого замыкания?

Для измерения тока КЗ в продаже есть много профессиональных приборов различных производителей, по цене от 10 тыс. рублей. Все они прекрасно справляются со своей задачей.



Пыль и плохая изоляция — частые причины короткого замыкания

Есть и бытовое исполнение на ДИН-рейку — например, ВРТ-М02 от фирмы Меандр. Прибор имеет размеры автоматического выключателя, имеет необходимые настройки и индикацию напряжения. При понижении тока КЗ ниже порога срабатывает индикация. Хочу себе поставить такой в квартирный щиток.

Что делать, если измеренный ток КЗ слишком низкий?

Я уже много чего рассказал в статье. Но какой нам толк от знания этих параметров электросети?

Допустим, мы измерили прибором и получили значение тока КЗ в розетке (как правило, измерение проводят в самой удаленной точке). Как понять, что этот ток — слишком низкий? Это оценивается по критерию гарантированного срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя в измеренной цепи. Логично, что для этого ток КЗ должен быть больше, чем верхний предел диапазона расцепления. Напоминаю, для характеристики отключения «В» разброс 3...5 In, для «С» — 5...10 In, для «D» — 10...20 In.

Обычно пользуются правилом, изложенным в ПТЭЭП (п. 28.4, проверка срабатывания защиты при системе питания с заземленной нейтралью), где говорится о том, что при замыкании на нулевой защитный проводник ток КЗ должен быть не менее «1,1 верхнего значения тока срабатывания, мгновенно действующего расцепителя».

То есть, для автомата с номинальным током 10 А и характеристикой «В» ток КЗ в конце линии, которую он защищает, должен быть не менее $10 \times 5 \times 1,1 = 55$ А. Если же установлен автомат С25, ток КЗ должен быть не менее $25 \times 10 \times 1,1 = 275$ А.

Что же делать, если ток КЗ меньше, и допустимое время срабатывания отнюдь не гарантируется? Тут два выхода:

1. Увеличивать ток КЗ, для этого нужны затраты на прокладку новой питающей линии (по крайней мере, ее самого слабого звена).
2. Уменьшать номинал автомата (например, 25 А на 16) и букву характеристики отключения (с «С» на «В») в ущерб максимальной мощности нагрузки.

Что такое петля «Фаза-ноль» и как она связана с током КЗ?

Петля «Фаза-ноль» (или «Фаза-нуль», можно и так) — это цепь, или контур, по которому проходит ток от источника напряжения через нагрузку обратно в источник. Сопротивление петли «Фаза-ноль» обратно пропорционально току КЗ, измеряется в Омах:

$$Z_{\phi-0} = \frac{U}{I_{K3}}$$

Иными словами, два этих понятия связаны так же, как ток и сопротивление в законе Ома — одно можно рассчитать из другого, зная напряжение (в данном случае это номинальное напряжение 230 В).

Зачем нужно знать значения тока КЗ и сопротивления петли «Фаза-ноль»?

Знание тока КЗ (или сопротивления петли «Фаза-ноль») и мощности нагрузки позволяет нам правильно и оптимально (по соотношениям безопасность/функциональность/надежность/цена)

выбрать основные элементы энергосистемы — аппараты защиты и сечение кабелей. Далее немного подробнее.

Безопасность

Электрические сети должны быть безопасными на всех участках и во всех режимах. Для этого, кроме изоляции, применяют автоматические выключатели и устройства, управляемые дифференциальным током (УЗО). Вкупе с защитным заземлением, эти устройства защищают оборудование от КЗ и перегрузок, а человека — от опасности прямого или косвенного прикосновения.

Функциональность

Зная ток КЗ, можно выдать заключение о необходимости установки стабилизатора, или замены кабельной линии на новую. Кроме того, можно сделать вывод о селективности — можно ли ее обеспечить хотя бы частично?

Надежность

В случае высокого тока КЗ необходимо применить выключатели с высокой отключающей способностью для надежного функционирования в момент КЗ. Кроме того, должны быть предъявлены высокие требования к качеству монтажа и комплектующих.

Цена

Тут понятно — выполнение предыдущих пунктов значительно влияет на цену всей электросети.

Высокий ток КЗ — это хорошо или плохо?

Как я показал на графике ранее, чем дальше место замыкания от источника питания, тем меньше будет ток короткого замыкания, поскольку сопротивление линии будет больше. Высокий ток КЗ обычно бывает в тех местах электросети, которые расположены наиболее близко к подстанции, а кабельные линии имеют большое сечение проводов. В питающих сетях с напряжением 0,4 кВ относительно высокими считаются токи КЗ более 6кА, а токи КЗ выше 15 кА практически не встречаются. Итак, что мы имеем:

Минусы низкого тока КЗ

- большое падение напряжения при достаточно мощной нагрузке;
- как правило, низкое напряжение на электроприборах;
- нестабильность напряжения на электроприборах в зависимости от времени суток или времени года;

- высокое (вплоть до бесконечности) время срабатывания автоматических выключателей при КЗ на землю (работает только тепловой расцепитель);
- необходимость установки автоматических выключателей с характеристикой отключения «В» с целью более вероятного срабатывания электромагнитного расцепителя при КЗ;
- обязательная установка УЗО — при этом, кроме своих «основных» обязанностей (отключение питания при высоком токе утечки, а также для защиты человека при прямом и косвенном прикосновении), УЗО выполняет функцию защиты от КЗ на землю (ПУЭ 1.7.59, 7.1.72).

Плюсы низкого тока КЗ

- можно устанавливать дешевые автоматические выключатели с низкой номинальной наибольшей отключающей способностью ($I_{ср} = 4500 \text{ А}$);
- сравнительно легко можно обеспечить селективность между вводным и нижестоящим автоматами. Но нужен расчет и измерение точного значения тока КЗ.

Минусы высокого тока КЗ

- невозможность обеспечить селективность между вышестоящими и нижестоящими автоматами. Выход — установка рубильника либо селективно по времени автоматического выключателя;
- необходимость установки АВ с высокой номинальной наибольшей отключающей способностью ($I_{ср} = 6000, 10\,000 \text{ А}$ и т. д.). Отключающая способность должна быть выше, чем ток КЗ в начале защищаемого участка (ПУЭ п. 3.1.3);
- большие негативные последствия при возникновении КЗ.

Плюсы высокого тока КЗ

- легко гарантировать стабильное напряжение на нагрузке (качество электроэнергии);
- имеется перспектива подключения новых потребителей и увеличения нагрузки;
- гарантированное отключение линии при КЗ.

Резюмируя, можно сказать, что значение тока КЗ — палка о двух концах. В бытовом секторе ток КЗ часто бывает низким, и его стараются увеличить, прокладывая новые линии с высоким сечением проводов и устанавливая новые трансформаторные подстанции. В серьезной энергетике наоборот, применяют методы по уменьшению тока КЗ.

На методиках расчета и измерении токов КЗ основана другая область электротехники — селективность и выбор автоматических выключателей и УЗО. Эта отдельная большая тема будет рассмотрена в других статьях. 

Ознакомиться с полной версией статьи и обсудить тему можно на сайте www.samelectric.ru.

Текст: Александр ЯРОШЕНКО,

автор блога SamElectric.ru