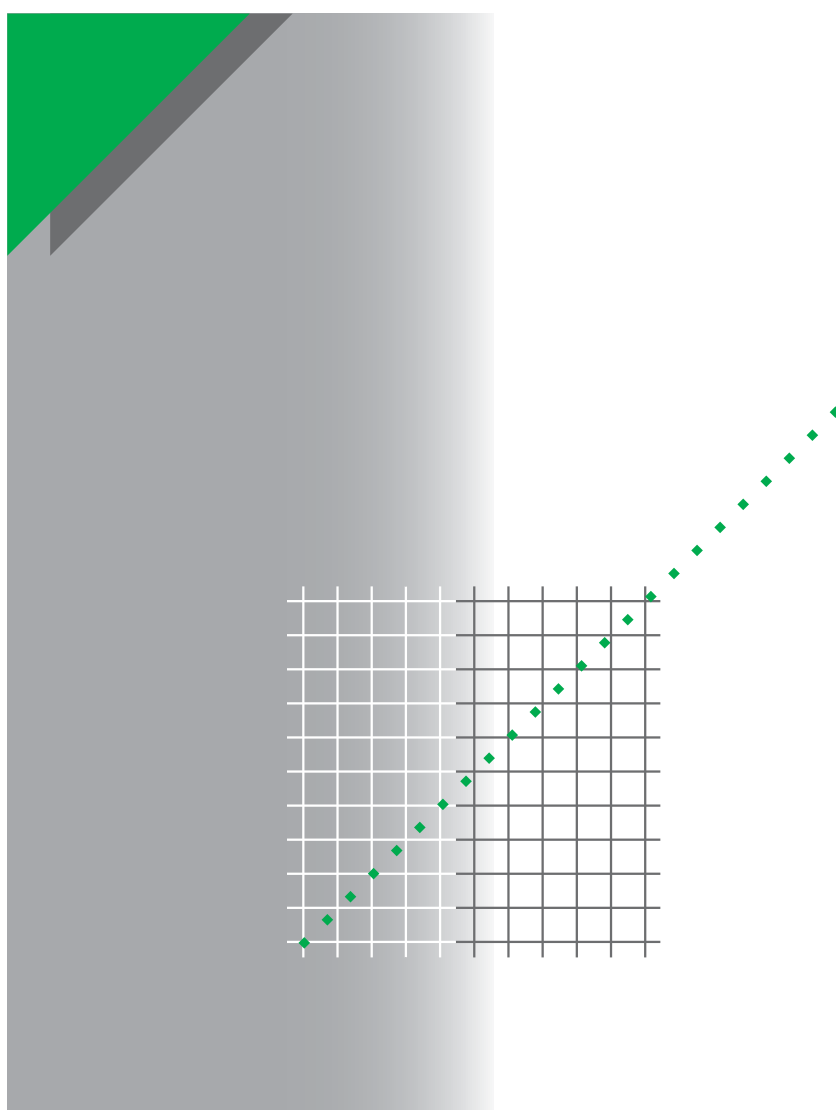


## Выпуск № 25

### Защитное отключение на дифференциальном токе в сетях низкого напряжения



Компания *Schneider Electric* приступила к выпуску **«Технической коллекции *Schneider Electric*»** на русском языке.

**Техническая коллекция** представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции *Schneider Electric* и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.

В **Технической коллекции** будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации *Schneider Electric*.

**Техническая коллекция** предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.

**Техническая коллекция** будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.

В каждом выпуске **Технической коллекции** будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.

**Валерий Саженов,**  
Технический директор  
ЗАО «Шнейдер Электрик»,  
Кандидат технических наук

## Выпуск № 25

### Защитное отключение на дифференциальном токе в сетях низкого напряжения



**Жак Шонек**

Инженер, выпускник Высшей Национальной Школы электротехники, электроники, информатики, гидравлики и телекоммуникаций и доктор технических наук университета Тулузы, он участвовал с 1980 по 1995 в проектировании регуляторов скорости марки «Telemecanique». Затем он заведовал отделом фильтрации гармоник. В настоящее время он работает с группой «Архитектура и Системы» Шнейдер Электрик в качестве эксперта по распределению электроэнергии.

---

Перевод выполнен доцентом Самарского государственного технического университета Лыковым Юрием Федоровичем.

**Токоведущие части:**

Все проводники, предназначенные для передачи электроэнергии, включая нейтраль на переменном и среднюю точку на постоянном токе, исключая PEN-проводник, функция которого «защитный проводник» (PE) превалирует над функцией «нейтраль».

**Защитный проводник (PE или PEN):**

Проводник, который, в соответствии с предписаниями, соединяет корпуса электроустановок и определенные проводящие части с заземляющим устройством.

**Прямое прикосновение:**

Контакт человека с токоведущими частями электроустановок (проводниками или частями нормально находящимися под напряжением).

**Косвенное прикосновение:**

Контакт человека с корпусами (открытыми проводящими частями), оказавшимися под напряжением (обычно в результате повреждения изоляции).

**Ток замыкания Id:**

Ток, возникший в результате повреждения изоляции (замыкания на корпус).

**Ток утечки на землю:**

Ток, стекающий с токоведущих частей на землю в отсутствие какого-либо повреждения изоляции.

**Фоновый ток утечки:**

Ток, стекающий через исправную изоляцию на землю.

**«Рабочий» ток утечки:**

Ток, стекающий на землю в отсутствие повреждения изоляции через элементы, подключенные преднамеренно (сопротивления, конденсаторы).

**Дифференциальный ток (ток небаланса):**

Алгебраическая сумма мгновенных значений токов, протекающих по всем рабочим проводникам в одной точке электрической цепи.

**Дифференциальный ток срабатывания: If**

Величина дифференциального тока, вызывающего срабатывание УЗО.

**Уставка дифференциального тока: I $\Delta$ n**

Дифференциальный ток срабатывания, назначенный изготовителем УЗО, при котором оно должно срабатывать в определенных условиях. В соответствии с нормами изготовления, при 20°C для УЗО низкого напряжения (НН) должно соблюдаться условие:

$$\frac{I\Delta n}{2} < I_f < I\Delta n$$

**Замыкание на землю (на корпус):**

Пробой изоляции, вызывающий протекание тока замыкания на землю или короткое замыкание через защитный проводник.

**Устройство защитного отключения (УЗО) на дифференциальном токе:**

Электроаппарат, реагирующий на дифференциальный ток; он обычно соединен или встроен в отключающий аппарат.

**Электризация:**

Приложение напряжения между двумя частями тела живого существа.

**Электропоражение:**

Электризация, приводящая к смерти.

**Фибрилляция сердца:**

Нарушение работы сердца, соответствующее потере синхронизма сокращения его стенок (диастола и систола). Причиной этого может быть периодическое возбуждение, вызванное прохождением переменного тока через тело. Самым тяжелым последствием этого является остановка кровообращения.

**Изоляция:**

Элемент электроустановки, который не позволяет передачу напряжения и прохождение тока между частями, нормально находящимися под напряжением и корпусом или землей.

**Корпус (открытая проводящая часть):**

Доступная прикосновению проводящая часть электроустановки, нормально изолированная от токоведущих частей, но которая может оказаться под опасным напряжением в результате повреждения изоляции.

**Возмущение общего типа:**

Установившийся или переходный электромагнитный процесс, приложенный между токоведущими частями сети и землей.

Им может быть коммутационное перенапряжение, установившееся напряжение, сверхток, электростатический разряд.

**Возмущение дифференциального типа:**

Это процесс, приложенный между различными токоведущими частями сети, например, перенапряжение.

**Режим нейтрали:**

См. схему заземления.

**Схема заземления :**

Все еще иногда называется «Режим нейтрали». Стандарт МЭК 60364 определяет три принципиальные схемы заземления, которые устанавливают возможные соединения нейтрали источника с корпусами и с землей. Способы обеспечения электробезопасности и виды защиты сети различны для каждой из трех схем.

**Предельное безопасное напряжение (U<sub>L</sub>):**

Напряжение U<sub>L</sub>, ниже которого отсутствует опасность электропоражения.

# Защитное отключение на дифференциальном токе в сетях низкого напряжения (НН)

Устройства защитного отключения (УЗО) на дифференциальном токе в настоящее время признаны во всем мире наиболее эффективным средством обеспечения электробезопасности при прямом и косвенном прикосновениях в сетях НН. Их выбор и использование требуют хорошего знания правил устройства электроустановок, особенно схем заземления, существующих технологий защиты и их возможностей.

В данном выпуске технической коллекции рассматриваются все эти аспекты, дополненные многочисленными ответами службы технической поддержки Шнейдер Электрик на регулярно присылаемые вопросы.

## Содержание

	Стр.
<b>1. Введение</b>	<b>4</b>
<b>2. Опасности электрического тока</b>	<b>4</b>
2.1. Опасности электризации человека	4
2.2. Опасность возникновения пожара	6
2.3. Разрушение электроприемников	7
<b>3. Защита от поражения электрическим током</b>	<b>8</b>
3.1. Правила устройства электроустановок	8
3.2. Обнаружение повреждения изоляции	9
<b>4. УЗО на дифференциальном токе</b>	<b>11</b>
4.1. Принцип действия	11
4.2. Применение	11
4.3. Основные характеристики	12
4.4. Технология	13
4.5. Ограничения, связанные с датчиком тока	16
4.6. Особые случаи применения	17
<b>5. Заключение</b>	<b>23</b>
<b>Приложение 1. Расчет напряжения косвенного прикосновения</b>	<b>24</b>
<b>Приложение 2. Типы преобразователей и форма тока замыкания</b>	<b>26</b>
<b>Приложение 3. Токи утечки в различных схемах заземления</b>	<b>29</b>
<b>Приложение 4. Чувствительность УЗО в зависимости от напряжения сети</b>	<b>31</b>
<b>7. Библиография</b>	<b>32</b>

# 1. Введение

Многочисленные преимущества электрической энергии не должны позволить нам забыть опасности, которые с ней связаны. Электричество широко используется в повседневной жизни многих людей и несчастные случаи, сопровождаемые пожарами, ожогами, смертями еще слишком часты.

Строгие правила устройства электроустановок были установлены международными (IEC, CENELEC) или национальными (NFPA в США, UTE во Франции) организациями.

Надежные устройства защиты были разработаны благодаря тщательному анализу опасностей и последствий

повреждений оборудования или его неправильного использования. Среди этих устройств УЗО были признаны международными нормами как эффективное средство защиты людей и материальных ценностей.

Рассмотрение темы данной работы разделено на 3 этапа:

- представление опасностей электрического тока,
- обзор средств защиты, предназначенных для ограничения опасностей,
- детальное описание работы УЗО на дифференциальном токе.

## 2. Опасности электрического тока

### 2.1. Опасности электризации человека

Человек, к телу которого приложено напряжение, подвергается воздействию электрического тока (электризации). В зависимости от интенсивности этого воздействия физиологические последствия могут быть различными:

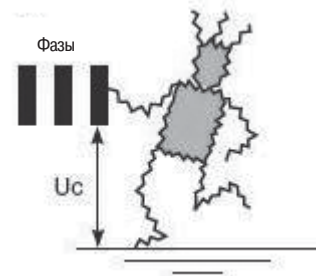
- неприятные ощущения,
- судороги мышц (неотпускание),
- ожоги,
- остановка сердца (электропоражение).

Эти последствия определяются различными факторами: физиологическим состоянием конкретного человека, окружающей средой (например, сухая или влажная), а также характеристиками тока, проходящего через тело.

Человек может попасть под напряжение в двух случаях:

- либо при прямом прикосновении — когда он прикасается к оголенному проводнику, находящемуся под напряжением,
- либо при косвенном прикосновении — когда он прикасается к металлическому корпусу электроприемника (ЭП), имеющего замыкание на корпус. Степень опасности зависит от величины тока и длительности его протекания через тело, в особенности через область сердца.

а) Прямое прикосновение



б) Косвенное прикосновение

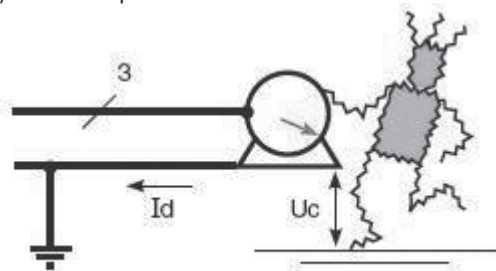


Рис. 1: Прямое и косвенное прикосновения

На **рисунке 2** обобщены результаты работ, опубликованных Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) на эту тему (техническая спецификация МЭК 60479-1, Изд.4, 2005: Воздействие тока на человека и на домашних животных — Часть 1: Общие аспекты). Она описывает последствия прохождения переменного тока через тело человека от левой руки к ногам в зависимости от его величины и продолжительности.

Особенно нужно выделить зоны 3 и 4, в которых опасность поражения током реальна.

■ Зона AC-3 (расположенная между кривыми В и С1)

Для людей, попавших в эту ситуацию, обычно опасность органических изменений отсутствует, но существует вероятность судорог мышц и затруднения дыхания, обратимых нарушений в формировании и передаче сердечных импульсов.

■ Зона AC-4 (расположенная справа от кривой С1)

Дополнительно к воздействиям зоны AC-3, вероятность возникновения фибрилляции желудочков сердца составляет:

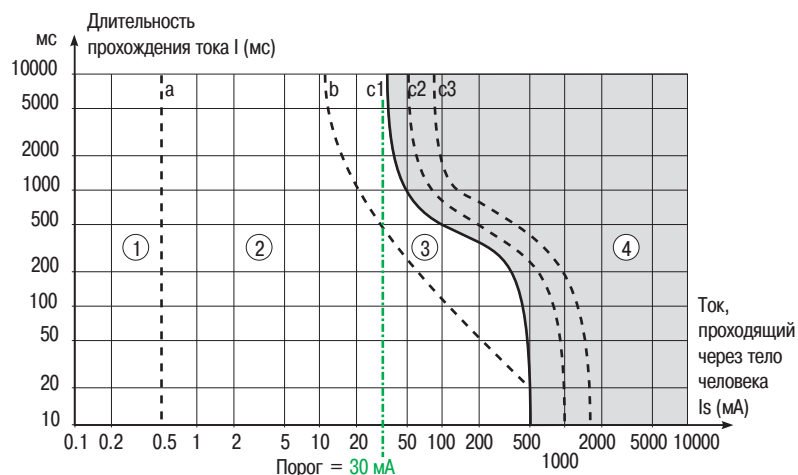
- около 5% между кривыми С1 и С2,
- менее 50% между кривыми С2и С3,
- более 50% за пределами кривой С3.

Физиопатологические воздействия, такие, как остановка сердца, остановка дыхания и тяжелые ожоги увеличиваются с возрастанием величины тока и времени воздействия.

Следует заметить, что через человека, попавшего в неблагоприятных условиях под напряжение 230 В может протекать ток порядка 150 мА.

**Принимая во внимание величины токов, рассматриваемые как опасные, максимально допустимая величина 30 мА считается безопасной.**

При низком напряжении (НН) главной составляющей сопротивления тела человека является сопротивление кожи, которое в значительной мере зависит от окружающей среды (помещения сухие, влажные, особо сырые).



Зона AC-1: Ощущение

Зона AC-2: Судороги мышц

Зона AC-3: Затруднения дыхания

Зона AC-4: Серьезные физиопатологические воздействия

AC-4.1: вероятность фибрилляции сердца до 5%

AC-4.2: вероятность фибрилляции сердца до 50%

AC-4.3: вероятность фибрилляции сердца более 50%.

**Рис.2:** Время-токовые зоны воздействия переменного тока (от 15 Гц до 100 Гц) на человека.

МЭК определяет «предельно допустимое напряжение прикосновения», обозначаемое  $U_L$ , как максимальное напряжение прикосновения, которое может быть приложено в течение неограниченного времени в определенных условиях окружающей среды.

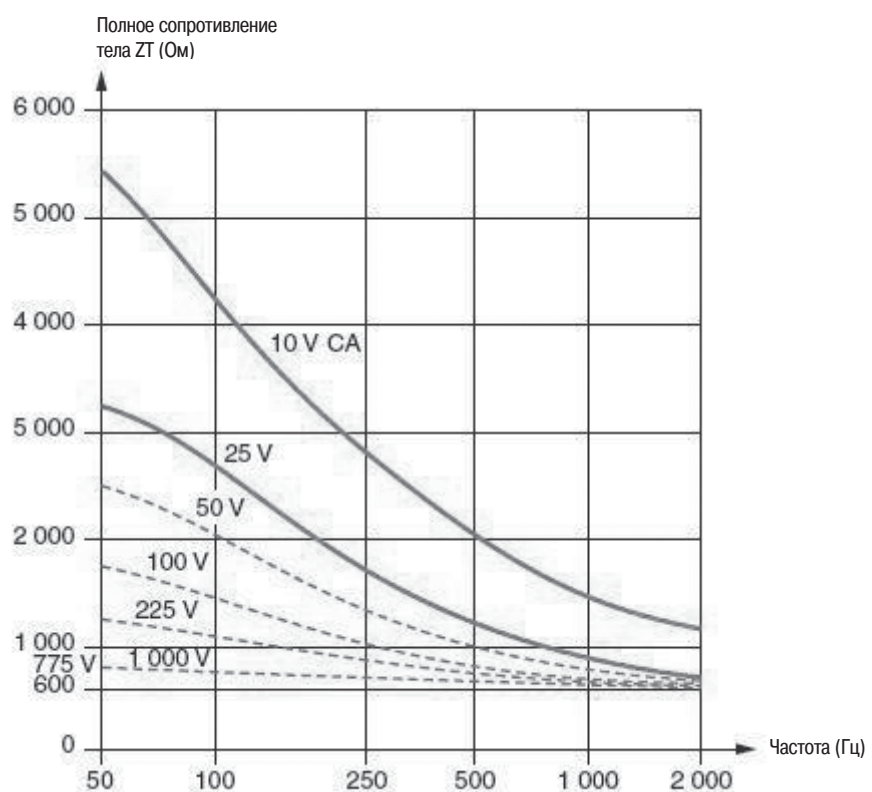
Действующее значение этого напряжения на переменном токе установлено на уровне 50 В. Это значение согласуется с величиной среднего сопротивления тела 1700 Ом и максимальным током 30 мА.

#### Воздействия в зависимости от напряжения и частоты

В стандарте МЭК 60479-1 приведены кривые изменения сопротивления тела в зависимости от напряжения и частоты.

На **рис. 3** показано, что сопротивление тела снижается с увеличением частоты.

Однако стандарт МЭК 60479-2 (Воздействия тока, проходящего через тело человека, особые аспекты), который рассматривает воздействия переменного тока частотой выше 100 Гц, указывает, что при одинаковом воздействии, величина тока при 1000 Гц примерно в 14 раз выше, чем при 50/60 Гц.



**Рис. 3:** Величина полного сопротивления тела  $Z_T$  в зависимости от частоты и напряжения прикосновения.

## 2.2 Опасность пожара

Исследование пожаров в промышленных и офисных зданиях, проведенное в 80-90-х годах одной из страховых компаний в Германии, показало, что электричество явилось их причиной более, чем в 40% случаев.

Значительное количество пожаров происходит из-за сильного точечного нагрева или из-за электрической дуги, вызванной повреждением изоляции. Опасность возгорания повышается с увеличением тока замыкания. Она

зависит также от класса пожарной или взрывоопасности помещения (хранение горючих материалов, присутствие горючей пыли или газов, ...).

Причиной многих пожаров, вызванных электричеством, является комбинация нескольких факторов:

- устаревшая электроустановка,
- снижение уровня изоляции,
- накопление пыли и влаги.



Постепенное увеличение токов утечки по поверхности загрязненной изоляции в присутствии влаги вызывает искрение из-за скоплений углерода на поверхности. Развитие этого процесса, связанное с чередованием циклов конденсации влаги на поверхности и высыханием происходит очень медленно. Когда ток утечки превышает 300 мА, происходит лавинообразный процесс, способный воспламенить скопления углерода, которые, в свою оче-

редь, могут привести к возгоранию изоляции и электроаппаратов. Существует реальная опасность возгорания при токах утечки начиная с 300 мА.

Ток утечки протекает от источника к металлическим частям и не возвращается к источнику через обратный провод.

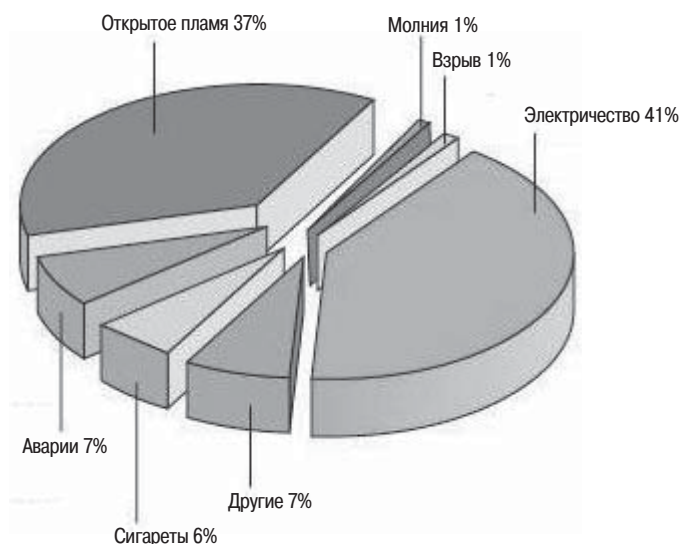


Рис. 4: Причины пожаров в зданиях



Рис. 5: Процессы, могущие вызвать пожар

## 2.3. Разрушение электроприемников

Многие ЭП могут быть повреждены или уничтожены в результате протекания тока большой величины. Например, это электродвигатели, длительно работающие с нагрузкой, превышающей номинальную, или кабели, к которым подключено слишком большое количество ЭП.

Перегрузка вызывает перегрев проводников и может привести к пробое изоляции и к появлению тока замыкания. Он может иметь малую величину (при этом его трудно обнаружить) или быстро перейти в короткое замыкание и вызвать серьезные повреждения.

## 3 Защита от поражения электрическим током

### 3.1. Правила устройства электроустановок

Основным международным стандартом является МЭК 60364 «Электроустановки зданий», и, в частности, глава 4-41: Мероприятия по обеспечению безопасности – Защита от поражения электрическим током.

Он устанавливает правила, в соответствии с которыми токоведущие части должны быть недоступны для прикосновения, а открытые проводящие части (корпуса) не должны представлять опасность как в нормальном режиме, так и в случае замыкания на корпус.

Этот международный стандарт был принят во многих странах либо в чистом виде, либо адаптированным к местным условиям. Например, во Франции должны соблюдаться нормы NFC 15-100: «Электроустановки низкого напряжения».

#### Общие правила

Установки должны быть спроектированы так, чтобы обеспечить основную защиту в нормальном режиме (защиту от прямого прикосновения) и защиту в случае повреждения (защиту от косвенного прикосновения).

■ Основная защита обеспечивается при помощи изоляции токоведущих частей, присутствия барьеров или оболочек.

Защита в случае повреждения обеспечивается с помощью одного или нескольких следующих мероприятий:

- автоматическое отключение питания,
- двойная или усиленная изоляция,
- электрическое разделение (использование разделительного трансформатора),
- использование очень низкого напряжения.

Чаще всего используется автоматическое отключение питания. При этом существуют определенные требования:

- заземление металлических корпусов и защитное уравнивание потенциалов,
- соблюдение наибольшего допустимого времени отключения замыкания на корпус (например: 0,4 с при 230 В).

Защитный аппарат должен автоматически отделить поврежденный участок от его питания таким образом, чтобы напряжение косвенного прикосновения, возникшее в результате замыкания на корпус и превышающее предельно допустимое напряжение прикосновения (UL), не могло присутствовать в течение времени, достаточного для создания опасности для человека, прикасающегося к проводящим частям, доступным для одновременного прикосновения.

■ Дополнительная защита должна быть предусмотрена на случай выхода из строя основных средств защиты от прямого прикосновения.

В частности, стандарт МЭК 60364-4-41 требует, чтобы защита от прямого прикосновения применялась на переменном токе для розеточных цепей общего пользования до 20 А и для портативных (переносных) ЭП до 32 А, предназначенных для наружного использования. Уставка этой защиты должна быть 30 мА.

#### Схемы заземления

Стандарт МЭК 60364 устанавливает три принципиальных схемы заземления электрической сети, иногда называемые «режимы нейтрали» (см. рис. 6), по-разному используемые в разных странах. (Cahiers Techniques № 172, 173, Промышленная энергетика, № 12, 2003)

Они различаются положением нейтрали источника по отношению к земле (заземлена или изолирована) и присоединением корпусов. Выбор режима нейтрали зависит от характеристик электроустановки и от условий и требований эксплуатации (окружающая среда, устройства контроля режима работы, бесперебойность питания).

##### ■ Схема TT

В этой схеме, называемой «заземленная нейтраль»:

□ Нейтраль источника присоединена к заземляющему устройству, отделенному от заземляющего устройства корпусов ЭП.

□ Все корпуса должны быть присоединены к одному заземляющему устройству, предусмотренному для данной группы ЭП.

##### ■ Схема TN

Принцип этой схемы, называемой «зануление» - превратить любое замыкание на корпус в однофазное короткое замыкание фаза-нейтраль.

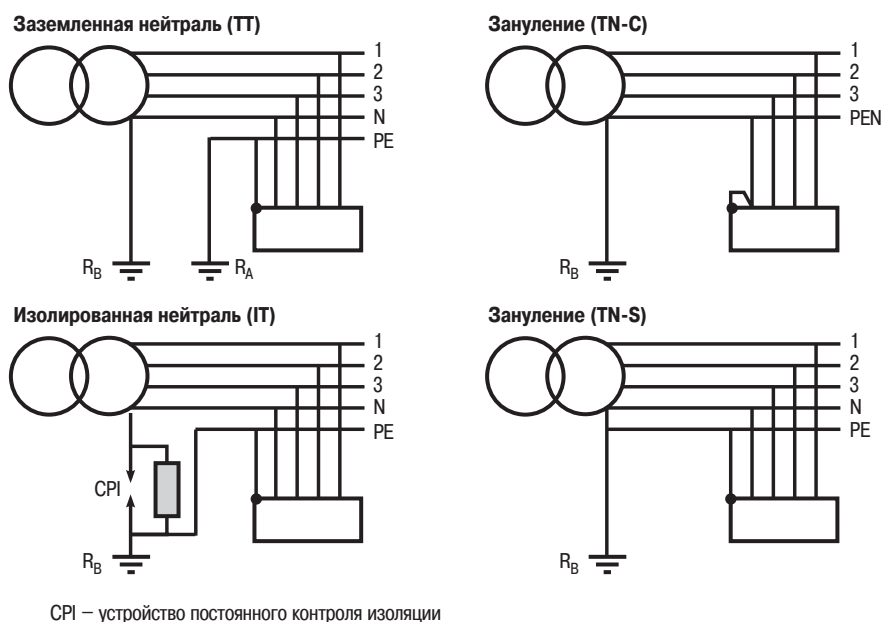
В этой схеме:

- нейтраль каждого источника НН глухо заземлена,
- все корпуса присоединены к нейтрали источника и, следовательно, к земле защитным проводником PE (отдельным рабочим нейтральным проводом – TN-S) или PEN (совмещенным нейтральным и защитным проводником – TN-C).

##### ■ Схема IT

В этой схеме, называемой «с изолированной нейтралью», нейтраль трансформатора:

- либо изолирована от земли (изолированная нейтраль),
- либо соединена с землей через большое сопротивление (резистивная нейтраль), все корпуса электроустановки заземлены.



**Рис. 6:** Три принципиальные схемы заземления – TT, TN, IT, установленные стандартом МЭК 60364-1. TN может быть либо TN-C (нейтраль и PE совмещены), либо TN-S (нейтраль и PE разделены).

## 3.2 Обнаружение повреждения изоляции

Повреждение изоляции может быть следствием разрушения изолирующего материала:

- между двумя токоведущими проводниками,
- между проводником и корпусом или защитным проводником,
- вокруг одного токоведущего проводника, что делает его доступным для прикосновения.

Повреждение изоляции между токоведущими частями приводит к короткому замыканию. Другое повреждение (встречается наиболее часто) вызывает ток, стекающий на землю. Этот ток не замыкается через токоведущие проводники и называется током «замыкания на землю».

Он является алгебраической суммой мгновенных значений токов, протекающих в данный момент по токоведущим проводникам, откуда название: «дифференциальный ток» (иногда – «ток небаланса»).

Замечание: если токи синусоидальны, можно использовать их векторное представление и говорить о «векторной сумме» токов.

Это представление не подходит в присутствии токов высших гармоник и определение «алгебраическая сумма» является поэтому более общим.

Этот ток может быть вызван повреждением изоляции между токоведущим проводником и корпусом ЭП (представляющим опасность косвенного прикосновения) или повреждением изоляции токоведущего проводника (представляющим опасность прямого прикосновения).

Эти ситуации изображены на рис.7.

Величина тока замыкания на землю зависит от вида повреждения и также от схемы заземления.

Этот ток может вызвать опасное напряжение прикосновения, что требует отключения поврежденной цепи. В приложении 1 приведены расчеты тока замыкания и напряжения прикосновения в зависимости от схемы заземления.

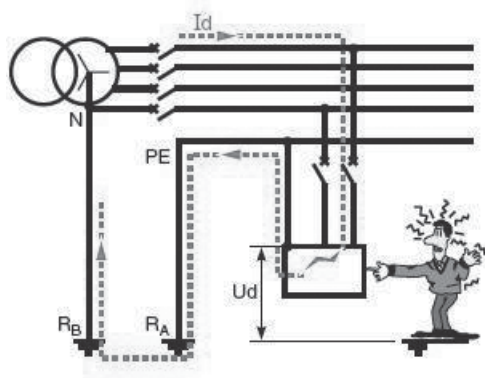
В схеме TN ток замыкания на корпус — это ток короткого замыкания. Это большой по величине ток и отключение цепи может быть сделано при помощи защиты от сверхтоков (при помощи МТЗ).

Напротив, в схеме TT его величина слишком мала, чтобы быть обнаруженным и отключенным с помощью обычной МТЗ (тепловым или электромагнитным расцепителями автомата, предохранителем).

Также во всех случаях прямого прикосновения ток весьма мал и не может быть обнаружен и отключен с помощью МТЗ. Это относится также к току утечки, опасному в пожарном отношении.

В этих условиях ток замыкания на землю должен быть обнаружен и отключен с помощью специального аппарата: Устройства Защитного Отключения (УЗО), которое является объектом рассмотрения в следующей главе.

а) Косвенное прикосновение



в) Прямое прикосновения

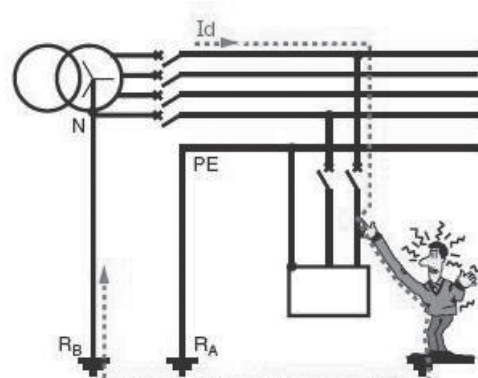


Рис. 7: Ток замыкания  $I_d$  = «дифференциальный ток».

## 4. УЗО на дифференциальном токе

### 4.1 Принцип действия

Принцип действия УЗО иллюстрируется на рис.8. Измерение алгебраической суммы токов в токоведущих проводниках (три фазы и нейтраль) осуществляется при помощи датчика, который представляет из себя трансформатор тока нулевой последовательности (тор), через окно которого проходят все токоведущие проводники.

Вторичная обмотка, намотанная на тор, предназначена для обнаружения магнитного потока, наведенного дифференциальным током.

В отсутствие замыкания на корпус, алгебраическая сумма токов в токоведущих проводниках равна нулю и магнитный поток в торе отсутствует.

В случае однофазного замыкания на корпус эта сумма не равна больше нулю и ток замыкания вызывает появление в торе магнитного потока, который наводит ток в его вторичной обмотке.

Этот ток выпрямляется, фильтруется и усиливается. Если полученный сигнал выше определенного порога, то начинается отсчет выдержки времени (она может быть равна нулю при мгновенном срабатывании). Если к концу выдержки времени неисправность по-прежнему присутствует, то производится отключение электроаппарата.

Использование УЗО совершенно невозможно в сети TN-C, так как рабочий нейтральный проводник не отделен от защитного проводника, что не позволяет выделить дифференциальный ток из тока нейтрали.

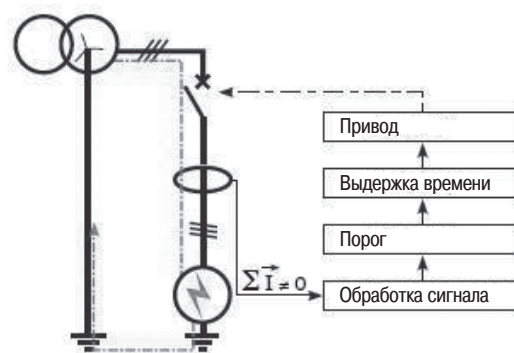


Рис. 8: принцип действия УЗО.

### 4.2 Применения

#### Дополнительная защита от прямого прикосновения

УЗО имеет возможность обнаружить слабый ток утечки, проходящий по телу человека. Таким образом, оно позволяет реализовать дополнительную защиту в случае выхода из строя основных средств защиты (например, старая или поврежденная изоляция, неосторожность ...). Эту защиту иногда называют защитой на крайний случай, так как она позволяет отключить ток когда другие устройства защиты не действуют.

Использование УЗО 30 мА на всех розеточных цепях с током до 20 А впредь должно быть обязательным в соответствии со стандартом МЭК 60364-4-41 (Электроустановки зданий – Часть 4-41: Мероприятия по обеспечению безопасности – Защита от поражения электрическим током).

Нужно помнить, что УЗО не ограничивает мгновенный ток, проходящий по телу человека, но оно ограничивает время, в течение которого тело подвергается воздействию тока.

Также следует заметить, что в случае прямого прикосновения к фазному проводнику под напряжением 230 В протекающий ток установится на уровне 150 мА. УЗО с чувствительностью 10 или 30 мА позволят в начальный момент этому току пройти.

При этих двух величинах чувствительности степень защиты одинакова. Уставка 30 мА позволяет достичь экономического компромисса между бесперебойностью питания и электробезопасностью: становится возможным подключить к одному УЗО несколько ЭП или цепей, при этом фоновый ток утечки не вызывает ложного отключения УЗО. Понижение уставки при таком же фоновом токе утечки потребует увеличить количество УЗО.

#### Защита от косвенного прикосновения

В схеме ТТ использование УЗО является единственным средством обеспечения защиты от косвенного прикосновения, т.к. опасный ток однофазного замыкания слишком мал, чтобы быть обнаруженным устройствами МТЗ.

Применение УЗО упрощает также задачу в сетях TN-S или IT. Например, когда питающий кабель имеет большую длину, недостаточная величина тока замыкания на землю вызывает трудности настройки МТЗ. Тем более, если длина кабеля неизвестна, расчет величины тока замыкания невозможен и использование УЗО является единственно возможным решением.

В этих условиях уставка УЗО может достигать нескольких Ампер или даже десятков Ампер.

### Защита от пожара

Стандарт МЭК 60364-4-42 (Электроустановки зданий – часть 4-42: Мероприятия по обеспечению безопасности – Защита от тепловых воздействий) также признает эффективность УЗО в обеспечении защиты от опасности

возникновения пожара, требуя использовать УЗО с уставкой не более 500 мА. В ближайшем будущем эта уставка должна быть снижена до 300 мА, как это уже установлено некоторыми национальными нормами (например, NFC 15-100 во Франции).

## 4.3 Основные характеристики

УЗО должны выбираться в зависимости от вида питаемой нагрузки. Эта рекомендация касается в особенности полупроводниковых устройств, для которых токи замыкания не всегда синусоидальны. Примеры полупроводниковых преобразователей, формы кривых тока замыкания и типы УЗО, которые должны при этом применяться, приведены в приложении 2.

### Типы АС, А, В

В стандарте МЭК 60755 (УЗО на дифференциальном токе, общие требования) определены 3 типа УЗО, в зависимости от характеристик тока замыкания.

#### ■ Тип АС

УЗО, обеспечивающее отключение дифференциальных переменных токов, имеющих синусоидальную форму.

#### ■ Тип А

УЗО, срабатывание которого обеспечивается:

- при дифференциальном переменном токе синусоидальной формы,
- при дифференциальном пульсирующем токе одного направления,
- при дифференциальном пульсирующем токе, содержащем постоянную составляющую от 0,006 А с фазовым управлением или без него, независимо от полярности.

#### ■ Тип В

УЗО, срабатывание которого обеспечивается:

- во всех случаях срабатывания УЗО типа А,
- при дифференциальных синусоидальных токах частотой до 1000 Гц,
- при дифференциальных синусоидальных токах, наложенных на чисто постоянный ток,
- при дифференциальных пульсирующих токах, наложенных на чисто постоянный ток,
- при дифференциальных токах, которые могут быть вызваны замыканиями в цепях выпрямителей:
  - трехфазный однополупериодный выпрямитель или трехфазный двухполупериодный выпрямитель по мостовой схеме,
  - двухполупериодный выпрямитель, включенный на линейное напряжение с фазовым управлением или без него, независимо от полярности.

Некоторые электронные устройства могут вызывать токи замыкания, форма которых не описана в определениях, приведенных выше.

Примеры приведены в приложении 2.

Работы по исследованию нестандартных случаев проводятся по заданию МЭК.

### Чувствительность

Чувствительность УЗО определяется его «уставкой дифференциального тока срабатывания», обозначаемой  $I_{\Delta n}$ .

Рекомендуемые величины уставок, определенные МЭК, позволяют классифицировать УЗО по чувствительности  $I_{\Delta n}$  на три группы:

- высокой чувствительности (ВЧ): 6-10-30 мА,
- средней чувствительности (СЧ): 0,1-0,3-0,5-1 А,
- низкой чувствительности (НЧ): 3-10-30 А.

УЗО, предназначенные для домашнего или аналогичного использования имеют только среднюю или высокую чувствительность. Очевидно, что УЗО высокой чувствительности (ВЧ) используются чаще для защиты от прямого прикосновения и что УЗО СЧ, имеющие  $I_{\Delta n} = 300-500$  мА необходимы для противопожарной защиты.

Остальные УЗО (СЧ и НЧ) используются в других случаях, таких как защита от косвенного прикосновения (обязательная в сетях ТТ) или для защиты электрических машин от повреждений.

### Время отключения

В главе 1 показано, что воздействие электрического тока зависит от его величины и времени прохождения. Время реакции УЗО уточняется в стандартах, называемых «изделия»:

- МЭК 61008: «Выключатели нагрузки на дифференциальном токе для домашнего и аналогичного использования без встроенной защиты от сверхтока» (УЗО – выключатель нагрузки или дифференциальный выключатель нагрузки, или просто УЗО или ВДТ).

- МЭК 61009 «Автоматические выключатели на дифференциальном токе со встроенной защитой от сверхтока для домашнего или аналогичного использования» (дифференциальный автоматический выключатель, или дифавтомат, или АДТ),
  - МЭК 60947-2, приложение В: «Аппараты НН – Автоматические выключатели со встроенной защитой дифференциального тока»,
  - МЭК 60947-2, приложение М: «Аппараты НН – Модульные устройства дифференциального тока MRCД (не встроенные в коммутационный аппарат)».
- Нормализованные величины времени срабатывания приведены в таблице на рис.9 и на кривых рис.10 для УЗО типов G и S:
- G (общего применения) – УЗО мгновенного действия,
  - S – «селективные» УЗО, имеющие небольшую задержку времени срабатывания (используемые, например, во Франции для вводных выключателей).

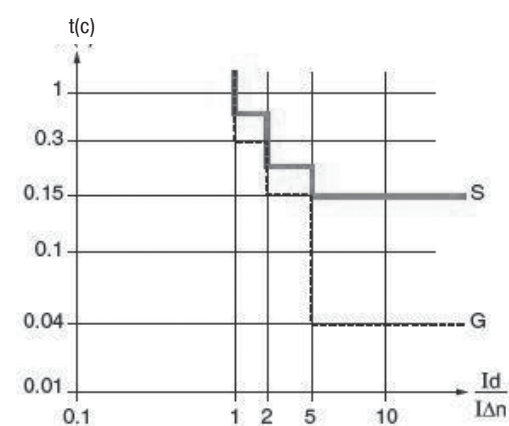


Рис. 10: Кривые максимального времени срабатывания для дифавтомата или УЗО «S» - селективного и «G» - общего применения

Тип	In A	IΔn A	Нормализованные величины времени срабатывания (с) и времени запаздывания (с) для дифференциального тока, равного:				
			IΔn	2 IΔn	5 IΔn	5 A, 10 A 20 A, 50 A 100 A, 200 A 500 A	
G	Любая величина	Любая величина	0,3	0,15	0,04	0,04	Максимальное время срабатывания
S	≥ 25	> 0,030	0,5	0,2	0,15	0,15	Максимальное время срабатывания
			0,13	0,06	0,05	0,04	Минимальное время запаздывания

Рис. 9: Нормализованные величины максимального времени срабатывания и времени запаздывания в соответствии с МЭК 61008

## 4.4. Технология

### Классификация УЗО в зависимости от способа питания:

«На собственном токе» или «УЗО, функционально не зависящие от напряжения питания» (электрохимические УЗО). Источником энергии, необходимой для отключения аппарата, является сам ток замыкания. Этот очень надежный способ питания хорошо подходит для использования в жилых домах или в аналогичных случаях, где пользователь не знает всей опасности электричества. Во многих странах, в частности в Европе, признают эффективность этих устройств для домашних и им подобных установок (стандарты EN 61008 и 61009).

«От постороннего источника» или «УЗО, функционально зависящие от напряжения питания» (электронные УЗО). Энергия, необходимая для отключения такого аппарата, поступает от источника, не зависящего от тока замыкания. Источником обычно является контролируемая (защищаемая) цепь. Таким образом, если эта цепь находится под напряжением, УЗО получает питание.



В отсутствие напряжения сети УЗО не работает, но опасность также отсутствует. УЗО сконструировано так, что остаются в работе несмотря на понижение напряжения питания, пока напряжение прикосновения может превысить 50 В (предельно допустимое безопасное напряжение). Это условие выполняется и в том случае, когда УЗО продолжает работать при питании только от двух фаз с пониженным напряжением до 85 В между фазами. Таковы характеристики блоков Vigi – УЗО, соединенных с выключателями «Сотраст» фирмы Merlin Gerin.

В зависимости от того, сохраняются или нет работоспособность УЗО при потере питания, выделяют так называемую группу «положительной безопасности». К ней относятся два типа УЗО:

- такие, которые отключаются только током замыкания: все электромеханические УЗО – с «положительной безопасностью»,
- такие (используемые реже) электронные УЗО, которые автоматически отключаются (позиция безопасности), если больше не обеспечены все условия для гарантированного отключения в случае появления тока замыкания (например снижение напряжения до 25 В).

#### Замечания:

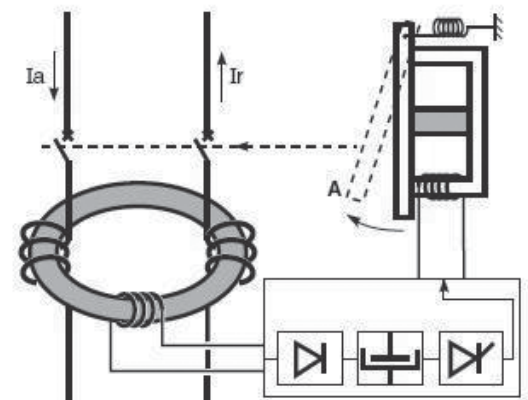
По поводу УЗО, питающихся от постороннего источника, не входящих в группу «положительной безопасности» в стандарте МЭК 60364, § 531-2-2-2 записано: «Их использование разрешено, если они расположены в установках, которые эксплуатируются, испытываются и проверяются обученным или квалифицированным персоналом».

Стандарт NFC 15-100 § 531.2.2.2 уточняет, что они не должны использоваться в электроустановках жилых помещений или аналогичных.

Технология электромеханических УЗО, где срабатывание не зависит от условий питания защищаемой цепи, хорошо адаптирована для создания УЗО высокой чувствительности, предназначенных для жилых помещений и других конечных участков электросети, где УЗО эксплуатируются не обученными людьми.

Причины этого следующие:

- Конечные участки электросети эксплуатируются, а иногда и монтируются не специалистами (без знаний электроустановки, без знаний опасностей, которым они подвергаются).
- Конечные участки электросети выполняются обычно однофазными – фаза + нейтраль (иногда встречаются двухфазные цепи).
- Эта технология позволяет продолжить обеспечивать защиту даже в случае обрыва нейтрали или фазного проводника выше УЗО (т.е. на участке от источника до УЗО).
- УЗО работают даже в случае снижения напряжения до нуля.



**Рис. 11:** через посредство тора ток замыкания передает энергию сигнала электромагниту, якорь которого удерживается в притянутом состоянии с помощью постоянного магнита. Когда порог срабатывания достигнут, электромагнит нейтрализует силу притяжения постоянного магнита, якорь под действием пружины отходит от сердечника, приводит в движение контакты – выключатель отключается.



**Рис. 12:** примеры УЗО «на собственном токе» и «от постороннего источника».



■ УЗО высокой чувствительности признано эффективным для дополнительной защиты от прямого прикосновения в случае повреждения защитного проводника РЕ (РЕ отсутствует, не присоединен или оборван). Эта технология дает дополнительное преимущество в случае значительного увеличения сопротивления заземления выше 500 Ом (старая установка, засушливый период, коррозия заземляющего контура ...), так как некоторые УЗО с питанием от постороннего источника, питаемые по схеме фаза – РЕ, не могут в этом случае правильно работать.

■ Эта технология обеспечивает высокую надежность и долговечность, так как никакие электронные элементы не подключены постоянно к сети. Отсюда следует превосходная нечувствительность к перенапряжениям и старению элементов. (Электронные элементы, если они имеются, присоединяются ко вторичной обмотке датчика тока нулевой последовательности и подвергаются воздействию очень низкого напряжения только в случае возникновения повреждения).

■ Эта надежность хорошо согласуется с условиями эксплуатации необслуживаемых электроустановок, какими являются обычно сети жилых домов.

### Проверка исправности

УЗО – это устройство безопасности. При любой используемой технологии важно, чтобы оно имело устройство тестирования. Электромеханические УЗО считаются наиболее надежными, реализация принципа «положительной безопасности» для электронных УЗО повышает безопасность, но все это не позволяет забывать практику периодического тестирования.

■ Почему нужно периодически тестировать УЗО?

На практике полной «положительной безопасности» не существует из-за возможности внутренних повреждений УЗО. Поэтому во Франции электронные УЗО используются в промышленных и других мощных распределительных электросетях, а электромеханические – в сетях жилых и аналогичных зданий, в соответствии с присущими им свойствами, описанными выше. В любом случае периодическое тестирование позволяет выявить возможные внутренние повреждения.

### Принцип действия

Он заключается в пропускании тока по одному из токоведущих проводников, находящихся внутри тора (см. рис. 13). Сопротивление R подбирается так, чтобы обеспечить достаточную для срабатывания УЗО величину тока, учитывая возможные токи утечки, которые могут вычитаться из этого тока. Максимально допустимая величина составляет  $2,5 \cdot I_{\Delta n}$  (для УЗО с регулируемой уставкой – это ток, соответствующий минимальной уставке). Этот принцип тестирования очень распространен, так как он позволяет проверить цепь: тор – реле – коммутационный аппарат. Он используется для дифференциальных розеток (розетки со встроенными УЗО), для УЗО и дифавтоматов.

Что касается дифференциальных реле с отдельным тором, то для них иногда используют тот же принцип. Например, реле Vigirex фирмы Merlin Gerin имеют встроенную функцию тестирования и дополнительно к ней функцию постоянного контроля цепи измерения тока (цепь вторичная обмотка тора – реле).

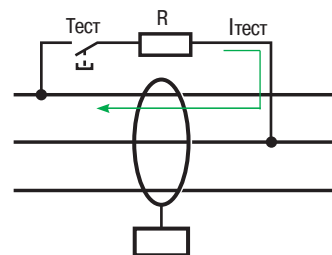


Рис. 13: принципиальная схема периодического тестирования.

## 4.5 Ограничения, связанные с датчиком тока

Используемый датчик — это трансформатор тока нулевой последовательности — тор. Он окружает все токоведущие проводники и поэтому магнитодвижущая сила (МДС) в сердечнике пропорциональна алгебраической сумме токов, протекающих в фазах и нейтрали. Индукция в торе и электрический сигнал на зажимах вторичной обмотки пропорциональны дифференциальному току.

Датчик этого типа позволяет обнаружить дифференциальный ток от нескольких миллиампер до нескольких десятков Ампер.

### Кабель с проводником PE

В соответствии с принципом УЗО датчик должен охватывать только токоведущие проводники. Защитный проводник PE должен быть отделен от других проводников в соответствии с расположением, изображенным на рис. 14.

### Проводники большого сечения

Существуют суммирующие рамки больших размеров, позволяющие измерить дифференциальный ток в проводниках большого сечения. Суммирование токов с помощью нескольких торов не рекомендуется (см. рис. 15). Если этот датчик трудно разместить на вводе от трансформатора в распределительное устройство НН, то можно смонтировать только один тор на нейтральной шине трансформатора (см. рис. 16). Действительно, в соответствии с первым законом Кирхгофа, в случае замыкания на корпус (на землю) в сети НН дифференциальный ток, измеренный тором N в точности тот же, что и измеренный тором G.

### Отходящие линии с большим рабочим током

Для того, чтобы вторичный ток тора имел малую погрешность и линейно зависел от первичного, нужно размещать токоведущие проводники как можно ближе к центру тора, чтобы их магнитные поля полностью взаимно компенсировались в отсутствие тока замыкания.

Действительно, магнитное поле вокруг проводника уменьшается пропорционально расстоянию; таким образом, фаза 3, изображенная на рисунке 17 вызывает в точке A местное магнитное насыщение, нарушая пропорциональность воздействия. Это явление происходит также, если тор расположен рядом или на самом изгибе кабеля (см. рис. 18). При больших рабочих токах значительная индукция рассеяния наводит во вторичной обмотке тора сигнал, который может вызвать ложное отключение.

Возможность ложного отключения тем выше, чем ниже уставка УЗО по отношению к фазным токам, особенно во время 3х или 2х фазного короткого замыкания. В трудных случаях, когда отношение  $I_{\text{фазн. макс.}}/I_{\Delta n}$  велико, можно использовать две возможности снижения риска ложного отключения:

- Использовать тор большего, чем необходимо диаметра, например в 2 раза больше, чем полный диаметр проводников.
- Поместить втулку в тор. Эта втулка должна быть изготовлена из магнитного материала, чтобы выровнять магнитное поле (магнитомягкая сталь, листовая электро-техническая сталь), (см. рис. 19).

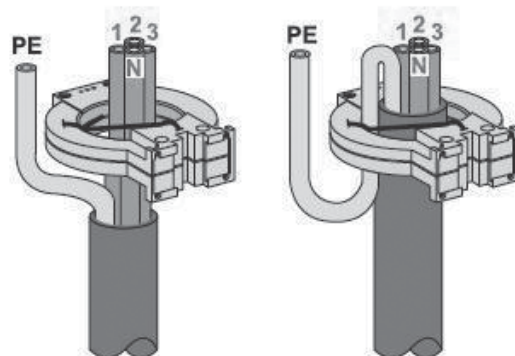


Рис. 14: монтаж торов на кабелях с PE.

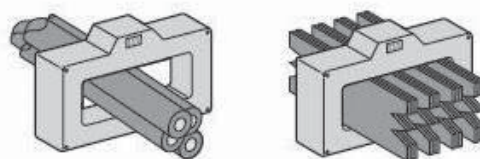


Рис. 15: суммирующие рамки на кабелях и шинах большого сечения.

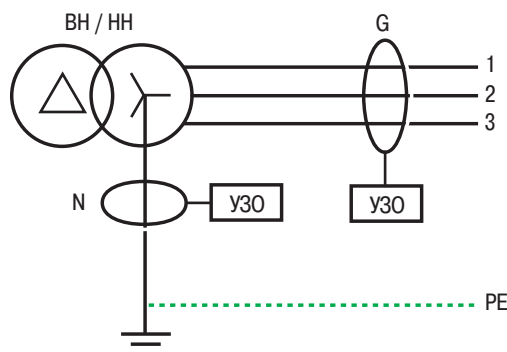


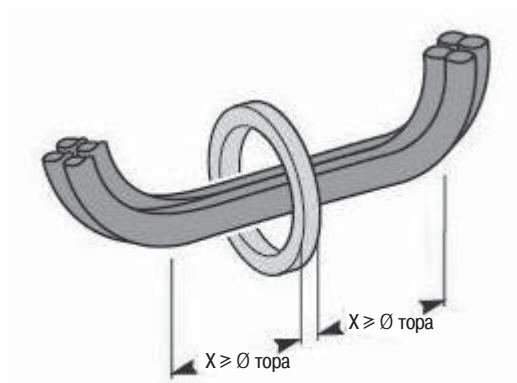
Рис. 16: тор N выдает ту же информацию, что и тор G.

Если все эти меры приняты:

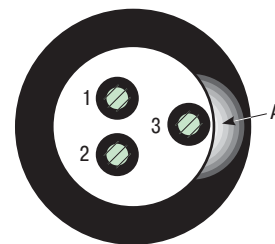
- центровка проводников,
  - тор большого диаметра,
  - и магнитная втулка,
- то отношение  $I_{\text{фазн. макс.}}/I_{\Delta n}$  может достигнуть 50000.

Следует подчеркнуть, что УЗО со встроенным тором дает монтажникам и эксплуатационникам готовое решение, так как изготовитель сам проводит исследования и реализует их результаты в технические решения, то есть:

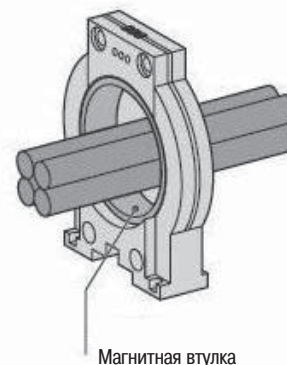
- он решает проблему центрирования токоведущих проводников, а для слабых токов может предусмотреть и правильно распределить несколько витков первичной обмотки вокруг тора,
- он может заставить работать тор с большей индукцией, чтобы увеличить снимаемую энергию и уменьшить чувствительность к индукции рассеяния, вызванной большими токами.



**Рис. 18:** тор должен монтироваться на достаточном удалении от мест изгиба кабелей, чтобы избежать ложных отключений



**Рис. 17:** плохое центрирование проводников в торе является причиной местного магнитного насыщения в точке А, что может привести к ложному отключению



**Рис. 19:** втулка из магнитного материала, размещенная вокруг проводников, внутри тора, снижает риск отключения, вызванного магнитным действием пиков тока.

## 4.6 Особые случаи применения

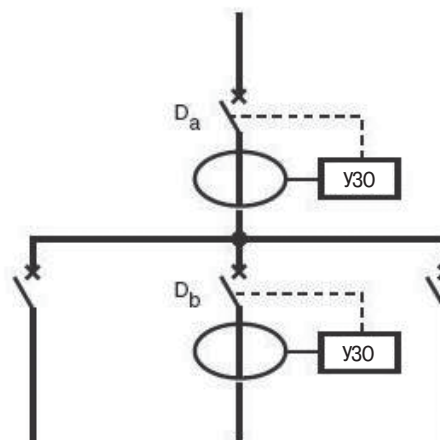
### Селективность

Обеспечение селективности и координация работы защит означает, что только один фидер, на котором произошло замыкание, будет отключен благодаря срабатыванию его защиты.

#### ■ Вертикальная селективность

Этот тип селективности касается работы двух защит, включенных последовательно (см. рис.20). Принимая во внимание допустимые ошибки в токах уставки и временах срабатывания УЗО, селективность должна быть токовой и временной:

- Токовой, так как в соответствии с нормами, УЗО должно срабатывать при токе замыкания между  $I_{\Delta n}/2$  и  $I_{\Delta n}$ . На практике, для исключения одновременного срабатывания двух аппаратов, отношение их уставок должно быть не менее 3:  $I_{\Delta n}$  (ввод)  $> 3 I_{\Delta n}$  (фидер),



**Рис.20:** вертикальная селективность.

□ Временной, на случай резкого превышения током замыкания уставок обоих УЗО. При этом нужно учитывать даже малое время реакции механизма, к которому необходимо добавить выдержку времени или специальное замедление.

Двойное условие неотключения  $Da$  в случае замыкания ниже  $Db$ :

$$I\Delta n(Da) > 3 I\Delta n(Db) \quad \text{и} \quad tr(Da) > tr(Db) + tc(Db) \\ \text{или} \quad tr(Da) > tf(Db),$$

где:

- $tr$  – запаздывание отключения = время несрабатывания
- $tc$  – время от момента поступления команды на отключение (от измерительного реле) до момента отключения (включая время гашения дуги),
- $tf$  = время отключения: от момента обнаружения замыкания до момента полного отключения тока замыкания:  $tf = tr + tc$ .

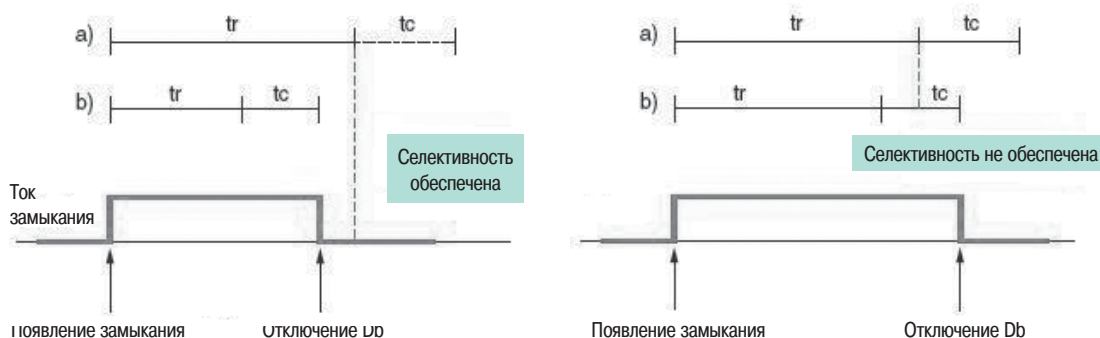
В электронных реле узел обнаружения превышения уставки может обладать явлением «запоминания» замыкания. Поэтому необходимо учитывать «время запоминания»,

приводящее к виртуальному увеличению времени прохождения тока даже после отключения расположенного ниже аппарата.

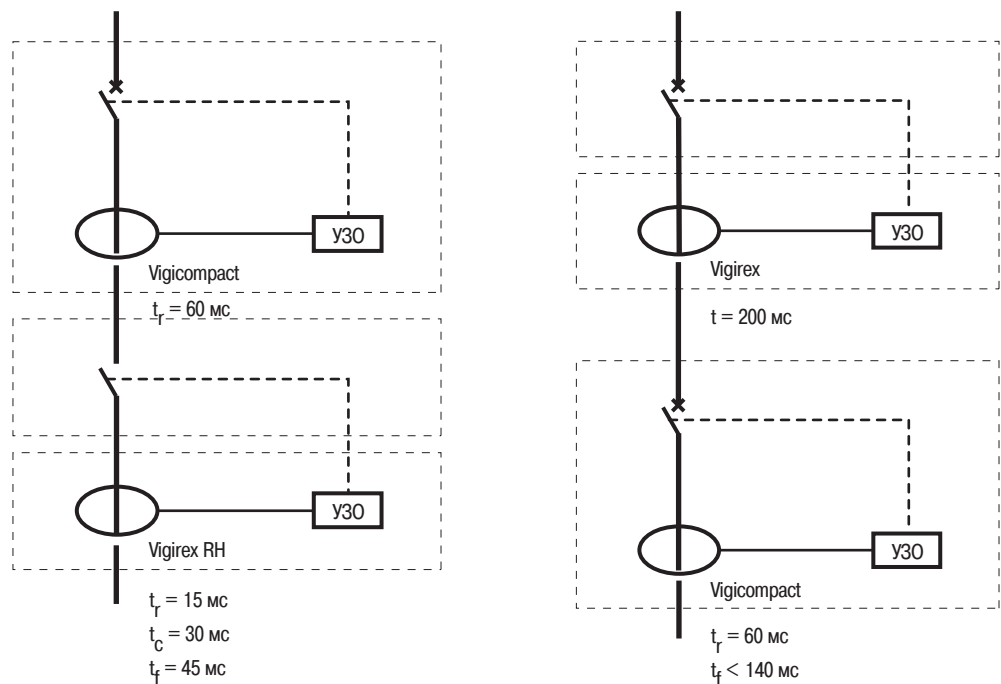
#### Замечание:

Особое внимание следует уделять вопросу селективности, когда приходится совместно использовать дифференциальные выключатели и дифференциальные реле (см. рис.22). В действительности:

- дифференциальный выключатель характеризуется временем запаздывания –  $tr$ ,
- дифференциальное реле характеризуется временем срабатывания собственным или с замедлением (это отрезок времени между появлением замыкания и передачей команды коммутационному аппарату на отключение), к которому нужно добавить время реакции коммутационного аппарата. Таким образом, нужно последовательно рассчитать времена  $tf$  и  $tr$  (при токе  $2 I\Delta n3$  – уровень тока, установленного для измерения времени несрабатывания УЗО с выдержкой времени), для каждого УЗО, поднимаясь от конечных участков сети к точке питания.



**Рис. 21:** замедление вышерасположенного УЗО (a) должно учитывать время запаздывания и время отключения нижерасположенного УЗО (b)



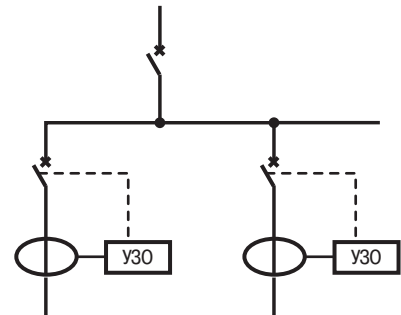
**Рис.22:** два примера временной селективности для сочетаний дифференциального автомата типа Vigicompact и реле Vigirex фирмы Merlin Gerin. Следует отметить, что эти времена значительно ниже допустимых времен, приведенных на рис.9.

#### ■ «Горизонтальная» селективность.

Иногда называемая «выбор целей», предусмотренная стандартом NFC 15-100 § 535.4.2, она позволяет сэкономить УЗО на вводе распределительного шкафа, все отходящие линии которого защищены УЗО.

В случае замыкания отключается единственная линия, на которой произошло повреждение. УЗО, расположенные на других линиях (параллельных поврежденной) не видят этого тока замыкания (см. рис.23).

Все УЗО могут иметь одинаковые времена  $t_r$ .



**Рис. 23:** пример горизонтальной селективности

На практике при горизонтальной селективности могут наблюдаться ложные отключения, называемые «солидарные отключения», особенно в сетях ИТ, имеющих протяженные линии (из-за большой емкости кабелей) или емкостные фильтры (компьютеры, электронные приборы ...). Отключение может произойти на исправной линии, как это показано на рисунке 24.

### Разрядники

В зависимости от местных инструкций электроснабжающей организации УЗО могут быть подключены по ходу энергии выше или ниже разрядника (рис.25). Если УЗО подключено выше разрядника, то оно находится на пути стекания тока, вызванного разрядом молнии и возможно его ложное отключение.

В этом случае рекомендуется использовать УЗО с повышенной стойкостью к импульсному току или с выдержкой времени. Если УЗО подключено ниже разрядника, то оно может иметь стандартное исполнение.

### Токи утечки, вызывающие помехи в работе УЗО

Существует несколько видов токов утечки, способных нарушить работу УЗО:

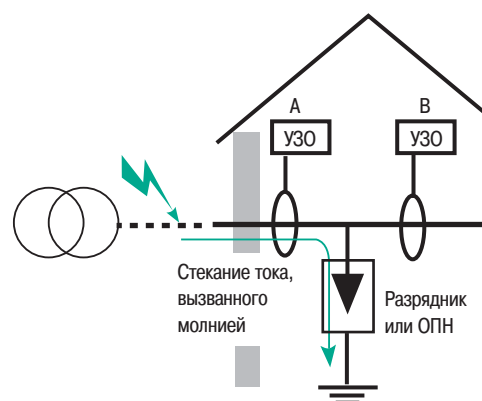
- Токи утечки, имеющие частоту сети,
- Токи утечки, возникающие в переходных режимах,
- Токи утечки высокой частоты.

Эти токи могут быть естественного происхождения, которые циркулируют через распределенные емкости кабелей или быть обусловленными подключением к сети устройств: емкостных фильтров, установленных в питающих цепях электронных приборов (компьютеры, регуляторы скорости...).

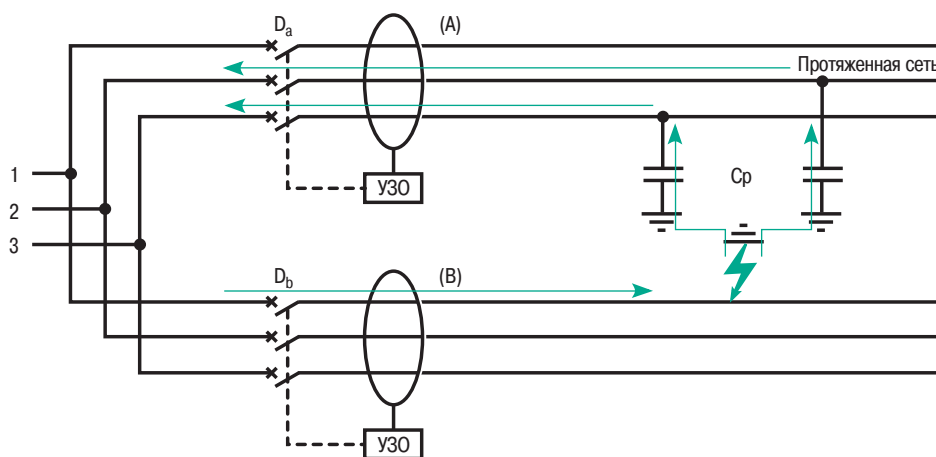
Назначение этих фильтров — обеспечить соответствие электронных приборов обязательным европейским нормам электромагнитной совместимости (ЭМС) по излучению и помехоустойчивости.

### Токи утечки, имеющие частоту сети (50 или 60 Гц)

Эти токи генерируются источником питания и протекают через естественные или подключенные для других целей емкости.



**Рис. 25:** в электроустановке, содержащей в соответствии с местными инструкциями разрядник или ОПН, УЗО может располагаться по-разному: в варианте А — УЗО повышенной стойкости к импульсному току или типа «S», в варианте В — стандартное УЗО.



**Рис.24:** в присутствии замыкания в сети ИТ,  $D_a$  может отключиться вместо  $D_b$

Фоновый ток утечки одиночного однофазного ЭП 50 Гц имеет величину порядка 0,5 - 1,5 мА. Токи утечки складываются, если несколько ЭП подключены к одной фазе. Если они распределены по трем фазам симметрично, то их токи взаимно компенсируются (алгебраическая сумма равна нулю).

Из-за этих токов утечки, количество ЭП, подключенных к одному УЗО должно быть ограничено.

В приложении 3 приведено сравнение токов утечки для разных схем заземления сети (ТТ/ТN или IT), которое показывает, что в сети IT количество ЭП меньше, чем в сетях ТТ или ТN.

Ток срабатывания УЗО может составлять 0,5 I<sub>Δn</sub>, поэтому, чтобы не опасаться ложного отключения, рекомендуется ограничивать фоновый ток утечки величинами 0,3 I<sub>Δn</sub> в сетях ТТ или ТN, и 0,17 I<sub>Δn</sub> в сетях IT.

Использование УЗО с уставкой пониженной чувствительности (от 0,7 I<sub>Δn</sub> до I<sub>Δn</sub>) позволяет сделать эти требования менее строгими.

Такие характеристики имеют УЗО типов «Si» или Vigirex фирмы Merlin Gerin.

#### ■ Токи утечки, возникающие в переходных режимах

Эти токи появляются при подаче напряжения на цепь, имеющую несимметрию емкостей или при возникновении перенапряжения общего типа (см. рис.26).

Например, измерения, произведенные в момент включения рабочей станции, имеющей защитный фильтр, показали следующие характеристики тока утечки:

- Амплитуда первой полуволны: 40 А,
- Частота колебаний: 11,5 кГц,
- Время затухания до 66%: 5 периодов.

Ложного отключения, которое могло бы произойти из-за этих колебаний можно избежать, если УЗО имеет достаточное время несрабатывания. Например: УЗО типа «Si» (I<sub>Δn</sub> = 30 мА и 300 мА), Vigirex и также УЗО типа S (I<sub>Δn</sub> ≥ 300 мА).

#### ■ Токи утечки высокой частоты

Причиной возникновения токов утечки высокой частоты (от нескольких кГц до нескольких МГц) является техника прерывания, используемая в частотных ПРА люминесцентных ламп. При этом в определенных проводниках наблюдаются высокие градиенты напряжения (порядка 1 кВ/мкс), что вызывает большие броски тока через паразитные емкости цепи. Токи утечки от нескольких десятков мА до сотен мА могут протекать, замыкаясь через землю и проходить через датчик тока УЗО, как это показано для случая регулятора скорости на рисунке 27.

В отличие от токов утечки 50-60 Гц, алгебраическая сумма которых равна нулю, токи высокой частоты не синхронизированы в трех фазах и их сумма дает ток утечки, которым нельзя пренебречь.

Чтобы избежать ложных отключений, УЗО должны быть нечувствительны к этим токам (снабжены фильтром, пропускающим лишь низкие частоты). Это промышленные УЗО гаммы Vigirex и УЗО типов «S», «Asi» и «B» фирмы Merlin Gerin.

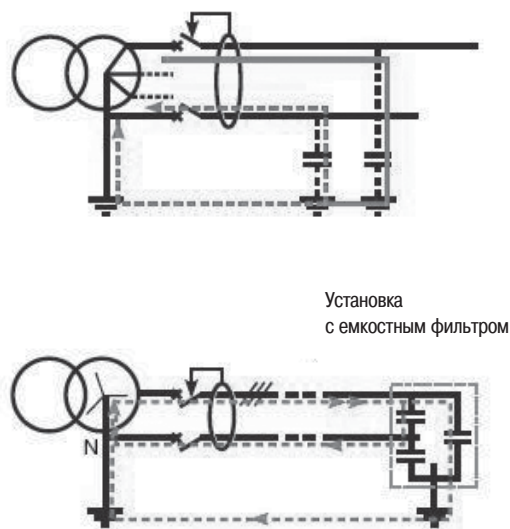


Рис. 26: ток утечки, протекающий через распределенные емкости кабелей или входные конденсаторы установки (пунктирная линия).

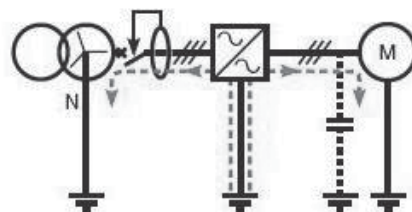


Рис. 27: помехи в работе УЗО, создаваемые токами утечки высокой частоты.



### Регуляторы скорости

Использование УЗО с регуляторами скорости типа «преобразователь частоты» требует повышенного внимания из-за необходимости одновременного учета нескольких ограничивающих факторов:

- ток утечки в момент включения,
- фоновый ток утечки 50-60 Гц,
- фоновый ток утечки высокой частоты,
- особая форма тока замыкания в случае повреждения на выходе регулятора,
- ток, содержащий постоянную составляющую в случае повреждения на шине постоянного тока.

Анализ процессов и технических решений, учитывающих эти факторы подробно приведены в Cahier Technique n 204: Protections BT et variateurs de vitesse.

Смотри также приложение 2: Типы преобразователей и форма токов замыкания.

### Инверторы

В установках, содержащих такие источники резервного питания, как инверторы, при создании защиты следует учитывать возможность различных конфигураций.

В частности: работа с сетью или от батареи, обходной выключатель включен или нет, ...

В примере, изображенном на рисунке 29, установка, выполненная по схеме ТТ, включает источник бесперебойного питания (ИБП). В случае отсутствия напряжения в сети для нормальной работы УЗО необходимо заземлить нейтраль на выходе из ИБП (включить контактор К).

Однако для обеспечения безопасности людей это заземление не является обязательным, так как:

- электроустановка работает теперь по схеме IT и первое замыкание не опасно,
- вероятность появления второго замыкания в течение ограниченного времени работы автономной батареи ИБП очень мала.



Модульная версия



Щитовая версия

Рис. 28: УЗО, оснащенное фильтром токов высокой частоты (Vigirex RH99M и RH99P – марка Merlin Gerin)

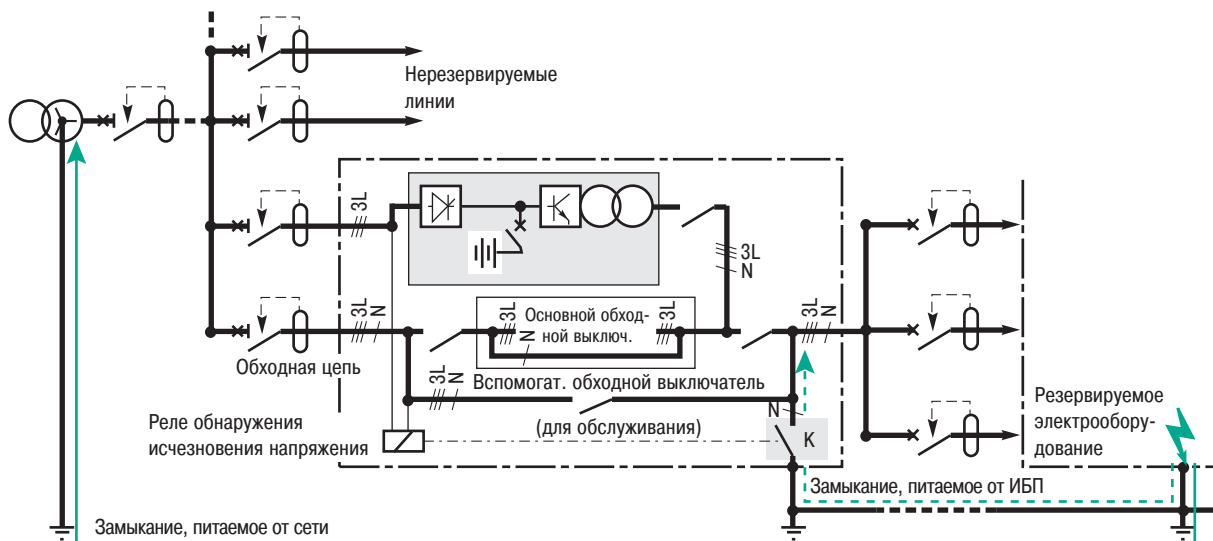


Рис. 29: с момента отключения питания ИБП от сети, контактор К восстанавливает схему ТТ ниже ИБП\*

\* Если корпуса ЭП соединены с нейтралью проводником PE, то включение контактора К создает схему TNS (примечание переводчика)



## 5. Заключение

В настоящее время, когда электричество, как источник энергии, все больше занимает доминирующее положение в жилом секторе, сфере обслуживания и в промышленности, было важно напомнить опасность электрического тока, оценить ее количественно и углубить знания УЗО.

УЗО, как любое техническое устройство, имеет определенные возможности и их пределы. Продолжающие совершенствоваться, эти устройства играют все более важную роль в защите людей и материальных ценностей.

Все промышленно развитые страны в массовом порядке используют УЗО на дифференциальном токе в сетях с различными способами заземления (различными режимами нейтрали) как в промышленности, так и в жилом секторе.

Подводя итог, можно перечислить основные положения из норм и из практики использования.

■ Для защиты от опасности прямого прикосновения УЗО не только полезно, но часто, в соответствии с нормами, является обязательной мерой дополнительной защиты, независимо от системы заземления сети. Это последний рубеж защиты человека.

■ Для защиты от косвенного прикосновения использование УЗО:

- является обязательным в сетях TT,
- необходимо в сетях IT, если имеются несколько отдельных заземляющих устройств,
- должно быть предусмотрено для фидеров большой длины в сетях TN и IT.

■ УЗО участвуют также в защите от:

- пожаров, возникающих по электрическим причинам; они являются единственной эффективной мерой защиты от опасности пожара, вызываемого небольшими токами замыкания на землю при любых системах заземления сетей,
- серьезных повреждений машин в сетях TN.

Современные УЗО продолжают совершенствоваться в направлении повышения надежности и снижения чувствительности к паразитным токам, не связанным с повреждениями изоляции.

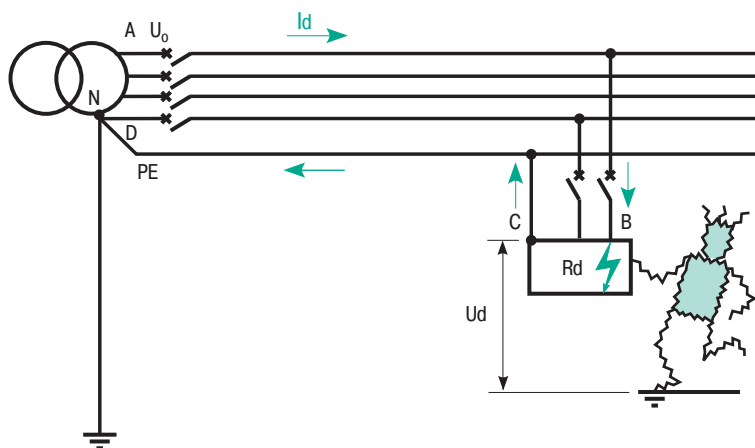
Данный документ, позволяющий лучше изучить УЗО на дифференциальном токе, должен способствовать безопасности.

## Приложение 1: расчет напряжения косвенного прикосновения

Здесь приведены расчеты напряжения косвенного прикосновения в зависимости от типа заземления сети.

Дополнительная информация содержится в СТ № 172: Les schemas des liaison - la terre en BT (regimes de neutre).

Схема TN



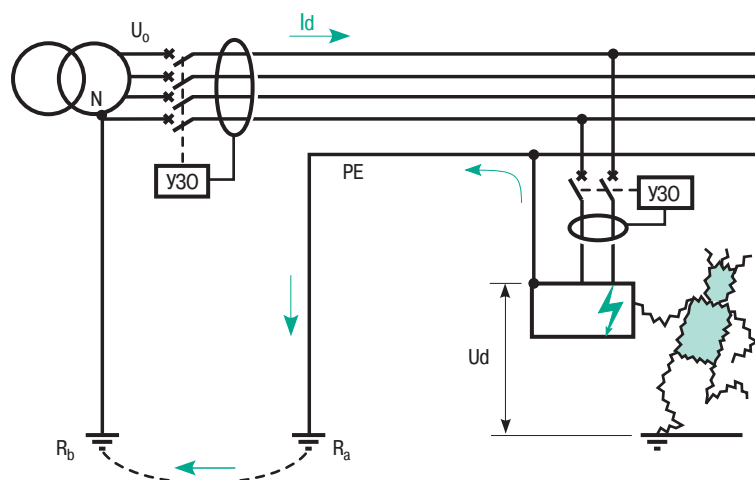
При питании от сети 230/400 В напряжение косвенного прикосновения  $U_d$  (с учетом принятых допущений) составляет 92 В. Это напряжение (превышающее предельное безопасное напряжение  $U_L$ ) является опасным и требует отключения цепи.

Обычно, учитывая величину тока короткого замыкания  $I_d$ , это отключение осуществляется с помощью устройств обнаружения сверхтока.

Если величины сопротивлений  $R_{ph}$  и  $R_{pe}$  велики или неизвестны, защита должна осуществляться с помощью УЗО.

**Рис. 30:** напряжение косвенного прикосновения в сети TN.

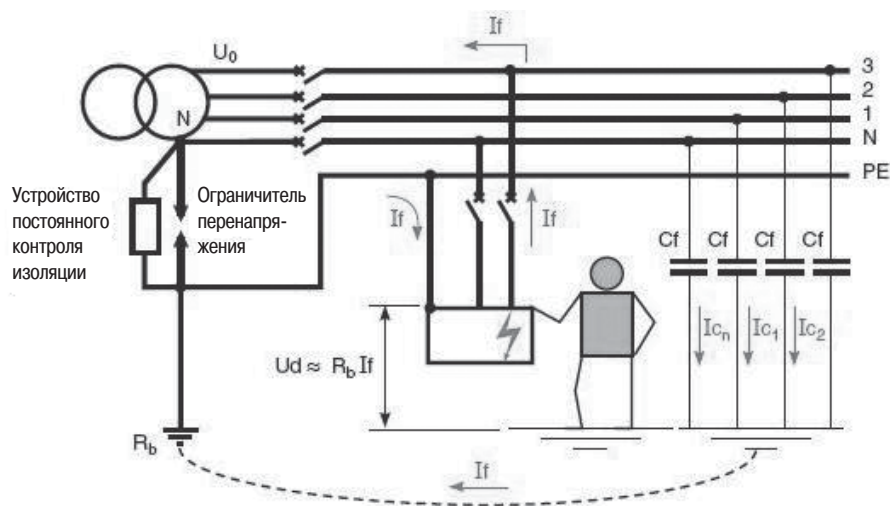
### Схема ТТ



При питании 230/400 В, напряжение косвенного прикосновения составляет примерно 115 В (если  $R_a=R_b$ ). Это напряжение (превышающее предельное безопасное напряжение  $U_L$ ) опасно и требует отключения. При сопротивлениях заземляющих устройств порядка 10 Ом, ток замыкания – примерно 11 А. Отключение цепи обычно не может быть выполнено с помощью устройств обнаружения сверхтока. Поэтому использование УЗО является обязательным.

**Рис. 31:** напряжение косвенного прикосновения в сети ТТ

### Схема IT



Даже при повышенной емкости утечки порядка 1 микрофарады, ток утечки при первом замыкании меньше 0,1 А. Он вызывает неопасное напряжение косвенного прикосновения порядка нескольких вольт. При первом замыкании отключение не является необходимым. При двойном замыкании сеть работает, как TN.

**Рис. 32:** напряжение косвенного прикосновения в сети IT

## Приложение 2: типы преобразователей и форма токов замыкания

Стандарт EN 50178 (Силовая электроника) уточняет типы УЗО, рекомендуемые для использования в комплекте с различными полупроводниковыми преобразователями.

В нем также приведены соответствующие формы токов замыкания.

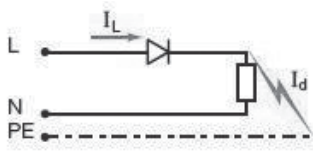
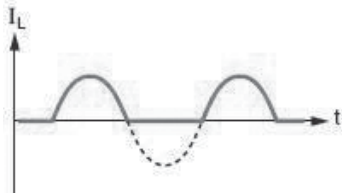
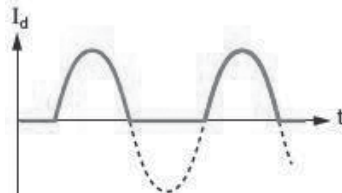
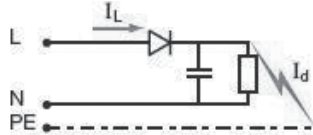
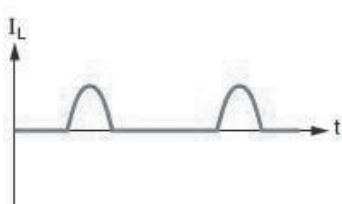
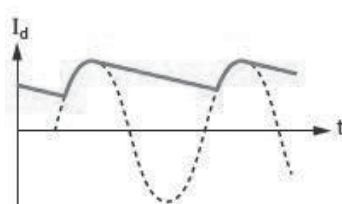
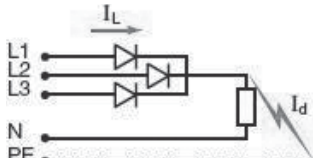
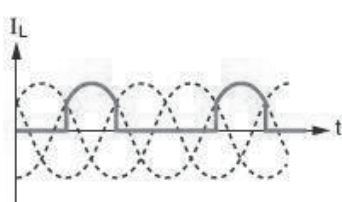
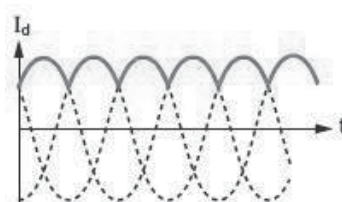
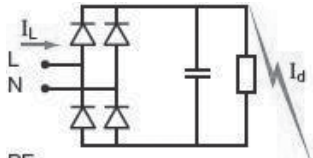
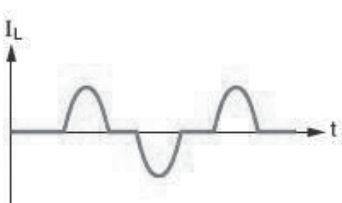
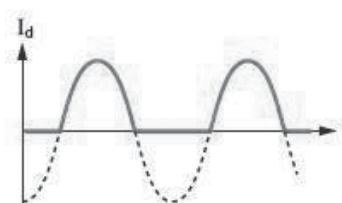
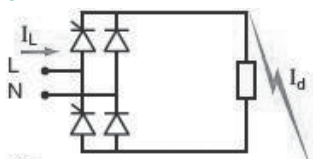
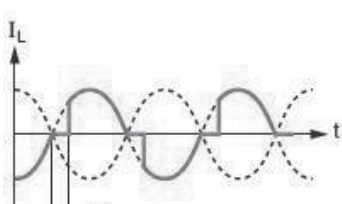
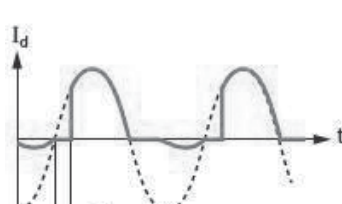
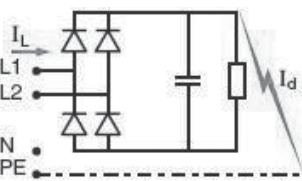
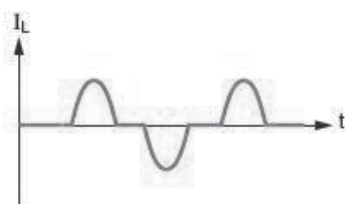
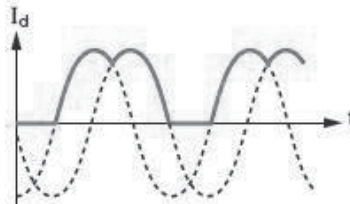
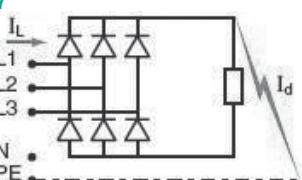
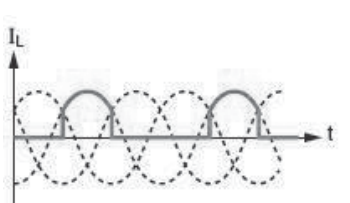
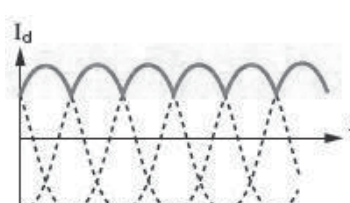
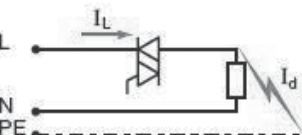
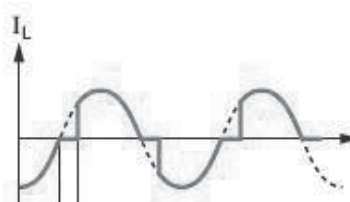
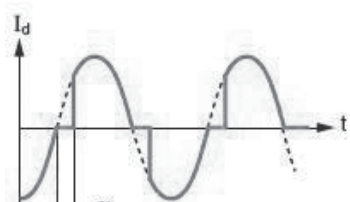
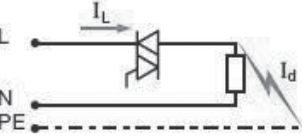
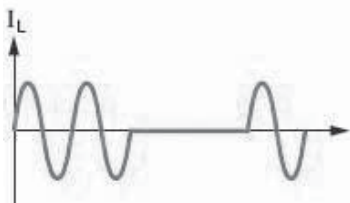
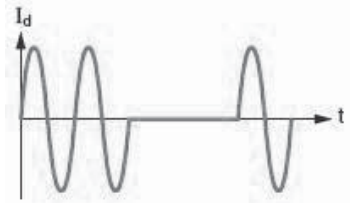
Схема преобразователя	Ток из сети в нормальном режиме	Ток замыкания
<b>1</b>  Однофазная однополупериодная		
<b>2</b>  Однофазная однополупериодная, при наличии ЭДС на зажимах нагрузки		
<b>3</b>  Трехфазная однополупериодная		
<b>4</b>  Однофазная мостовая двухполупериодная		
<b>5</b>  Однофазная смешанная мостовая двухполупериодная		

Рис. 33: ток замыкания в различных схемах полупроводниковых преобразователей (продолжение на следующей странице)

Схема преобразователя	Ток из сети в нормальном режиме	Ток замыкания
<p><b>6</b></p>  <p>Однофазная мостовая двухполупериодная с питанием от линейного напряжения</p>		
<p><b>7</b></p>  <p>Трёхфазная мостовая (шестифазное выпрямление)</p>		
<p><b>8</b></p>  <p>Регулятор мощности переменного тока промышленной частоты с фазовым управлением</p>		
<p><b>9</b></p>  <p>Регулятор мощности переменного тока с широтно-импульсным управлением</p>		

**Рис. 33** (продолжение предыдущей страницы): ток замыкания в различных схемах полупроводниковых преобразователей.

Преобразователи по схемам 8 и 9 должны быть защищены с помощью УЗО типов АС, А или В.

Выпрямители по схемам 1, 4 и 5 должны быть защищены УЗО типов А или В.

Выпрямители по схемам 2, 3, 6 и 7 должны быть защищены УЗО типа В.

#### Примеры ЭП, требующих тип А или В:

■ ЭП с однофазными выпрямителями (схема 4):

□ ЭП с однофазными регуляторами скорости (типа «преобразователь частоты»).

Примеры: насосы, вентиляторы, кондиционеры, подъемники, механизмы для погрузочно-разгрузочных работ, лифты, упаковочные машины, специальные машины (текстиль, обработка, ...).

Номинальная мощность: от 0,37 до 2,2 кВт при напряжении 230 В/50 Гц (при больших мощностях обычно используют трехфазное питание).

Замыкание на корпус возможно при использовании тормозного сопротивления, подключенного к цепи постоянного тока. Внутреннее повреждение изоляции очень маловероятно.

□ Питание цепей постоянного тока

Примеры: сварочные установки, зарядные устройства аккумуляторных батарей, питание электронных устройств (автоматы, регуляторы, телефонные станции, ...) обмотки возбуждения двигателей постоянного тока, обмотки электромагнитов.

Максимальная мощность: 3 кВт (при больших мощностях обычно используют трехфазное питание).

Замечание: В большинстве случаев выпрямители имеют разделительный трансформатор со стороны питающей сети. Поэтому повреждение изоляции между цепью постоянного тока и землей не вызывает никакого замыкания. Это свойство позволяет при необходимости работать с одним полюсом батареи, соединенным, например, с землей.

□ Питание устройств с импульсными стабилизаторами на входе

Примеры: оборудование для информатики, аудио-Hifi, видео ...

■ ЭП с управляемыми однофазными тиристорными выпрямителями по схеме 5.

□ Регуляторы скорости двигателей постоянного тока.

Эта технология активно вытесняется преобразователями частоты, но все еще существует.

Номинальная мощность: <10 кВт.

□ Зарядные устройства для батарей.

Со стороны питания выпрямителя от сети обычно располагается разделительный трансформатор. Поэтому в случае замыкания ниже выпрямителя дифференциальный ток отсутствует.

#### Другие типы электрооборудования с несинусоидальными токами замыкания

■ Преобразователь частоты с однофазным питанием

Входная цепь собрана по схеме 4. Для защиты от замыкания на стороне постоянного тока подходит УЗО типа А.

Форма тока при замыкании на выходе преобразователя приведена на рис.34. Эта форма кривой не описана в действующих стандартах. По заказу МЭК ведутся исследовательские работы в этом направлении. Несмотря на то, что этот ток не соответствует форме кривых, определенных для УЗО типа А, УЗО типа А фирмы Merlin Gerin позволяют обеспечить защиту.

■ Преобразователь частоты с трехфазным питанием.

Входная цепь собрана по схеме 7 и требует использования УЗО типа В.

Форма тока при замыкании на выходе преобразователя приведена на рис.35. УЗО типа В обеспечивает надежную защиту.

Если пренебречь вероятностью замыкания в цепях постоянного тока, то УЗО типа А может подойти, несмотря на то, что ток не соответствует форме кривой, определенной для УЗО типа А.

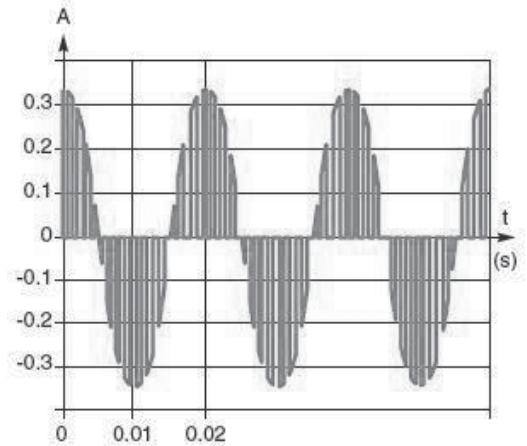


Рис. 34: ток замыкания на выходе однофазного преобразователя частоты

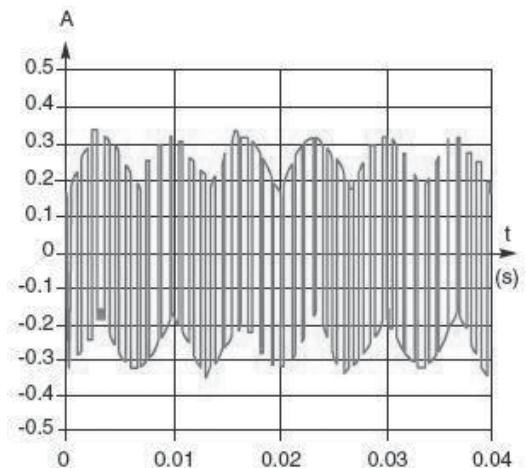


Рис. 35: ток замыкания на выходе трехфазного преобразователя частоты

## Приложение 3: токи утечки в различных схемах заземления

### Различие дифференциальных токов в схемах ТТ/ТN и IT

Рассмотрим упрощенную схему питания ЭП, подключенного между фазой и нейтралью в схеме TN. Между токоведущими проводниками и землей включены емкости  $C$ , служащие для защиты от помех, поступающих из сети.

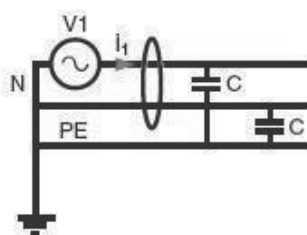


Рис. 36: ЭП подключен к сети TN.

Ток, измеренный УЗО:  $i_1 = V_1 \cdot C \cdot \omega$

Если тот же ЭП подключен между фазой В и нейтралью в сети IT, работающей с первым замыканием в фазе С, то ток, измеренный УЗО будет равен геометрической сумме токов  $i = i_1 + i_2$ . Упрощенная схема этого подключения изображена на рис.37.

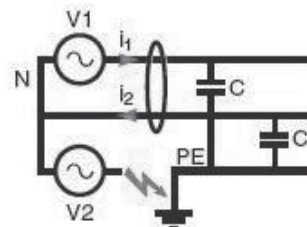


Рис. 37: ЭП подключен к сети IT, работающей с первым замыканием.

Ток, измеренный УЗО:

$$i_T = i_1 - i_2$$

$$\text{где } i_1 = (V_1 - V_2) \cdot C \cdot \omega$$

$$i_2 = V_2 \cdot C \cdot \omega$$

Мы имеем:

$$V_1 = V \cdot \sin \omega t$$

$$V_2 = V \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

Определим  $i_T$ :

$$i_T = i_1 - i_2 = (V_1 - 2V_2) \cdot C \cdot \omega$$

$$i_T = V \cdot C \cdot \omega [\sin \omega t - 2 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})]$$

$$i_T = V \cdot C \cdot \omega [\sin \omega t - 2(\sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} - \sin \frac{2\pi}{3} \cos \omega t)]$$

$$i_T = V \cdot C \cdot \omega (2 \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t)$$

Это выражение можно также записать:

$$i_T = V \cdot C \cdot \omega \cdot 2 \cdot a (\cos \alpha \sin \omega t + \sin \alpha \cos \omega t)$$

$$i_T = V \cdot C \cdot \omega \cdot 2 \cdot a \sin(\omega t + \alpha)$$

с обозначениями:

$$a \cdot \cos \alpha = 1$$

$$a \cdot \sin \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\text{где: } a^2 (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = 1 + \frac{3}{4}$$

$$\text{Принимая во внимание: } a = \frac{\sqrt{7}}{2}$$

$$i_T = V \cdot C \cdot \omega \cdot \sqrt{7} \sin(\omega t + \alpha)$$

Модуль тока утечки в  $\sqrt{7} \approx 2,6$  раза больше в сети IT при первом замыкании, чем в сети TN.

Поэтому существует возможность ложного отключения при первом замыкании в сети IT, что ведет к необходимости уменьшить количество ЭП, присоединенных к одному УЗО, по сравнению с количеством ЭП, разрешенных в сети TN (см. сводную таблицу ниже).

#### **Ограничение количества ЭП, присоединенных к одному УЗО:**

Питание компьютеров:

Макс. количество ЭП на одно УЗО 30 мА si	TT	TN-S	IT
Компьютер*	6	4	2
Рабочая станция**	3	2	1

\*: включает центральный процессор, монитор и лазерный принтер,

\*\*.: включает процессор с расширениями, большой монитор и лазерный принтер.

При ограниченной конфигурации количество ЭП может быть увеличено.

Питание ламп с электронным ПРА:

Максимальное количество балластов на одно УЗО si	TT	TN-S	IT
300 мА	300	220	100
30 мА	30	22	10



## Приложение 4: уставка УЗО в зависимости от напряжения сети

В США определенные розеточные цепи, не имеющие проводника РЕ, защищены при помощи GFCI: «Ground fault circuit interrupter», то есть УЗО на дифференциальном токе. Это определяется статьей 210-8 стандарта NEC, 680-10, 511-10. Если эта защита используется, она встраивается в розетки и имеет чувствительность 5 мА.

Причина(ы) выбора этой чувствительности 5 мА ( $\pm 1$  мА) в этом документе не объяснены, но многие согласующиеся факторы объясняют этот выбор.

Прежде всего нужно заметить, что распределение НН под напряжением 120 В по схеме TNS значительно ограничивает опасность электропоражения. Действительно, в случае металлического замыкания на корпус ЭП, если сопротивление фазного проводника (которое зависит от сечения и длины) эквивалентно сопротивлению обратного проводника (РЕ или металлическая труба), напряжение косвенного прикосновения на поврежденном ЭП будет равно примерно половине фазного, то есть 60 В.

Это напряжение 60 В близко к напряжению 50 В, признанному безопасным (предельное безопасное напряжение UL).

Поэтому разработчик стандарта в США решил, что при параметрах распределения НН в Северной Америке дополнительная защита от прямого прикосновения необходима только в трехфазных сетях 230/400 В, где напряжение косвенного прикосновения вдвое больше. Этим объясняется, почему в США защита от прямого прикосновения не требуется на уровне распределительных пунктов, а требуется только на уровне розеток.

При прямом прикосновении, например к неисправному удлинителю, напряжение прикосновения в США составит 120 В. Сопротивление человеческого тела при напряжении 120 В выше, чем при 230 В и составляет примерно 2200 Ом (среднее значение). Ток через тело человека будет, следовательно, примерно  $120 \text{ В} / 2200 \text{ Ом} = 54,5 \text{ мА}$ . В соответствии с таблицами отключения МЭК УЗО чувствительностью 30 мА при токе 54,5 мА ( $< 2I_{\Delta n}$ ) отключится через 300 мс. Это относительно продолжительное время и человека сильно «потрясет» током, протекающим так долго через его тело.

Для сети 120 В между фазой и нейтралью, выбор чувствительности УЗО 5 мА кажется более подходящим, так как время отключения при том же токе 54,5 мА ( $> 5I_{\Delta n}$ ) составит всего 40 мс.

Отключение произойдет также быстро, как и в случае УЗО 30 мА в сети 230 В.

Чувствительность 5 мА, используемая в США для защиты от прямого прикосновения на уровне розеток таким образом подходит для двухфазной сети TN-S (240 В – межфазное), используемой в США.

В трехфазных сетях с фазным напряжением 230 В для защиты от прямого прикосновения на уровне распределительных щитков и в некоторых случаях – на уровне розеток больше подходит чувствительность 30 мА.

## Библиография

### Справочные документы

- IEC 60364, Electrical installations in buildings
- IEC 60479-1, Effects of current on human beings and livestock - Part 1. General aspects
- IEC 60479-2, Effects of current on human beings and livestock - Part 2. Special aspects
- IEC 60755, General requirements for residual current operated protective devices
- IEC 60947-2, Low-voltage switchgear and controlgear, Part 2. Circuit breakers
- IEC 61008, Residual current operated circuitbreakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCBs)
- IEC 61009, Residual current operated circuitbreakers with integral overcurrent protection for household and similar uses (RCBOs)
- IEC 61200, Electrical installation guide, Part 413. Protection against indirect contact - Automatic disconnection of supply
- EN 50178, Electronic equipment for use in power installations

### Технические тетради Шнейдер Электрик

- Uninterruptible static power supplies and the protection of persons  
J.-N. FIORINA, «Cahier Technique» no. 129

- Development of LV circuit breakers to standard IEC 60947-2  
E. BLANC, «Cahier Technique» no. 150
- Earthing systems in LV LACROIX and R. CALVAS, «Cahier Technique» no. 172 Earthing systems worldwide and evolutions  
B. LACROIX and R. CALVAS, «Cahier Technique» no. 173
- Disturbances in electronic systems and earthing systems  
R. CALVAS, «Cahier Technique» no. 177
- The IT earth system in LV  
F. JULLIEN and I. HERITIER, «Cahier Technique» no. 178
- Cohabitation of high and low currents  
R. CALVAS and J. DELABALLE, «Cahier Technique» no. 187
- LV protection devices and variable speed drives (frequency converters)  
J. SCHONEK and Y. NEBON, «Cahier Technique» no. 204

### Другие публикации

- Electrical installation guide Schneider Electric CITEF



# Schneider Electric в странах СНГ

## Азербайджан

### Баку

AZ 1008, ул. Гарабах, 22  
Тел.: (99412) 496 93 39  
Факс: (99412) 496 22 97

## Беларусь

### Минск

220006, ул. Белорусская, 15, офис 9  
Тел.: (37517) 226 06 74, 227 60 34, 227 60 72

## Казахстан

### Алматы

050050, ул. Табачнозаводская, 20  
Швейцарский центр  
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)  
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

### Астана

010000, ул. Бейбитшилик, 18  
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002», офис 402  
Тел.: (3172) 91 06 69  
Факс: (3172) 91 06 70

### Атырау

060002, ул. Абая, 2 А  
Бизнес-центр «Сутас-С», офис 407  
Тел.: (3122) 32 31 91, 32 66 70  
Факс: (3122) 32 37 54

## Россия

### Волгоград

400089, ул. Профсоюзная, 15, офис 12  
Тел.: (8442) 93 08 41

### Воронеж

394026, пр-т Труда, 65, офис 267  
Тел.: (4732) 39 06 00  
Тел./факс: (4732) 39 06 01

### Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104, офисы 311, 313  
Тел.: (343) 217 63 37  
Факс: (343) 217 63 38

### Иркутск

664047, ул. 1-я Советская, 3 Б, офис 312  
Тел./факс: (3952) 29 00 07, 29 20 43

### Казань

420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7  
Тел./факс: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

### Калининград

236040, Гвардейский пр., 15  
Тел.: (4012) 53 59 53  
Факс: (4012) 57 60 79

### Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268 В, офисы 316, 314  
Тел.: (861) 210 06 38, 210 14 45  
Факс: (861) 210 06 02

### Красноярск

660021, ул. Горького, 3 А, офис 302  
Тел.: (3912) 56 80 95  
Факс: (3912) 56 80 96

### Москва

129281, ул. Енисейская, 37  
Тел.: (495) 797 40 00  
Факс: (495) 797 40 02

### Мурманск

183038, ул. Воровского, 5/23  
Конгресс-отель «Меридиан», офис 739  
Тел.: (8152) 28 86 90  
Факс: (8152) 28 87 30

### Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, этаж 8  
Тел./факс: (831) 278 97 25, 278 97 26

### Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501  
Тел.: (383) 358 54 21  
Тел./факс: (383) 227 62 53

### Пермь

614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11  
Тел./факс: (342) 290 26 11 / 13 / 15

### Ростов-на-Дону

344002, ул. Социалистическая, 74, литера А  
Тел.: (863) 200 17 22, 200 17 23  
Факс: (863) 200 17 24

### Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27  
Тел./факс: (846) 266 41 41, 266 41 11

### Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А  
Тел.: (812) 320 64 64  
Факс: (812) 320 64 63

### Сочи

354008, ул. Виноградная, 20 А, офис 54  
Тел.: (8622) 96 06 01, 96 06 02  
Факс: (8622) 96 06 02

### Уфа

450098, пр-т Октября, 132/3 (бизнес-центр КПД)  
Блок-секция № 3, этаж 9  
Тел.: (347) 279 98 29  
Факс: (347) 279 98 30

### Хабаровск

680000, ул. Муравьева-Амурского, 23, этаж 4  
Тел.: (4212) 30 64 70  
Факс: (4212) 30 46 66

## Туркменистан

### Ашгабат

744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»  
Тел.: (99312) 45 49 40  
Факс: (99312) 45 49 56

## Узбекистан

### Ташкент

100000, пр-т Мустакиллик, 75  
Тел.: (99871) 140 11 33  
Факс: (99871) 140 11 99

## Украина

### Днепропетровск

49000, ул. Глинка, 17, этаж 4  
Тел.: (380567) 90 08 88  
Факс: (380567) 90 09 99

### Донецк

83087, ул. Инженерная, 1 В  
Тел.: (38062) 385 48 45, 385 48 65  
Факс: (38062) 385 49 23

### Киев

03057, ул. Смоленская, 31-33, кор. 29  
Тел.: (38044) 538 14 70  
Факс: (38044) 538 14 71

### Львов

79015, ул. Тургенева, 72, кор. 1  
Тел./факс: (38032) 298 85 85

### Николаев

54030, ул. Никольская, 25  
Бизнес-центр «Александровский», офис 5  
Тел.: (380512) 58 24 67  
Факс: (380512) 58 24 68

### Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213  
Тел.: (38048) 728 65 55  
Факс: (38048) 728 65 35

### Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11  
Тел.: (380652) 44 38 26  
Факс: (380652) 54 81 14

### Харьков

61070, ул. Академика Проскуры, 1  
Бизнес-центр «Telesens», офис 569  
Тел.: (38057) 719 07 79  
Факс: (38057) 719 07 49

## Центр поддержки клиентов

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)  
Тел.: (495) 797 32 32, факс: (495) 797 40 04  
ru.csc@ru.schneider-electric.com  
www.schneider-electric.ru