

Перенапряжения на линии обратного тока

В обратном проводе системы тягового электроснабжения постоянного тока возникают напряжения при аварийных режимах, коммутационных процессах и атмосферных разрядах. Их следует учитывать, решая задачи обеспечения безопасности персонала и защиты оборудования. Необходимо конкретизировать задачи по обеспечению безопасности персонала в зоне пути и создавать предпосылки для выбора устройств, наиболее пригодных для решения тех или иных задач в области защиты, и определения области их применения.

В рельсах, образующих линию обратного тока, могут возникать напряжения, медленно изменяющиеся при колебаниях эксплуатационной нагрузки, а также кратковременные перенапряжения при коротких замыканиях на землю и ударах молнии в соседние заземленные токопроводящие объекты. Эти напряжения, распределяющиеся вдоль линии, называют рельсовым потенциалом. Для обеспечения защиты персонала необходимо, чтобы величина этого потенциала не превышала предельно допустимых значений. Кроме того, рельсовый потенциал не должен вызывать повреждений в соседних электрических устройствах. Эта проблема решается распределением вдоль

пути защитных устройств в виде различных установок и сооружений (рис. 1).

Существует две принципиальные возможности обеспечения защиты персонала. Первая состоит в том, чтобы ходовые рельсы временно соединять с соседними заземленными устройствами с целью выравнивания рельсового потенциала, если его величина достигнет установленного предельного значения. В этом случае движение поездов не прерывается. Вторая возможность основывается на принципе отключения, как это практикуется при эксплуатации низковольтного бытового электрооборудования. При этом нарушается нормальный эксплуатационный процесс. Обе воз-

можности используются в различных ситуациях. Выравнивание потенциала осуществляется при медленно изменяющейся величине напряжения в режиме нормальной эксплуатации, а отключение — при коротких замыканиях контактного провода на рельсы или на землю (элементы конструкций контактной сети или токоприемника).

Защита устройств и элементов оборудования осуществляется в большинстве случаев с помощью схем или аппаратов, ликвидирующих перенапряжение. В частности, это могут быть металлооксидные разрядники, устанавливаемые вдоль линии или непосредственно у защищаемого оборудования.

Линии обратного тока в тяговых системах постоянного и переменного тока

При выборе защиты от перенапряжений необходимо учитывать вид системы тягового тока. В обычных системах постоянного и переменного тока обратный ток в основном протекает через рельсы. На обычных линиях переменного тока рельсы (рис. 2) соединены с проходящим вдоль линии заземляющим проводом. Благодаря этому удается избежать возникновения разницы потенциалов в зоне пути и снизить потенциал рельса за счет переходного сопротивления заземляющего провода.

На линиях, электрифицированных по системе постоянного тока, такое выравнивание потенциала неприемлемо, так как здесь рельсы должны быть уложены с максимально возможным сопротивлением относительно земли. Благодаря этому обратный ток в идеальном случае не ответвляется в грунт. Такие ответвляющиеся или блуждающие токи в местах перетекания тока из рельсов в грунт вызывают электролитическую коррозию рельсов. Это ведет к уносу металла из подошвы рельса, а также из арматуры прилегающих железобетонных конструкций.

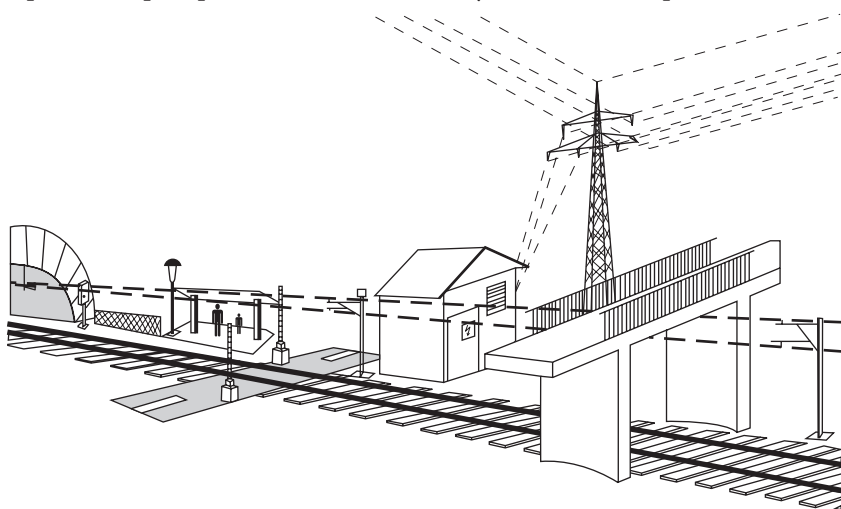


Рис. 1. Примеры защитных устройств вдоль линии, электрифицированной по системе постоянного тока, с мостами, тоннелями, техническими зданиями, подстанциями, устройствами низкого напряжения, остановочными пунктами, переездами и сигналами

бетонных конструкций, трубопроводов и стальной броневой ленты силовых кабелей.

Блуждающие токи линий постоянного тока

Режим нормальной эксплуатации

Обратный ток, протекающий по рельсам, создает в них падение напряжения. В связи с тем что рельсы изолированы относительно земли, возникает потенциал рельсов относительно земли и заземленных устройств. К ним относятся стационарные здания и сооружения, тоннели и путепроводы.

Потенциал рельсов изменяется во времени в зависимости от поездной нагрузки и определяется следующими факторами:

- суммарным током нагрузки всех поездов на линии, находящихся в режимах тяги и рекуперативного торможения, иными словами, он зависит от графика движения;
- длиной фидерных зон и распределением тяговых подстанций вдоль линии;
- концепцией питания (односторонним или двусторонним питанием фидерной зоны);
- продольным сопротивлением линии обратного тока, которое складывается из сопротивлений рельсов, присоединенных к ним конструкций и дополнительных обратных проводов;
- продольными рельсовыми соединителями;
- наличием мест со сниженной изоляцией рельсов относительно земли.

Повышенный потенциал рельсов в режиме нормальной эксплуатации возникает в основном в случае одновременного трогания или рекуперативного торможения нескольких поездов.

Короткое замыкание и замыкание на землю

Коротким замыканием называют соединение между контактным проводом и линией обратного тока.

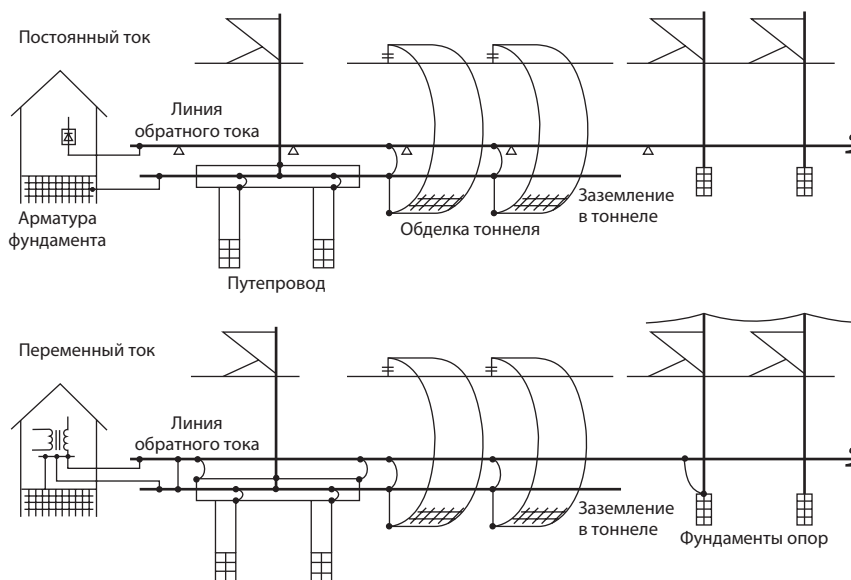


Рис. 2. Различия в устройстве линий обратного тока тяговых систем постоянного и переменного тока

Оно сопровождается протеканием больших токов и обычно приводит к отключению защиты дефектного участка в течение отрезка времени, не превышающего 40 мс.

Замыкание на землю — это соединение между контактным проводом и заземленным элементом оборудования, которое электрически не связано с линией обратного тока. При таких замыканиях токи обычно значительно меньше, чем при коротком замыкании. В этом случае не происходит срабатывания защит контактной сети, реагирующих на токовую перегрузку. Такого рода замыкания обычно происходят на заземляющие устройства в тоннелях и на путепроводах, на опоры контактной сети и опорные устройства контактной сети в тоннелях, на киоски с оборудованием, токопроводящие барьеры и ограждения.

Атмосферные и коммутационные перенапряжения

Атмосферные перенапряжения возникают при прямых или непрямых попаданиях молнии на оборудование. Атмосферные перенапряжения в устройствах контактной сети отводятся в землю или на ходовые рельсы в случае перекры-

тия изоляторов или при срабатывании разрядников, воздействуя таким образом на линию обратного тока электрифицированного пути. Иначе действует не прямое попадание молнии в путь. В случае если рельсошпальная решетка хорошо изолирована от земли, перенапряжения, возникшие под действием молнии, распространяются вдоль пути в виде волн блуждающих токов.

Коммутационные перенапряжения в ходовых рельсах возникают в основном при отключении токов перегрузки или короткого замыкания.

Примеры возникновения потенциала рельсов на линиях, электрифицированных по системе постоянного тока

Рельсовый потенциал можно измерять без перерыва в движении поездов и при различных токовых нагрузках. При проектировании систем электрификации линий необходимо предварительно оценивать величину этого потенциала с учетом ожидаемой загруженности линии. Обычно это выполняют с помощью математического моделирования движения на линии

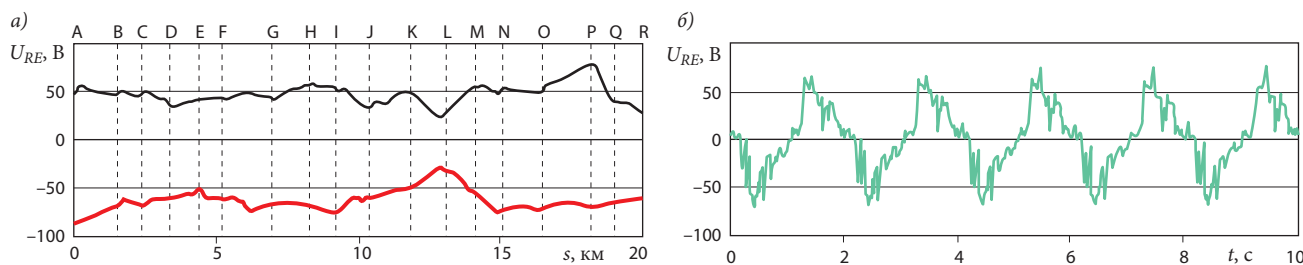


Рис. 3. Рельсовый потенциал на линии метрополитена в Бангкоке:

а — огибающие кривые экстремумов потенциала рельсов вдоль линии от станции А до станции R; б — изменение во времени рельсового потенциала на станции P; s — путь; t — время

на базе планируемого графика движения поездов. На рис. 3, а показаны огибающие кривые экстремальных значений рельсового потенциала U_{RE} вдоль линии метрополитена в Бангкоке, где движение поездов осуществляется по тактовому графику с интервалом 2 мин. На рис. 3, б показано изменение рельсового потенциала во времени в зоне одной из станций метрополитена.

Короткое замыкание на линии ведет к кратковременному увеличению потенциала рельсов до значений, значительно более высоких, чем в режиме нормальной эксплуатации. На рис. 4 показаны процессы, происходящие при коротком замыкании на линии трамвая, получающей питание напряжением 850 В постоянного тока.

Нормы и правила, классификация линий

Учитывать перенапряжения в рельсах необходимо прежде всего для защиты людей от поражения электрическим током. В то же время требуется также защита устройств, расположенных в зоне пути. Величины нормального рабочего напряжения в контактной сети, а также минимального и максимального определены в стандарте EN 50163. Допустимые величины напряжения на линии обратного тока не зависят от уровня напряжения в контактной сети и определяются нормами лишь с позиции защиты людей и оборудования.

Величины допустимых напряжений с точки зрения защиты людей от рельсового потенциала нормированы стандартом EN 50122 – 1.

Они распространяются на зоны пути, станций, тяговых подстанций и технических зданий. В зависимости от времени действия допустимое напряжение прикосновения может находиться в интервале между 120 и 940 В (рис. 5). Перенапряжения по своей длительности подразделяются на три категории:

- долговременные (для нормального процесса эксплуатации), длительность измеряется в минутах;
- кратковременные (для неисправностей на линии или на тяговых подстанциях), длительность 20 – 200 мс;
- атмосферные и коммутационные, длительность менее 20 мс.

Для величины потенциала рельсов, определяемой с точки зрения защиты технических устройств, специальных норм не существует. Здесь исходят из основного правила, заключающегося в том, что под-

ключаемые устройства должны соответствовать стандартам, по которым они изготавливались. В этих стандартах нормируется величина напряжения, на которое указанные устройства рассчитаны.

На линиях, электрифицированных по системе постоянного тока, осуществляются перевозки различных видов. Спектр линий распространяется от трамвайных и пригородных средней мощности до мощных сетей метрополитена и магистральных линий. При этом различают рельсовые потенциалы и токи нормального и аварийного режимов. Потенциал рельсов зависит также от изоляции рельсов, т.е. от способа и качества укладки, а также влияния таких факторов, как влажность и загрязненность.

Контроль рельсового потенциала включает в себя также обязательный уход и проверку заземляющих устройств. В тоннелях метрополитена и на мостах или путепроводах заземляющие устройства проходят вдоль всей линии и называются сквозным заземлением. Это значит, что параллельно линии обратного тока проходит определенный низкоомный тракт, который при наличии большого числа соединителей рельс — земля забирает на себя значительную долю обратного тока как в нормальном режиме, так и при коротком замыкании. Кроме того, замыкания на землю контактной сети приводят к сдвигу напряжений в рельсах в сторону отрицательных значений. При этом в связи с изолированностью пути относительно земли вдоль всей линии происходит снижение напряжения рельсов.

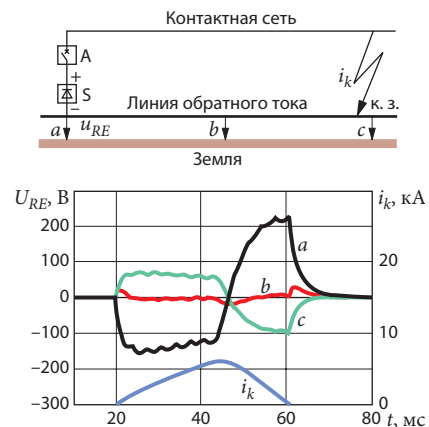


Рис. 4. Рельсовый потенциал U_{RE} при коротком замыкании на линии трамвая: а — у тяговой подстанции; б — в середине участка; с — в точке короткого замыкания; i_k — ток короткого замыкания; А — автоматический быстродействующий выключатель; S — выпрямитель на тяговой подстанции

В системе трамвая и на магистральных линиях тяговые подстанции и станционные сооружения имеют независимые индивидуальные контуры заземления, связанные с арматурой фундаментов этих зданий. Соединения рельс — земля из-за сопротивления растеканию этих контуров берут на себя меньшую долю обратного тока, чем в случае сквозного заземления.

Защита от перенапряжений

Мероприятия по защите от перенапряжений подразделяются на три вида, зависящих от способа действия защиты. К ним предъявляются определенные требования и предписывается использование определенных групп устройств. В некоторых случаях отдельные устройства выполняют сразу несколько защитных функций, что положительно отражается на капитальных затратах. Необходимые защитные функции всегда должны отражаться в предъявляемых к ним требованиях, чтобы можно было обеспечить необходимое равновесие между эффективностью защиты, затратами на устройства защиты и расходами на их техническое обслуживание.

Для выбора устройств защиты необходимо прежде всего определить, какие именно причины из рассмотренных ранее обуславливают повышенные рельсовые потенциалы.

Защита людей при нормальной эксплуатации и коротких замыканиях (функция А)

Основное действие защитных устройств состоит в том, что они временно выравнивают разность потенциалов между местом, где находится человек, и линией обратного тока. После того как опасность поражения человека устраняется, устройство должно возвратиться в исходное положение. При этом к нему предъявляются следующие требования:

- величина напряжения срабатывания защиты предписывается стандартом EN 50122 – 1;

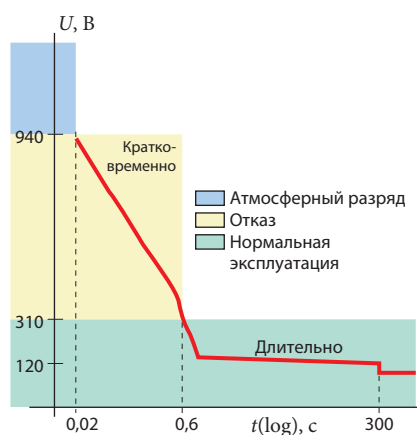


Рис. 5. Нормы допустимых напряжений на рельсах линий, электрифицированных по системе постоянного тока:

U — напряжение; t — время (шкала логарифмическая)

- токовая нагрузка устройства определяется тяговой нагрузкой линии;
- в связи с возможностью повреждения цепей защиты блуждающими токами необходимы контроль способности защиты к возврату в исходное положение и сигнализация о потере этой способности.

В случае короткого замыкания на линии срабатывает соответствующий фидерный быстродействующий выключатель на тяговой подстанции, отключающий напряжение контактной сети, поэтому возможные небольшие задержки срабатывания защиты от рельсового потенциала допустимы.

Защита людей при замыкании на землю (функция В)

При замыкании контактной сети на землю в большинстве случаев не происходит отключения напряжения на дефектном участке. При замыкании на землю ток может быть настолько малым, что соответствующая конструкция или корпус элемента оборудования в состоянии выдержать напряжение контактной сети, и защита фидера или иного объекта не срабатывает. Соответствующий элемент защиты должен обеспечить такую ситуацию, при которой возникает непосредственное короткое замыкание на рельсы, вызывающее срабатывание быстродействующего

выключателя на тяговой подстанции. При этом в течение интервала времени между моментом соединения защищаемого объекта с линией обратного тока и срабатыванием выключателя на подстанции напряжение рельса или корпуса элемента оборудования достигает значений, характерных для режима короткого замыкания на линии, если защищаемый объект не заземлен проводником с достаточно низким сопротивлением. В связи с этим быстрое отключение является необходимым и обязательным. К защите людей при замыкании на землю предъявляются следующие требования:

- величина напряжения срабатывания предписывается стандартом EN 50122 - 1;
- необходимо низкоомное заземление объекта, обеспечивающее срабатывание быстродействующего выключателя на подстанции;
- нагрузочная способность устройства защиты должна соответствовать величине тока короткого замыкания контактной сети в месте установки устройства. При этом следует обращать внимание на то, чтобы защита на тяговой подстанции имела задержку на срабатывание;
- для этой защиты также необходимы контроль способности возврата в исходное состояние и сигнализация о потере такой способности.

Защита устройств и оборудования (функция С)

Устройства и оборудование защищают от кратковременных перенапряжений. Защитные мероприятия предотвращают повреждения при ударах молнии или коммутационных перенапряжениях, что, с одной стороны, уменьшает материальные потери, вызванные повреждениями, а с другой — повышает эксплуатационную готовность оборудования. На линиях, электрифицированных по системе постоянного тока, для защиты от перенапряжений в основном используются металлооксидные раз-

рядники. Такие устройства должны обеспечивать:

- защиту от атмосферных разрядов;
- возможность возврата в исходное положение или сигнализацию о потере такой возможности.

Применение устройств защиты по потребности

Классификация устройств защиты

Защитные устройства применяемых классов должны обеспечивать потребность в защите от перенапряжений всех видов, рассмотренных ранее. Возможны несколько видов исполнения этих устройств.

Силовые выключатели, управляемые сигналом, формируемым электронной схемой в зависимости от уровня напряжения, оборудуются схемой, позволяющей при недопустимом повышении напряжения автоматически параллельно подключать дополнительный выключатель. Благодаря этому увеличивается нагрузочная способность цепи, сохраняющаяся в течение большего времени, чем при обычной схеме. При этом стандар-

том EN 50122-1 предписывается такой характер кривой, отображающей зависимость напряжения от времени $U(t)$, при котором в случае кратковременного повышения напряжения допускается увеличение рельсового потенциала. В соответствии с указанным стандартом исходная схема должна восстанавливаться через 10 с.

Электронный выключатель на базе силовых вентилях имеет жестко устанавливаемый порог срабатывания и время отключения менее одной миллисекунды. Такие выключатели используют для ограничения потенциала рельса в режиме нормальной эксплуатации и при коротком замыкании. Нагрузочная способность таких выключателей ограничена потерями в вентилях. При замыкании на землю электронный выключатель обеспечивает такую проводимость цепи, при которой защита на подстанции срабатывает и отключает место аварии. В определенной степени эти выключатели могут также снизить ущерб от ударов молнии.

Пробивные предохранители при замыкании контактного провода на землю служат для увеличения проводимости цепи коротко-

го замыкания. После срабатывания они остаются в проводящем состоянии и подлежат замене. Некоторые из них после кратковременных перенапряжений могут восстанавливать свои изолирующие и защитные свойства.

В соответствии с инструкцией VDV 525 металлооксидные разрядники A2 должны использоваться для защиты устройств от атмосферных перенапряжений. При перенапряжении они становятся проводящими и выполняют, таким образом, функции пробивных предохранителей, хотя они не предназначены для этого. В системах защиты могут комбинироваться защитные устройства разных классов. При этом диапазон защитных функций расширяется (таблица).

На практике для выполнения защитных функций в зоне пути линий, электрифицированных по системе постоянного тока, применяют три типа устройств:

- пробивные предохранители;
- электронные выключатели;
- комбинации из контакторов и электронных выключателей, обозначаемые в европейском стандарте EN 50122-1 как Short Circuiting Device (SCD).

Металлооксидные разрядники являются стандартными устройствами, применение которых предписывается инструкцией VDV 525 для защиты от перенапряжений контактной сети линий, электрифицированных на постоянном токе, подключенных к ней устройств, а также распределительных устройств тяговых подстанций. В специальном исполнении A2 они применяются для защиты от перенапряжений на рельсах.

На рис. 6 приведены примеры мест, где устанавливаются защитные устройства, и показаны выполняемые ими функции. Система с индивидуальными контурами заземления, применяемая в трамвайных сетях тягового электроснабжения, показана на рис. 6, а.

Токопроводящие конструкции в зоне контактной сети и токопри-

Устройства защиты от перенапряжений в зоне рельсов

Тип защиты	Режим			
	Нормальная эксплуатация	Короткое замыкание	Замыкание на землю	Атмосферный разряд
Силовой контактор (S)	Возврат в исходное состояние		–	–
Электронный выключатель (ES)	Возврат в исходное состояние ²	Возврат в исходное состояние ^{1,2}	Возврат в исходное состояние ¹	Возврат в исходное состояние
Пробивной предохранитель (SDS)	Обеспечение постоянной проводимости ³	Возврат в исходное состояние ¹	Обеспечение постоянной проводимости	Возврат в исходное состояние ¹
Разрядник (A2)	–	–	Обеспечение постоянной проводимости ⁴	Возврат в исходное состояние
Комбинации:				
S + ES	Возврат в исходное состояние			
S + SDS	Возврат в исходное состояние		Обеспечение постоянной проводимости	Возврат в исходное состояние ¹
S + A2				

¹ При перенапряжении создается постоянное соединение в цепи замыкания. Требуется замена.
² Ограниченная нагрузочная способность по току при замыкании на землю.
³ Рекомендуется только при редких срабатываниях, после которых требуется замена.
⁴ При срабатывании обеспечивает надежное короткое замыкание.

емника, например металлические ограды большой протяженности, подключаются к линии обратного тока через пробивной предохранитель, чтобы при замыкании контактной сети на землю быстрее происходило защитное отключение поврежденного участка. Пробивное напряжение этого предохранителя выбирается в соответствии с величиной рельсового потенциала, измеренного в режиме нормальной эксплуатации. На линиях трамвая с небольшой токовой нагрузкой используют пробивные предохранители с напряжением срабатывания 120 В. Однако в связи с тем, что возникающие перенапряжения могут носить кратковременный характер, на сетях напряжением 750 В постоянного тока можно применять предохранители с более высоким пробивным напряжением, а именно 230 и 350 В. Это позволяет избежать слишком частых отключений линии, вызываемых кратковременными случайными перенапряжениями. Данное положение действует для остановочных пунктов трамвая, где в соответствии с инструкцией VDV 507 реализуют другие защитные мероприятия.

В тех случаях, когда в эксплуатации ожидается величина рельсового потенциала 120 В и более, рекомендуется в зоне станций устанавливать электронные выключатели или их комбинации с электромеханическими контакторами. На линии обратного тока должны быть предусмотрены мероприятия по защите людей в случае замыкания элементов контактной сети на землю. Если ожидается, что в аварийных режимах рельсовый потенциал может достигать 120 В, в качестве минимальной защитной меры могут быть использованы пробивной предохранитель или электронный выключатель. Однако, если не исключается возможность увеличения рельсового потенциала до 120 В и в нормальном режиме эксплуатации, рекомендуется электронный выключатель или его комбинация с электромеханическим контактором.

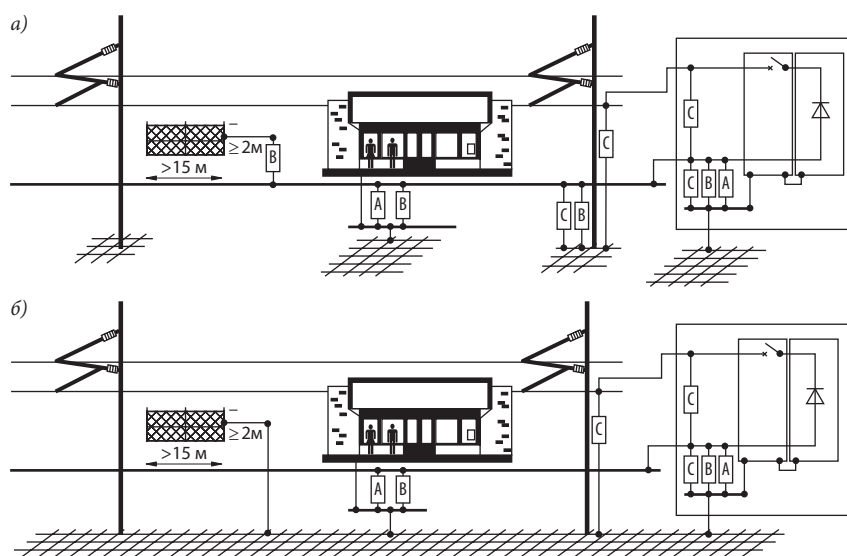


Рис. 6. Виды и функции защит, применяемых в тяговых сетях постоянного тока: а — система с индивидуальными контурами заземления; б — система со сквозным заземлением; А — защита людей в режиме нормальной эксплуатации и при коротком замыкании; В — защита людей при замыкании на землю; С — защита устройств и оборудования

На рис. 6, б показана система со сквозным заземляющим устройством, используемым, например, в тоннелях, на путепроводах или эстакадах из железобетона. Контур заземления тяговой подстанции соединяется с указанным сквозным заземлением линии. Проводящие элементы контактной сети, не находящиеся под напряжением (опоры, арматура и пр.), и конструкции, расположенные в зоне прохождения токоприемника, также соединяют со сквозным заземлением. Это же относится и к контурам заземления опор на линиях первичного электроснабжения. Устройства защиты от перенапряжений монтируют на ближайших тяговых подстанциях или станциях.

В случае применения сквозных устройств заземления на станциях обычно устанавливают комбинированные устройства защиты, состоящие из электронных выключателей и электромеханических силовых контакторов, так как эта комбинация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к устройствам защиты, после срабатывания возвращается в исходное положение, а следовательно, требует минимальных эксплуатационных затрат. Хотя суммарные за-

траты на изготовление обоих компонентов выше, чем у пробивных предохранителей или электронных выключателей, тем не менее такой комбинации отдадут предпочтение. Это объясняется большим числом дополнительных функций, которые комбинированное устройство выполняет, а именно:

- выдает сообщение о величине потенциала;
- постоянно контролирует его величину;
- обеспечивает необходимые коммуникационные соединения;
- вызывает принудительное отключение участка в соответствии со стандартом EN 50122-1;
- формирует точную характеристику допустимого напряжения прикосновения в краткосрочном и продолжительном режимах.

Если тяговая подстанция расположена близко к станции, то устройства защиты монтируют только на одном из этих объектов. В случае защиты от атмосферных перенапряжений это упрощение не допускается, так как в данном случае защищаемая область имеет всего несколько метров.