

Транспорт

УДК 621.316.925:621.332.31

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-27-38

П.С. Пинчуков, С.И. Макашѳва, А.П. Костин

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Выполнен анализ путей протекания токов короткого замыкания при различных типах заземления опор контактной сети переменного тока. Проведена оценка степени влияния переходного сопротивления, возникающего в момент короткого замыкания на условия срабатывания дистанционной защиты.

Выявлена наиболее вероятная причина отсутствия срабатывания дистанционной защиты в

случае замыкания на разземленных опорах контактной сети. Выделены факторы, затрудняющие работу устройств релейной защиты и вызывающие неправильную работу устройств релейной защиты тяговой сети переменного тока.

Ключевые слова: система, тяговое электропитание, релейная защита, переменный ток, тяговое движение, короткое замыкание, переходное сопротивление.

P.S. Pinchukov, S.I. Makashyova, A.P. Kostin

COMPLEX ESTIMATE OF RELAY PROTECTION OPERATION OF AC TRACTION CIRCUIT

The conditions of RZA device operation at different earth methods of contact system masts are under analysis. The analysis of the ways of SC current behavior at different methods of contact system mast grounding is carried out, the factors influencing the scenarios of development and circuit parameters of SC are emphasized.

The investigation object is an operating area of the railway located in the far East of Russia, and investigation subjects are its devices of relay protection of the contact system feeders. There are used methods of a structured observation and statistical analysis of in-situ resistance measurement results of contact system masts and parameters measured with protection, a simulation method of traction power supply system, method of data visualization on a complex plane.

There is carried out a type classification of contact system mast earth, the analysis of short circuit current behavior at different earth types of ac contact system mast is fulfilled, the estimate of the impact degree of transient resistance arising at the moment of short circuit under conditions of remote protection operation is carried out.

The most probable reason of remote protection

non-operation in case of short circuit on non-earthed contact system masts is revealed. On the basis of the results obtained in the course of full-scale measurement there is compiled a diagram of a share distribution of contact system masts with the different value of active resistance. It is determined that the overwhelming majority of contact system masts have less 20 kOhm active resistance, but there is marked the presence of contact system masts with a high value of active resistance that is evidence of unintentional un-earth which worsens deeply the operation of relay protection devices. According to the results of the investigations carried out there is offered a method of data visualization on a complex plane on the basis of the results of the modeling of traction power supply system parameters and in-situ measurements which allows approaching in a complex way to the solution of the problem in relay protection device operation stability increase under conditions of heavy-freight motion intensity and volume increase.

Key words: system, traction power supply, relay protection, alternating current, heavy-freight motion, short circuit, transient resistance.

Введение

Релейная защита (РЗ) тяговой сети электрифицированных железных дорог предназначена для быстрого выявления аварийного режима при появлении различных повреждений с последующим от-

ключением поврежденного участка и отделением поврежденных элементов от оставшейся неповрежденной части системы электроснабжения. Это означает, что работа релейной защиты проявляется в

своевременном и четком реагировании на возникающую аварийную ситуацию с целью обеспечения безопасной работы всей системы электроснабжения. Таким образом, главной задачей системы РЗ является срабатывание её устройств во время аварийных событий в пределах защищаемой ими зоны и своевременное отключение поврежденного участка [1].

В настоящее время на железных дорогах Российской Федерации для защиты фидеров контактной сети широко используется устройства дистанционной защиты (ДЗ), принцип действия которой основан на измерении и вычислении отношения напряжения и силы тока, протекающего в защищаемой линии. Это отношение является критерием для срабатывания реле сопротивления – измерительного порогового элемента ДЗ. Величина отношения напряжения и силы тока защищаемого фидера пропорциональна расстоянию от места установки устройства ДЗ до места повреждения [1- 6].

Полное сопротивление цепи короткого замыкания, измеряемое реле сопротивления ДЗ, включает в себя сопротивление системы электроснабжения в виде сопротивления источника питания и сопротивления линий внешнего электроснабжения, сопротивление тяговых подстанций и сопротивление тяговой сети. Полное сопротивление тяговой сети складывается из сопротивлений контактных проводов, сопротивления несущего троса и сопротивления опор контактной сети сопротивления рель-

Цели и задачи исследования

Современные типы релейной защиты обеспечивают надежное отключение контактной сети при аварийной работе наглухо заземленных опор. Тем не менее, опыт эксплуатации ДЗ свидетельствует, что нарушение целостности контура заземления (либо нарушение качества самого заземлителя) изменяет значение сопротивления [5, 6, 9-13]. В этом случае устройства релейной защиты начинают работать некорректно: не реагируют на возникающие короткие замыкания и, как следствие, не отключают поврежденный участок, что

са. Величина полного сопротивления опоры контактной сети в значительной мере зависит от способа заземления опоры.

В соответствии с п. 3.2.5 Инструкции ЦЭ-191 от 10.06.93 г. в России защитное заземление опор контактной сети на электрифицированных участках переменного тока выполняют наглухо или через искровые промежутки [7]. Поэтому нормальная работа тяговой сети переменного тока предусматривает один из этих двух способов заземления опор контактной сети. Несмотря на имеющиеся исследования, на примере опытного участка железной дороги подтверждающие возможность эксплуатации тяговой сети переменного тока без заземления опор контактной сети, такой вариант на российских железных дорогах не является распространенным [8]. Поэтому в данном исследовании отсутствие заземления у опоры контактной сети, или, иными словами, разземление опоры, рассматривается как ненормальный режим работы тяговой сети переменного тока.

Исходя из произведенного анализа возможных способов заземления опоры контактной сети, отмечаемых в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [1, 4-6, 8] и нормативной литературе [7], для дальнейшей работы выделены три способа заземления опор контактной сети:

- глухое заземление;
- заземление через дополнительные устройства (искровой промежуток);
- разземление (отсутствие заземления).

расценивается как отказ функционирования релейной защиты и может привести к серьезным авариям [5, 6, 9- 11].

Нарушение целостности системы заземления опоры контактной сети может происходить по различным причинам. Исследователи данной проблемы отмечают, прежде всего, повреждение заземления опоры строительной техникой при проведении работ по обслуживанию путевого хозяйства железной дороги или обрыв заземляющих проводников персоналом при техническом обслуживании устройств свя-

зи. Кроме того, в последнее время участились случаи «отгорания» заземления опор контактной сети, связанные с движением тяжеловесных поездов повышенной массы и длины [10,11].

Причиной этого явления является рост токов тяговой сети, потребляемых электроподвижным составом вследствие увеличения массы и количества тяжеловесных поездов. Величина суммарного рабочего тока тяговой сети при интенсификации тяжеловесного движения становится сопоставима с величиной тока короткого замыкания [10, 11]. Протекание токов значительной величины по разрядникам (или искровым промежуткам), входящим в цепь заземления опор контактной сети, приводит к их отгоранию [12]. Возросшая величина рабочего тока в этом случае воспринимается устройствами релейной защиты как ток короткого замыкания и вызывает срабатывание релейной защиты. В этом случае релейной защитой отключается неповрежденный участок контактной сети, что трактуется как ложное срабатывание устройств релейной защиты.

Перерыв в электроснабжении, возникший по причине ложного срабатывания релейной защиты, значительно снижает безопасность движения поездов, что негативно сказывается на надежности и эффективности системы электроснабжения же-

лезной дороги в частности, и всего перевозочного процесса в целом.

Таким образом, целью данного исследования является предотвращение случаев ложного срабатывания устройств релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока путем повышения устойчивости функционирования устройств РЗ. Для достижения поставленной цели необходим анализ существующих способов заземления опор контактной сети, сбор и анализ статистики натуральных измерений сопротивлений опор контактной сети и параметров, измеряемых защитами, имитационное моделирование системы тягового электроснабжения в условиях роста нагрузок. Комплексная оценка результатов имитационного моделирования и натуральных измерений позволит выявить аспекты влияния разных типов заземления опор контактной сети на условия срабатывания устройств РЗ, на основании чего станет возможным провести прогноз ожидаемых сценариев развития короткого замыкания при условии разного типа заземления опор. Решение всех поставленных задач даст возможность своевременно выявить неисправности в работе устройств РЗ и произвести корректировку настроек релейной защиты для их правильной работы.

Классификация существующих способов заземления опор контактной сети

Заземление металлических частей опоры контактной сети необходимо для достижения двух целей: уменьшения сопротивления цепи короткого замыкания и повышения электробезопасности для человека, находящегося вблизи той опоры, где произошло короткое замыкание. Заземление опор контактной сети и находящихся вблизи нее сооружений осуществляют двумя способами: с использованием индивидуальных или групповых заземляющих проводников, присоединенными к тяговым рельсам или средним точкам путевых дрессель-трансформаторов непосредственно глухим металлическим присоединением или через защитные устройства [1-4, 7, 11, 12]. Защитными устройствами яв-

ляются искровые промежутки или вентильные разрядники, предназначенные для защиты арматуры фундаментов и опор контактных сетей от протекания по ним блуждающих токов, а также для пропуска тока в рельсовую цепь при пробое изоляции контактной сети или воздушной линии продольного электроснабжения, проходящей по этим же опорам.

Выбор способа заземления может быть определен рядом требований, основанных на реальном значении сопротивления каждого из заземленных устройств, а также на их других качественных характеристиках. В любом случае, при таком выборе является обеспечением условий безопасности рабочего персонала вблизи же-

лезнодорожного пути. Необходимо обеспечить протекания тока короткого замыкания только через цепь любых заземляющих и защитных устройств. Необходимо, чтобы за время короткого замыкания ток, протекающий через поврежденную опору, не вызывал ее электротермического перегрева и повреждения, так как от этого зависит надежность работы системы электропитания [1, 12].

Величина тока короткого замыкания зависит от вида заземления опоры контактной

ной сети. В случае отсутствия заземления контактной опоры, когда тело опоры не имеет заземления или по какой-либо причине система заземления повреждена, ток короткого замыкания протекает непосредственно через внешнюю часть опоры.

В случае если опора контактной сети имеет заземление через разрядник, ток короткого замыкания протекает из тяговой сети в рельсовую цепь через систему заземляющих проводников, как показано на рис. 1.

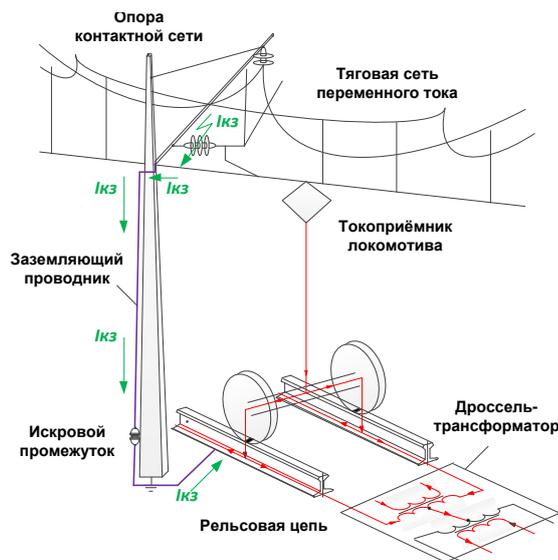


Рис. 1. Путь протекания тока короткого замыкания при заземлении

При возникновении короткого замыкания в тяговой сети переменного тока ток короткого замыкания $I_{кз}$ протекает через заземляющий проводник, прикрепленный к подошве одного из рельсов с помощью крюкового болта (рис. 1). Этот проводник изолирован от земли и от опоры контактной сети с помощью деревянных прокладок. При повреждении изолятора консоли опоры контактной сети, ток короткого замыкания протекает по замкнутой цепи «тяговая подстанция – тяговая сеть – заземляющий проводник (вниз по опоре контактной сети с поврежденной изоляцией) – рельсовая цепь-фидер отсоса (цепь канализации обратного тягового тока) – тяговая подстанция». В этом случае значения тока $I_{кз}$ и сопротивления указанной цепи короткого замыкания играют важную роль для правильной отстройки и корректного сра-

батывания устройств дистанционной релейной защиты.

Значение тока тяговой сети при интенсивном движении тяжеловесных поездов соизмеримо со значениями токов короткого замыкания, поэтому для отстройки релейной защиты крайне важно учесть все составляющие значения сопротивления цепи короткого замыкания, одной из важных составляющих которого является сопротивление опоры контактной сети. Сопротивление опоры контактной сети в значительной мере определяется материалом, из которого она изготовлена. В настоящее время на железных дорогах РФ наиболее распространены железобетонные опоры контактной сети. У таких опор должны быть заземлены консоли опор, а также другие их металлические части, на которые подвешиваются токоведущие элемен-

ты, не имеющие электрического соединения с несущей арматурой и бетоном. Заземление осуществляется с помощью заземлителя, расположенного на внутренней стороне железнодорожного пути.

В случае короткого замыкания значение сопротивления будет зависеть от пути протекания тока короткого замыкания,

что определяется принятым типом заземления опоры контактной сети. На рис. 2 показаны типовая и эквивалентная схемы замещения опоры контактной сети и указаны элементы, входящие в ее полное электрическое сопротивление при коротком замыкании.

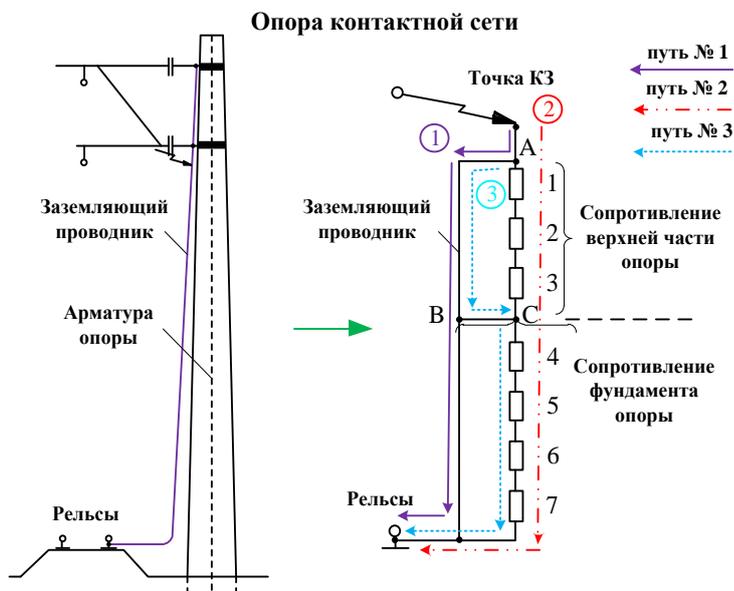


Рис. 2. Схема замещения опоры контактной сети при КЗ

На рис. 2 цифрами обозначены следующие элементы железобетонной опоры контактной сети:

- переходное сопротивление от деталей армировки опоры к бетону;
- сопротивление бетона между деталями армировки и арматуры;
- переходное сопротивление от бетона к арматуре;
- переходное сопротивление от арматуры фундаментной части к бетону;
- сопротивление бетона в фундаментной части;
- сопротивление растеканию тока с фундамента в грунт;
- переходное сопротивление грунт – рельс.

Рассмотрим несколько сценариев развития короткого замыкания при различных вариантах заземления опоры контактной сети на примере рис. 2.

1. При возникновении КЗ и появлении высокого напряжения в верхней части

опоры, ток короткого замыкания протекает по заземляющему спуску к рельсу, таким образом, возникает «металлическое» замыкание, фиксируемое защитой фидера контактной сети. Ток короткого замыкания протекает по следующему пути: точка повреждения в контактной сети верхнего уровня – точка А – точка В – рельсовая шина, показанная на рис. 2 как путь № 1. Заземляющий проводник имеет очень небольшое сопротивление по сравнению с другими элементами в этой цепи, поэтому он не может ограничивать значение тока короткого замыкания и значительная величина тока короткого замыкания определяется устройствами релейной защиты, которые и отключают ток короткого замыкания.

2. В случае, если на опоре отсутствует заземляющий проводник, то весь ток короткого замыкания протекает через тело опоры. При обрыве или отсутствии заземляющего спуска процесс КЗ развивается в

теле опоры, сопровождаясь прогревом бетона, потерей его изолирующих свойств и возникновением дугового разряда в толще бетона. В этом случае ток короткого замыкания будет протекать по следующему пути, показанному на рис. 2 как путь № 2: точка повреждения в контактной сети на верхней части опоры – точка А – точка С (через все сопротивления с порядковыми номерами от 1 до 7) –рельс.

3. Третий возможный вариант сценария развития КЗ будет в случае, если электрической дугойбудет пробит слой бетона между закладными деталями и арматурой опоры. Тогда ток короткого замыкания будет протекать вдоль арматуры опоры по пути 3, показанному на рисунке 2: точка КЗ – точка А – точка В – точка С – сопротивление 4–7 – рельсовая направляющая. Этот путь исключает все компоненты из экви-

валентной схемы замещения, соответствующей верхней части опоры. Такой же путь протекания тока КЗ будет и в том случае, когда заземляющий проводник находится в теле опоры контактной сети.

Опора контактной сети в цепи протекания тока КЗ представляет собой большое сопротивление, поэтому значение тока короткого замыкания резко уменьшится, и устройства релейной защиты не смогут идентифицировать этот режим как короткое замыкание. При отсутствии срабатывания РЗ возникающая электрическая дуга вблизи опоры может вызвать пережог проводов и несущих конструкций. Кроме того, вблизи опоры появляется напряжение большой величины, что нарушает условия электробезопасности находящихся рядом людей [1-3,13-17].

Проведение натурных измерений и анализ результатов

На следующем этапе работы необходимо было исследовать, какую величину сопротивления имеют опоры контактной сети в действующих условиях эксплуатации на реальных участках железной дороги. Для этого на основе базы данных измерений омического сопротивления 288 опор контактной сети, проведенных на перегоне Кругликово – Верино Дальневосточной железной дороги в течение 2018 г. Было

рассчитано доленое распределение опор с разными значениями омического сопротивления от общего их числа. Измерения омического сопротивления опор контактной сети производились в соответствии с Указаниями по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети № К-146-2008 при помощи прибора ПК-2. Результаты представлены на рис. 3.

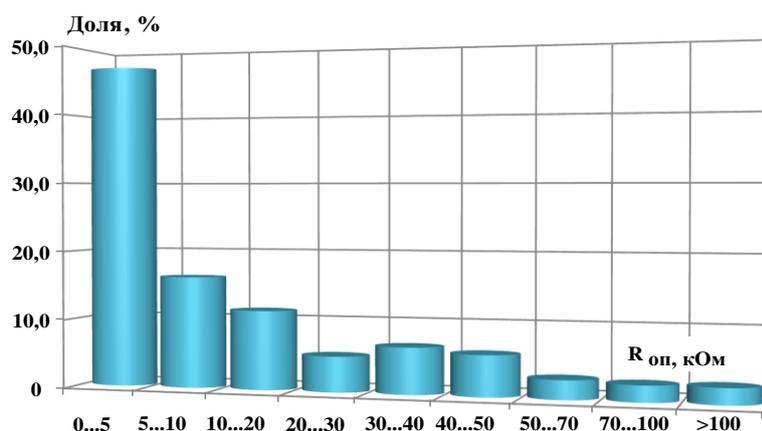


Рис. 3. Доленое распределение сопротивлений опор контактной сети на объекте исследования

Значение математического ожидания сопротивления опоры контактной сети на рассматриваемом участке составило $R_{cp} = 10,03$ кОм. Как следует из рис. 3, подавляющее большинство опор (около 75 про-

центов из числа всех опор на рассматриваемом участке) имеют сопротивление до 20 кОм. Согласно натурным измерениям, сопротивление опор в ряде случаев превышает 80 кОм, что указывает на отсутствие

металлической связи между заземлением опоры и её арматурой. В данном случае речь идет о непреднамеренном разземле-

нии опоры, что вызывает резкое увеличение её активного сопротивления.

Оценка степени влияния разземления опоры на работу релейной защиты фидеров контактной сети

Рассмотрим далее, как именно влияет увеличение сопротивления опоры при коротком случайном замыкании, непреднамеренного разземления опор на условия работы устройств релейной защиты. В настоящее время, для системы электро-

снабжения железных дорог переменного тока типовой схемой соединения контактной сети является узловая схема, в которой узел соединения в виде поста секционирования расположен приблизительно в середине фидерной зоны (рис. 4).

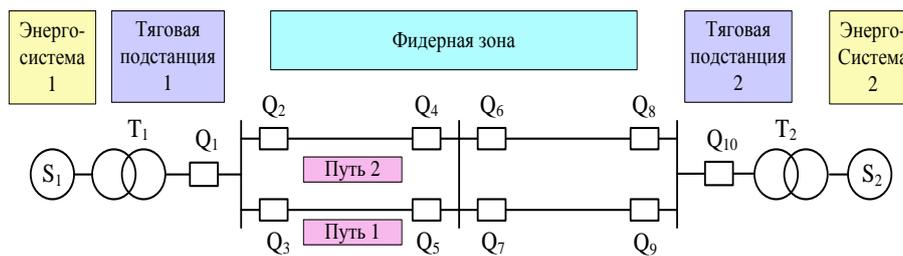


Рис. 4. Схема зоны питания

Устройства релейной защиты в системе тягового электроснабжения 25 кВ установлены на выключателях фидеров контактной сети, на тяговых подстанциях и в точке секционирования контактной сети (обозначены на рис. 4 как Q_2 – Q_9), на вводах тяговых трансформаторов (Q_1 и Q_{10}).

Устройства основной и резервной защит фидеров на тяговых подстанциях и посту секционирования секционных опорах должны образовывать направленную многоступенчатую систему (комплект релейной защиты). В этом случае, короткое замыкание на фидере контактной сети в любой точке межподстанционной зоны между тяговыми подстанциями 1 и 2, показанных на рис. 4, должно быть обнаружено с помощью двух релейных защит (или двух ступеней релейной защиты). Например, в случае короткого замыкания в контактной сети пути 2 между выключателями Q_2 и Q_4 на рис. 4, КЗ должно быть отключено устройствами релейной защиты, установленными на выключателе Q_4 (устройствами релейной защиты поста секционирования) или Q_2 (резервным комплектом устройств релейной защиты тяговой подстанции).

Чтобы ускорить отключение коротких замыканий, в начале питающей линии может быть предусмотрен специальный уровень защиты, а также дополнительная защита в виде отключения тока КЗ без временной задержки [1, 3, 14].

Дистанционная защита тяговых сетей построена на базе реле сопротивления, которое реагирует на соотношение тока и напряжения в защищаемой цепи. В режиме короткого замыкания это соотношение пропорционально сопротивлению $Z_{кз}$ защищаемой линии от точки, в которой РЗ установлена до точки короткого замыкания. Тяговая сеть 25 кВ может быть представлена в виде электрической цепи с активными (R) и реактивными (X) составляющими сопротивления. Таким образом, в режиме нагрузки величина сопротивления r_n значительно больше, чем реактивное сопротивление x_n (рис. 5). Фазовый угол сдвига фаз основной гармоники тока нагрузки электровоза относительно напряжения φ_n изменяется от 25 до 40 градусов, другими словами, характер нагрузки электроподвижного состава активно-индуктивный [1-4, 11- 13].

Наиболее распространенным типом короткого замыкания в контактной сети

является перекрытие изоляторов [1, 2]. В этом случае полное сопротивление короткого замыкания является суммой полного сопротивления электрической сети, полного сопротивления тяговой подстанции, полного сопротивления контактной сети и рельсовой цепи, полного сопротивления

заземляющего проводника (если он имеется) и сопротивления электрической дуги в месте КЗ. В этом случае конец вектора полного сопротивления Z_1 , измеренный на клеммах реле полного сопротивления, попадает в область короткого замыкания (рис. 5).

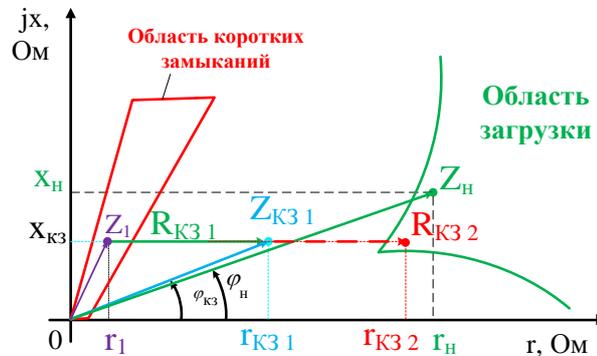


Рис. 5. R-X характеристики

Случайное нарушение целостности заземления опоры контактной сети (разземление опоры) приводит к увеличению сопротивления короткого замыкания. Результирующий вектор $Z_{кз1}$ увеличивается на величину омического сопротивления $R_{кз1}$ и смещается вправо от точки Z_1 до точки $Z_{кз1}$ (рис. 5). Вектор $Z_{кз1}$ выходит за пределы зоны угловой характеристики дистанционной защиты третьей ступени, и эта защита не срабатывает на короткое замыкание. В таких случаях используется четвертая ступень дистанционной защиты, имеющая угловую характеристику, расположенную вдоль оси сопротивления r . Эта ступень ДЗ реагирует на короткие замыкания, характеризующиеся высоким омиче-

ским сопротивлением через большое переходное сопротивление [1, 4- 6].

В случае большого сопротивления контактной опоры $R_{кз2}$, как ранее было выяснено в результате обработки статистических данных о сопротивлениях опор контактной сети на объекты исследования (рис. 3), активное сопротивление короткого замыкания принимает значение $R_{кз2}$. Результирующий вектор смещается вправо вдоль оси омического сопротивления, становится равным $Z_{кз2}$ и, таким образом попадает в область нагрузки, как показано на рис. 5. В этом случае ни одна из четырех ступеней дистанционной защиты не способна отключить короткое замыкание, потому что не может идентифицировать его.

Метод визуализации данных на комплексной плоскости по результатам моделирования параметров системы тягового электроснабжения и натурным измерениям

Следующим этапом работы стала задача комплексной оценки условий функционирования реальных устройств РЗ, установленных на объекте исследования, и прогноз их поведения в условиях дальнейшего роста тяговых нагрузок. Для решения поставленной задачи авторами было предложено применить метод визуализации данных и совместить на одной комплексной плоскости сопротивлений параметры, измеряемые комплектами РЗ на объекте исследования, полученные в ре-

зультате натурных измерений, и параметры, полученные в результате имитационного моделирования с учетом различных типов опор контактной сети.

Была разработана имитационная модель системы тягового электроснабжения с устройствами дистанционной защиты фидеров контактной сети на платформе программирования MATLAB®, что позволило рассчитывать входные сопротивления, измеряемые устройствами основной и резервной релейной защиты при КЗ с учетом

различных значений сопротивления опоры [9, 10]. Упомянутые значения входных сопротивлений были нанесены на комплексную плоскость (рис. 6). Для рассматриваемого случая КЗ в контактной сети второго пути между выключателями Q_2 и Q_4 были рассчитаны значения входных сопротивлений, измеренными реле сопротивлений устройств дистанционной защиты, установленных на выключателях Q_2 и Q_4 в соответствии с рис. 4. Построив на рис. 6 области рассчитанных сопротивлений, измеряемых защитами на выключателях Q_2 и Q_4 при минимальных значениях сопротивления опоры контактной сети, далее на этот же рисунок была нанесена область нагрузки, полученная в результате натурных измерений параметров тока и напряжения, которые проводятся более 8 лет на данном объекте исследования [10-12]. В

течение последних нескольких лет измерения выполняются автоматизированной системой мониторинга, которая имеет широкие возможности для измерений параметров электрической энергии, отстройки устройств защиты, контроля параметров системы электроснабжения и т. д. [15, 17]. Значения токов и напряжений фидеров во время наблюдений фиксируются автоматически, а затем значения сопротивления вычисляются и переносятся на графическую плоскость сопротивлений. Эти значения изображены в виде точек на области нагрузки (рис. 6). На этом же рисунке отмечены области коротких замыканий и зоны срабатывания всех 4 ступеней дистанционной релейной защиты фидера тяговой подстанции. Оси x и y на рис. 6 показывают числовые значения активного и реактивного сопротивлений.

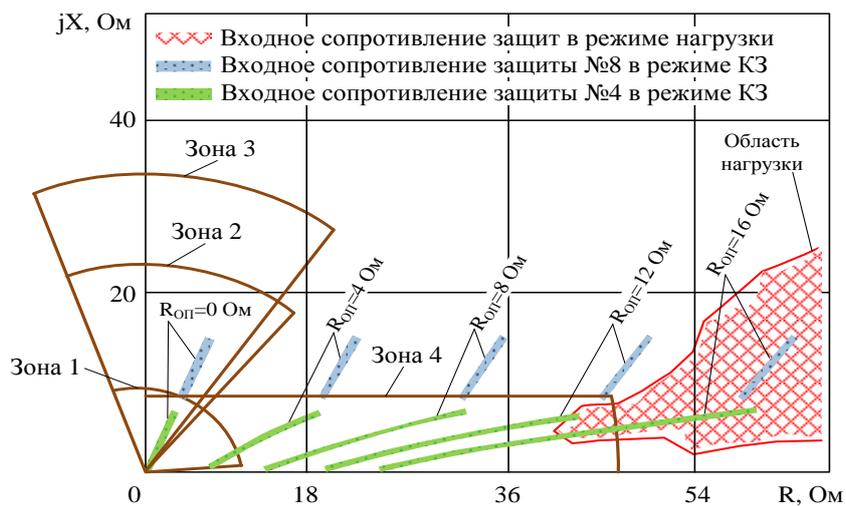


Рис. 6. R-X характеристики при коротких замыканиях

Как следует из рис. 6, в случае короткого замыкания на опоре контактной сети с глухим заземлением, когда значение сопротивления $R_{оп}$ мало, дистанционная релейная защита успешно отключает поврежденную область с требованиями селективности и чувствительности, так как значения входных сопротивлений, измеряемых устройствами РЗ, попадают в зону срабатывания соответствующих ступеней ДЗ. Однако, при росте значения сопротивления опоры, связанного с процессом разземления опоры, уже при относительно небольших значениях сопротивления опоры $R_{оп}$, входные сопротивления, измеряе-

мые дистанционными защитами, все больше и больше смещаются в сторону области нагрузки. При значениях сопротивления $R_{оп}$, равных или превышающих 12 Ом, вектор входного сопротивления, измеряемого защитами, покидает область четвертой ступени дистанционной защиты и попадает в область нагрузочных характеристик, поэтому устройств релейной защиты как основного, так и резервного комплекта ДЗ не могут физически отключить возникающее при таких условиях короткое замыкание. Большое значение переходного сопротивления в точке короткого замыкания увеличивает вектор входного

сопротивления, измеряемого защитой, и изменяет угол и аргумент этого вектора. Таким образом, вектор сопротивления выходит из области угловой характеристики дистанционной защиты фидера контактной сети, что приводит к отсутствию реакции на КЗ со стороны устройств РЗ, поэтому короткое замыкание не может быть отключено.

Причиной отсутствия срабатывания релейной защиты является смещение вектора входного сопротивления цепи КЗ в область нагрузки из-за большого значения переходного сопротивления при коротком замыкании на разземленных опорах. В этом случае дистанционная релейная защита, руководствуясь только значением сопротивления цепи короткого замыкания, не может отличить короткое замыкание от нормального режима работы тяговой сети. Корректировка уставки срабатывания устройств дистанционной защиты в сторону увеличения сопротивления не решает обозначенную проблему, так как в случае увеличения уставки, дистанционная защита станет реагировать не только на аварийные события, но и на нормальную работу тяговой сети с

большими значениями токов. Следовательно, для устранения проблемы и корректировки действия устройств релейной защиты требуется дополнительный параметр, с помощью которого можно будет идентифицировать режим короткого замыкания и отличить его от режима нагрузки. В качестве критерия, по которому можно идентифицировать наличие режима КЗ в дополнение к измеряемому сопротивлению цепи КЗ в ряде работ, посвященных вопросам защиты систем электроснабжения [2-4, 16-20] предлагается брать во внимание спектры гармонических составляющих тока в режиме короткого замыкания и в режиме нагрузки. Защиты, работающие по такому принципу, в настоящее время применяются для защиты тяговых сетей переменного тока. В условиях вождения поездов повышенной массы и длины устойчивость функционирования таких защит крайне низкая. Следовательно, требуются новые отличительные признаки аварийного режима на контактной сети для более точного выявления КЗ и исключения случаев ложного срабатывания защит в условиях повышенных нагрузок.

Заключение

Полученные результаты исследования условий функционирования устройств релейной защиты тяговой сети переменного тока в условиях роста тяговых нагрузок позволяют сделать следующие выводы:

1. Научная новизна проведенных авторами исследований заключается в комплексном подходе к условиям оценки функционирования устройств релейной защиты тяговой сети переменного тока с учётом различных способов заземления опор контактной сети переменного тока и реальных параметров нагрузки тяговой сети при тяжеловесном движении поездов.

2. Выявлено, что в случае короткого замыкания на разземленной опоре контактной сети появляется переходное сопротивление, высокое значение которого уводит вектор измеряемого защитой со-

противления в область нагрузки и нарушает стабильную работу дистанционной релейной защиты. В связи с этим, использование для идентификации короткого замыкания дополнительного (помимо величины комплексного сопротивления цепи КЗ) параметра может повысить устойчивость функционирования дистанционной релейной защиты с учетом различных типов заземления контактной сети.

3. Предложен метод визуализации данных на комплексной плоскости по результатам моделирования параметров системы тягового электроснабжения и натурным измерениям, что позволяет комплексно решить проблему повышения устойчивости функционирования устройств релейной защиты.

Работа выполняется при поддержке федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках грантовой программы поддержки молодых ученых «УМНИК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фигурнов Е. П. Релейная защита: учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта: в 2 ч. Ч. 1: Основы релейной защиты // Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте : Транспортная книга, 2009. 414 с.
2. Novo J. M., Teston L. S. M., Calero F. I. Protective Relaying for Railway Feeders. (Abstractsofthe The Int. conference «41st Annual Western Protective Relay Conference»)Spokane, Washington, 2014.
3. Grid Alsom. Network Protection &Automation Guide: Protective Relays, Measurement & Control , 2011, 508 p.
4. Ma J., Wang Z. Basic Theories of Power System Relay Protection. Hierarchical Protection for Smart Grids, 2018, Ch.1., pp 1-16.
5. Дынькин Б.Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети: монография. Хабаровск. ДВГУПС, 1999. 170 с.
6. Пинчуков П.С.Защита секционированных тяговых сетей переменного тока: монография. М-во трансп. РФ, Федеральное агентство ж.-д. трансп., Дальневосточный гос. ун-т путей сообщ. Хабаровск, 2010.
7. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах / (ЦЭ-191) от 10.06.93 М.: МПС РФ, 1993. 68 с.
8. Кващук В.А., Кондратьев Ю.В., Кремлев И.А., Терёхин И.А. Методика проведения экспериментальных испытаний условий электробезопасности на участке тяговой сети переменного тока, эксплуатируемом без заземления опор контактной сети на рельс // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 2 (109). С. 68-73.
9. Pinchukov P. S. Experimental evaluation of sustainable functioning of overhead wire relay protection at traction substations of the Far Eastern Railway. Russian Electrical Engineering, 2016, Volume 87, Issue 2, pp 62–64.
10. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Research of AC Traction Network's Relay Protection Operating Under Heavy Haul Traffic Conditions. (Abstracts of the Int. «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science »), 2019,vol. 272/ 022069.
11. Пинчуков П.С., Макашѐва С.И. Устройства релейной защиты в условиях тяжеловесного движения // Железнодорожный транспорт. 2018. № 8. С. 40-42.
12. Makasheva S.I. Simulation of a Return Current System for AC Power Traction Network. (Abstracts of the Int. « IOP Conference Series: Earth and Environmental Science »), 2019, vol. 272/022071.
13. Li W., Hu P., Overview of Analysis on State Evaluation of Relaying Protection System, Journal of Power and Energy Engineering, 2019, no. 5 (7), pp. 1-7.
14. Abramov E. Y., Schurov N. I., RozhkovaM. V. Electric Transport Traction Power Supply System With Distributed Energy Sources (Abstracts of the Int. conference « IOP Conference Series: Materials Science and Engineering »), 2016, vol. 127/012001.
15. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Expanding the functionality of automated monitoring systems for traction substations, (Abstracts of the Int. «MATEC Web of Conferences »), 2014, vol.239/01014.
16. Guo J., Yuan M., Liu B., Li L. Research on Feeder Protection for a Traction Network Based on Adaptive Parameter Calculation, International Journal of Computer, Consumer and Control, 2016, no. 4 (5), pp. 34-42.
17. Daniel L. R. Upgrading Relay Protection: Be Prepared for the Next Replacement or Upgrade Project, IEEE Industry Applications Magazine, 2014, vol. 20 (5), pp. 71-79.
18. Wang S., Liang J., Liu W., Wang Y. A study on the expert system of relay protection. (Abstracts of the Int. «International Conference on Engineering Technology and Application»), 2016, pp. 572-577.
19. Chen G., Wang D., Qiu Y., Wang S., Challenges and Development Prospects of Relay Protection Technology, *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41 (16), pp.1-11.
20. Romanov Yu. V., Voronov P. I., Assessing the Sensitivity of Relay Protection, Power Technology and Engineering, 2018, no. 6 (51), pp. 38-41.
1. Figurnov E.P. *Relay Protection*: textbook for railway college students: in 2 Parts Part 1: Fundamentals of Relay Protection // 3-d edition revised and supplemented. М.: Educational and Methodical Center for Education on Railway Transport: Transport Book, 2009. pp. 414.
2. Novo J. M., Teston L. S. M., Calero F. I. Protective Relaying for Railway Feeders. (Abstractsofthe The Int. conference «41st Annual Western Protective Relay Conference»)Spokane, Washington, 2014.
3. Grid Alsom. Network Protection &Automation Guide: Protective Relays, Measurement & Control , 2011, 508 p.
4. Ma J., Wang Z. Basic Theories of Power System Relay Protection. Hierarchical Protection for Smart Grids, 2018, Ch.1., pp 1-16.
5. Dynkin B.E. *AC Traction Circuit Protection at Contact System Mast Un-earth*: monograph. Khabarovsk. FESURC, 1999. pp. 170.
6. Pinchukov P.S. *AC Sectioned Traction Circuit Protection*: monograph. Ministry of Transport of the RF. Federal Railway Agency, Far-Eastern State University of Railway Communications. Khabarovsk, 2010.
7. *Instruction for Earth of Power Supply Devices on Electrified Railways* / (CE-191) of 10.06. 93. М.: MRC the RF, 1993. pp. 68.

8. Kvashchuk V.A., Kondratiev Yu.V., Kremlyov I.A., Teryokhin I.A. Procedure for experimental test fulfillment of power safety conditions at area of ac traction circuit operated without rail earth of contact system masts // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2016. No.2 (109). pp. 68-73.
9. Pinchukov P. S. Experimental evaluation of sustainable functioning of overhead wire relay protection at traction substations of the Far Eastern Railway. *Russian Electrical Engineering*, 2016, Volume 87, Issue 2, pp 62–64.
10. Pinchukov P.S., Makasheva S.I. Research of AC Traction Network's Relay Protection Operating Under Heavy Haul Traffic Conditions. (Abstracts of the Int. « IOP Conference Series: Earth and Environmental Science »), 2019, vol. 272/ 022069.
11. Pinchukov P.S., Makashyova S.I. Relay protection devices under conditions of heavy-freight motion // *Railway Transport*. 2018. No.8. pp. 40-42.
12. Makasheva S.I. Simulation of a Return Current System for AC Power Traction Network. (Abstracts of the Int. « IOP Conference Series: Earth and Environmental Science »), 2019, vol. 272/022071.
13. Li W., Hu P., Overview of Analysis on State Evaluation of Relaying Protection System, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2019, no. 5 (7), pp. 1-7.
14. Abramov E. Y., Schurov N. I., Rozhkova M. V. Electric Transport Traction Power Supply System With Distributed Energy Sources (Abstracts of the Int. conference « IOP Conference Series: Materials Science and Engineering »), 2016, vol. 127/012001.
15. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Expanding the functionality of automated monitoring systems for traction substations, (Abstracts of the Int. «MATEC Web of Conferences »), 2014, vol.239/01014.
16. Guo J., Yuan M., Liu B., Li L. Research on Feeder Protection for a Traction Network Based on Adaptive Parameter Calculation, *International Journal of Computer, Consumer and Control*, 2016, no. 4 (5), pp. 34-42.
17. Daniel L. R. Upgrading Relay Protection: Be Prepared for the Next Replacement or Upgrade Project, *IEEE Industry Applications Magazine*, 2014, vol. 20 (5), pp. 71-79.
18. Wang S., Liang J., Liu W., Wang Y. A study on the expert system of relay protection. (Abstracts of the Int. «International Conference on Engineering Technology and Application»), 2016, pp. 572-577.
19. Chen G., Wang D., Qiu Y., Wang S., Challenges and Development Prospects of Relay Protection Technology, *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41 (16), pp.1-11.
20. Romanov Yu. V., Voronov P. I., Assessing the Sensitivity of Relay Protection, *Power Technology and Engineering*, 2018, no. 6 (51), pp. 38-41.

Ссылка для цитирования:

Пинчуков П.С., Макашьева С.И., Костин А.П. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 7. С. 27 - 38. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-7-27-38.

Статья поступила в редакцию 15.04.20.

Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета

Пугачев А.А.

Статья принята к публикации 22.06.20.

Сведения об авторах:

Пинчуков Павел Сергеевич, к.т.н., директор Электроэнергетического института, доцент кафедры «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), e-mail: dee@festu.khv.ru.

Макашева Светлана Игоревна, к.т.н., доцент кафедры «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей со-

Pinchukov Pavel Sergeevich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Power Supply Systems", Director of Electric Power Institute, Far-Eastern State University of Railway Communications (FESURC), e-mail: dee@festu.khv.ru.

Makashyova Svetlana Igorevna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Power Supply Systems", Far-

общения (ДВГУПС), тел.: +7 -914-548-27-78, e-mail: jap_svet@mail.ru.

Костин Алексей Петрович, студент 651 группы Электроэнергетического института, Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), тел.: +7 -962-222-88-66, e-mail: kostinsssl@icloud.com.

Eastern State University of Railway Communications (FESURC), Phone: +7 914 548 27 78, e-mail: jap_svet@mail.ru.

Kostin Alexey Petrovich, Student, Group 651, Power Institute, Far-Eastern State University of Railway Communications (FESURC), Phone: +7 962 222 88 66, e-mail: kostinsssl@icloud.com.