

СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ШУНТОВОГО ЭФФЕКТА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

ШВАЛОВ Дмитрий Викторович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: d_shvalov@mail.ru

Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», Ростов-на-Дону

Значение переходного сопротивления «колесо — рельс» является определяющим фактором для обеспечения шунтового эффекта рельсовых цепей. Учитывая тяжесть последствий необеспечения шунтового эффекта — аварии или крушения поездов из-за перевода стрелки под составом или открытия светофора, ограждающего занятый участок пути, необходим непрерывный мониторинг состояния рельсовых цепей (шунтовой чувствительности) с целью своевременного выявления критических значений дестабилизирующих факторов или условий функционирования. В статье рассмотрены способы автоматизации измерений сопротивления поездного шунта и способы предотвращения потери шунта (невыполнения шунтового эффекта) занятой рельсовой цепью, а также исследована возможность реализации непрерывного мониторинга выполнения шунтового эффекта (мониторинга шунтовой чувствительности) на основе модели изменения значений их параметров в процессе движения подвижных единиц по рельсовой линии. Полученные результаты могут быть использованы для решения таких аналитических и практических задач, как: расчет и исследование динамики изменения коэффициента чувствительности рельсовой цепи к фактическому поездному шунту; построение инвариантного к внешним возмущениям классификатора состояний рельсовой цепи в процессе движения поезда от момента вступления до момента освобождения рельсовой линии; организация непрерывного мониторинга шунтовой чувствительности рельсовой цепи.

Ключевые слова: рельсовая цепь; шунтовая чувствительность; модель рельсовой цепи; выполнение шунтового эффекта; технология обслуживания.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-229-238

▼ Введение

Значение переходного сопротивления «колесо — рельс» существенно увеличивается из-за возникновения непроводящего слоя на головках рельсов (песок, цемент, ржавчина, загрязнение, обледенение, напрессовка снега, налипание растительности) или на поверхностях колес (ржавчина, битум, мазут). Причинами возникновения непроводящего слоя могут быть, например, использование песка для улучшения сцепления колес с рельсами в момент трогания локомотива, образование на поверхностях головок рельсов изолирующей пленки при сильных морозах [1], образование на поверхностях головок рельсов изолирующего слоя вследствие высыпания или выливания из вагонов перевозимых грузов при высоких скоростях движения или неисправных вагонов, попадание на головки рельсов грязи из-за чрезмерного загрязнения балласта [2]. Отступления от норм содержания рельсовых цепей в части необеспечения шунтового эффекта приводят к крушениям поездов из-за перевода стрелки под составом или открытия светофора,

ограждающего занятый участок пути. При скоростном (высокоскоростном) движении возникают аналогичные проблемы в области обеспечения шунтовой чувствительности рельсовых цепей [3].

Учитывая тяжесть последствий необеспечения шунтового эффекта, необходим непрерывный мониторинг состояния рельсовых цепей (шунтовой чувствительности) с целью своевременного выявления критических значений дестабилизирующих факторов или условий функционирования. В соответствии с действующей технологией обслуживания визуальный контроль состояния поверхностей головок рельсов проводится либо в процессе выполнения регламентных работ, либо в процессе следования к месту выполнения работ, а визуальный контроль поверхностей колес проводится в пунктах осмотра вагонов. Современные технологии позволяют реализовать соответствующие логико-вычислительные процедуры для выявления загрязнения (наличия непроводящего слоя) на поверхностях головок рельсов и

поверхностях колес по кругу катания, но техническая реализация ряда измерительных процедур в реальном времени представляет значительную практическую проблему. В статье [4] рассмотрены способы автоматизации проверок рельсовых цепей на шунтовую чувствительность и контроля выполнения шунтового эффекта в процессе нахождения подвижной единицы на рельсовой цепи. Целью настоящей статьи является исследование возможности непрерывного мониторинга выполнения шунтового эффекта (мониторинга шунтовой чувствительности) на основе модели изменения значений их параметров в процессе движения подвижных единиц по рельсовой линии.

1. Известные предложения по автоматизации измерения сопротивления поездного шунта и по предотвращению потери шунта (предотвращению невыполнения шунтового эффекта) занятой рельсовой цепью

Исследования проблемы автоматизации измерения сопротивления поездного шунта выполнялись многими учеными и специалистами. Общий подход к решению поставленной задачи состоит в расчете искомого значения на основе измерений значений различных параметров рельсовых цепей.

В [5] предложено определять сопротивление поездного шунта следующим образом: измеряется напряжение на входе путевого приемника контролируемой рельсовой цепи в свободном состоянии и в течение всего времени ее занятия подвижным составом; по значению напряжения свободной рельсовой цепи с использованием известных значений других параметров определяется сопротивление изоляции рельсовой линии [6]; по минимальному значению напряжения при занятой рельсовой цепи и значению сопротивления изоляции определяется сопротивление поездного шунта. Недостатком такого способа, влияющим на достоверность результата, является измерение значения напряжения на входе путевого приемника, а не в рельсах, и, следовательно, рассчитывается значение не сопротивления изоляции рельсовой линии, а общего сопротивления изоляции

цепи, по которой протекает сигнальный ток, включая соединительные провода (кабельную линию). Кроме того, минимальное напряжение на путевом приемнике будет зафиксировано при минимальном значении сопротивления поездного шунта, то есть при нахождении на участке максимального количества колесных пар, а в соответствии с действующей технологией проверка выполнения шунтового эффекта производится при наложении на рельсовую линию нормативного шунта, что соответствует максимальному значению сопротивления поездного шунта — в момент вступления на участок одной колесной пары или когда на участке остается одна колесная пара.

В [7] предложено определять сопротивление поездного шунта следующим образом: методом холостого хода и короткого замыкания [6] определяется суммарное сопротивление линии связи между источником сигнального тока и согласующим трансформатором, согласующего трансформатора и соединительных проводов между согласующим трансформатором и рельсовой линией (напряжение и сила тока в режимах холостого хода и короткого замыкания измеряются на выходе источника; режим короткого замыкания реализуется путем замыкания в цепи вторичной обмотки согласующего трансформатора при помощи коммутационного устройства); при наложении на рельсовую линию поездного шунта измеряются значения напряжения и силы тока на выходе источника сигнального тока и рассчитывается суммарное сопротивление линии связи, согласующего трансформатора, соединительных проводов и поездного шунта; сопротивление поездного шунта определяется как разность двух описанных выше суммарных сопротивлений. Такой способ имеет ряд недостатков, влияющих на достоверность результата. Во-первых, при расчете суммарного сопротивления в шунтовом режиме не учитывается сопротивление рельсовой линии от точки подключения аппаратуры рельсовой цепи до точки наложения поездного шунта, что дает основания сделать вывод о применимости данного способа только при наложении поездного шунта на том конце рельсовой цепи, где производятся измерения (на питающем конце). Во-вторых,

рассматриваемый режим холостого хода фактически таковым не является, так как вторичная обмотка согласующего трансформатора имеет нагрузку, в качестве которой можно рассматривать сопротивление рельсовой линии и аппаратуры релейного конца рельсовой цепи. Кроме того, включение в схему рельсовой цепи дополнительного коммутационного устройства снижает ее надежность и требует перерасчета регулировочных таблиц.

В [8] предложено определять сопротивление поездного шунта следующим образом: на питающем конце рельсовой цепи к рельсовой линии подключается дополнительный дроссель-трансформатор через основную обмотку; при вступлении на рельсовую линию подвижной единицы измеряются напряжение на дополнительной обмотке дроссель-трансформатора и сила тока на выходе источника питания рельсовой цепи; сопротивление поездного шунта определяется как отношение напряжения между рельсами, которое рассчитывается по значению напряжения на дополнительной обмотке дроссель-трансформатора, к силе тока, протекающего по рельсовой цепи. Такой способ имеет недостатки, аналогичные предыдущему: при расчете не учитываются сопротивление рельсовой линии от точки подключения аппаратуры рельсовой цепи до точки наложения поездного шунта, сопротивление соединительных и монтажных проводов (перемычек) и кабельной линии (при ее наличии). Также недостатком является включение в схему рельсовой цепи дополнительного дроссель-трансформатора.

В [9] предложено определять сопротивление поездного шунта с учетом его местоположения в пределах рельсовой цепи следующим образом: при движении подвижной единицы определяется расстояние до нее (до первой колесной пары) от конца рельсовой цепи с помощью радиолокационного дальномера; сопротивление поездного шунта определяется как разность входного сопротивления рельсовой линии и сопротивления рельсов известной длины; входное сопротивление рельсовой линии рассчитывается по схеме последовательного подключения его и эталонного сопротивления к выходам источника сигнального тока по измеренным значениям напряжений

на эталонном сопротивлении и на входе в рельсовую линию. Недостатками такого способа являются: необходимость использования отдельного дальномера для каждой рельсовой цепи; необходимость измерения напряжения в рельсовой линии в автоматическом режиме, что практически реализовать не представляется возможным; при расчете входного сопротивления рельсовой линии не учитывается сопротивление (падение напряжения) элементов тракта передачи сигнального тока от источника в рельсовую линию.

В [10] предложено определять сопротивление поездного шунта двусной подвижной единицы следующим образом: на подвижной единице устанавливаются четыре датчика тока и аппаратура определения координаты (позиционирования); датчики измеряют силу тока, протекающего по рельсовой линии перед и после (по ходу движения) подвижной единицы, и протекающего по первой и второй колесным парам; по полученным значениям, известному значению входного сопротивления аппаратуры рельсовой цепи на конце, расположенном после подвижной единицы, и рассчитанным значениям сопротивления свободной части рельсовой линии определяются значения сопротивлений колесных пар и поездного шунта в целом; информация о несоответствии значения сопротивления поездного шунта нормативному передается на приборы контроля машиниста подвижной единицы и (по беспроводному каналу) на автоматизированное рабочее место эксплуатационного персонала. Достоинством такого способа является возможность выявления ложной свободности рельсовой цепи при несовпадении сигналов о состоянии путевого реле (реле под током) и о фактическом местоположении подвижной единицы (из системы позиционирования). Также в этом случае можно определить причину ложной свободности — неправильная регулировка рельсовой цепи (при наличии измерительно-вычислительных средств технического диагностирования и мониторинга) или повышенное сопротивление поездного шунта. Недостатками способа являются ограниченная область применения (только для двусных подвижных единиц) и необходимость реализации дополнительного беспроводного канала связи

между подвижной единицей и автоматизированным рабочим местом эксплуатационного персонала.

В [11] предложено определять сопротивление поездного шунта исходя из предположения, что напряжение на путевом приемнике в шунтовом режиме будет определяться произведением силы тока путевого генератора на сопротивление поездного шунта, что не соответствует электрической схеме параллельного включения сопротивлений поездного шунта и путевого приемника в шунтовом режиме.

Известные способы предотвращения потери шунта (невыполнения шунтового эффекта) предполагают выполнение соответствующих действий машинистами в случае обнаружения предпосылок для возникновения опасной ситуации или применение специальных дополнительных конструктивных решений.

Так, в [12] предложено на легкие подвижные единицы устанавливать дополнительное устройство, шунтирующее рельсовую линию, — соединенные металлической планкой ролики, контактирующие с внутренней частью головок рельсов. Недостаток такого решения — на каждую подвижную единицу требуется устанавливать дополнительные элементы соприкосновения с рельсами, что усложняет и снижает надежность конструкции в целом, а также усложняет процессы технического обслуживания и ремонта подвижных единиц.

В [13] предложен следующий способ: в момент фиксации наложения поездного шунта на рельсовую линию запоминается значение напряжения на путевом реле, при котором оно обесточилось; затем в течение всего времени нахождения подвижной единицы в пределах рельсовой цепи это значение напряжения поддерживается на обмотке путевого реле при помощи токорегулирующего элемента. Недостатком такого способа является введение дополнительных элементов в схему рельсовой цепи, что снижает ее надежность и требует перерасчета регулировочных таблиц. Кроме того, для поддержания напряжения на путевом реле не выше уровня, при котором оно отпускает якорь (сектор), требуется фиксация занятого состояния рельсовой цепи, то есть отпускание якоря (сектора) путевого реле. А в случае, если

рельсовая цепь не зафиксирует вступление колесной пары (путевое реле не обесточится), схема не сработает, то есть не фиксируется невыполнение шунтового эффекта.

В [14] предложено, что в случае фиксации факта потери шунта под подвижной единицей (по показаниям локомотивных устройств индикации) после экстренного торможения с применением песка машинист должен продолжать движение до восстановления шунтового эффекта, то есть до восстановления нормальной работы автоматической локомотивной сигнализации. Недостатками такого способа являются: возложение на машиниста дополнительных функций по фиксации и принятию решения о факте потери шунта; в случае нарушения нормальной работы автоматической локомотивной сигнализации становится непонятно, сколько времени машинисту следует продолжать движение; необходимость продолжать движение после применения экстренного торможения, что может противоречить условиям, вызвавшим применение экстренного торможения.

В [15] предложено оборудовать подвижную единицу устройством, которое автоматически фиксирует применение песка при экстренном торможении и выдает сигнал на прекращение подачи песка при достижении подвижной единицей установленной скорости. Также предлагается, что после прекращения подачи песка подвижная единица должна проследовать еще некоторое расстояние, достаточное для того, чтобы хотя бы одна колесная пара остановилась на чистых (не засыпанных песком) рельсах. К недостаткам такого способа можно отнести, во-первых, отсутствие проверки выполнения шунтового эффекта, во-вторых, аналогично [14], — необходимость продолжать движение после применения экстренного торможения.

В [16] и [17] представлены результаты разработки устройства для очистки поверхности катания ходовых рельсов от ржавчины или других загрязнений. Однако для принятия решения о реализации такого способа очистки необходимо зафиксировать соответствующее отклонение от норм содержания поверхностей головок рельсов.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы.

1. Известные методы автоматизации измерения сопротивления поездного шунта на основе измерений значений различных параметров рельсовых цепей и последующих расчетов искомого значения не являются эффективными (точными), так как в расчетных формулах не учитывается сопротивление отдельных элементов тракта протекания сигнального тока. Кроме того, использование дополнительной согласующей, коммутационной или измерительной аппаратуры может привести к ухудшению параметров надежности рельсовых цепей.

2. Перспективными с точки зрения возможности выявления факта и причин ухудшения (невыполнения) шунтового эффекта можно считать методы на основе использования информации о значениях параметров рельсовых цепей и о фактическом местоположении подвижных единиц в пределах рельсовых цепей. При этом следует учесть, что алгоритмы принятия решений в известных средствах технического диагностирования и мониторинга не решают задачу идентификации причин, вызывающих ухудшение шунтового эффекта [18].

2. Динамическая модель рельсовой цепи в шунтовом режиме

При расчете фактических значений параметров рельсовой цепи в шунтовом режиме основными проблемами являются определение точного местоположения подвижной единицы в пределах рельсовой цепи и определение точного значения сопротивления поездного шунта. Для решения первой проблемы в задачах диагностики в [19] разработана модель классификации на основе применения метода динамического преобразования времени (dynamic time warping) для установления зависимости между напряжением на входе путевого приемника и положением поездного шунта. Для решения второй проблемы в [20] предложен метод определения состояния поездного шунта по переходному току в моменты занятия и освобождения рельсовой цепи. Принципы построения модели изменения параметров сигнального тока на входе путевого приемника в динамике движения подвижной единицы по рельсовой цепи от момента вступления до момента освобождения изложены в [21].

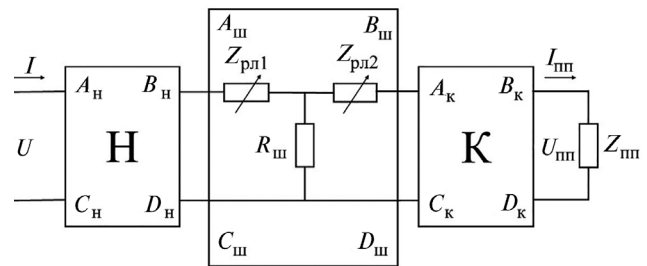


Рис. 1. Схема замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме с учетом местоположения поездного шунта

Рассмотрим схему замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме с учетом местоположения поездного шунта (рис. 1), на которой использованы следующие обозначения:

- U, I — напряжение, ток источника питания рельсовой цепи;
- Н и К — четырехполюсники, замещающие аппаратуру соответственно питающего и релейного конца рельсовой цепи, с коэффициентами A_H, B_H, C_H, D_H и A_K, B_K, C_K, D_K ;
- $A_ш, B_ш, C_ш, D_ш$ — коэффициенты общего четырехполюсника, замещающего рельсовую линию с наложенным на нее поездным шунтом;
- РЛ1 — свободная от подвижного состава часть рельсовой линии между поездным шунтом и питающим концом;
- РЛ2 — свободная от подвижного состава часть рельсовой линии между поездным шунтом и релейным концом;
- ПШ — поездной шунт;
- ПП — путевого приемника, $U_{пп}$ и $I_{пп}$ — соответственно напряжение и ток на входе путевого приемника.

При расчете шунтового режима рельсовой цепи коэффициент шунтовой чувствительности определяется по формуле¹:

$$K_{шн(р)} = \frac{|U_{дшн(р)}|}{|U_{фmin}|},$$

где $U_{дшн(р)}$ — допустимое напряжение источника питания в шунтовом режиме при наложении

¹ Здесь и далее базовые расчетные формулы и выражения взяты из [22].

нии нормативного шунта на питающем (релейном) конце;

$U_{\text{фmin}}$ — минимальное фактическое напряжение источника питания, определенное в результате расчетов и с учетом выходных параметров источника.

Допустимое напряжение источника питания в шунтовом режиме при наложении нормативного шунта определяется по формуле:

$$|U_{\text{дшп(р)}}| = I_{\text{пш}} |Z_{\text{пшп(р)}}|,$$

где $I_{\text{пш}}$ — ток надежного несрабатывания путевого приемника;

$Z_{\text{пшп(р)}}$ — сопротивление передачи общей схемы замещения рельсовой цепи при наложении нормативного шунта на питающем (релейном) конце.

Сопротивление передачи общей схемы замещения рельсовой цепи при наложении нормативного шунта на питающем и релейном концах рассчитывается по формулам:

$$Z_{\text{пшп}} = K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} \times (A_{\text{шп}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{шп}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{шп}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{шп}}));$$

$$Z_{\text{пшр}} = K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} \times (A_{\text{шр}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{шр}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{шр}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{шр}})),$$

где $K'_{\text{тн}}$ — обратный коэффициент снижения тока в четырехполюснике Н, $K'_{\text{тн}} = A_{\text{н}}$;

$K_{\text{тк}}$ — прямой коэффициент снижения тока в четырехполюснике К, $K_{\text{тк}} = C_{\text{к}} Z_{\text{пш}} + D_{\text{к}}$;

$Z'_{\text{вхн}}$ — обратное входное сопротивление четырехполюсника Н, $Z'_{\text{вхн}} = \frac{B_{\text{н}}}{A_{\text{н}}}$;

$Z_{\text{вкк}}$ — прямое входное сопротивление четырехполюсника К, $Z_{\text{вкк}} = \frac{A_{\text{к}} Z_{\text{пш}} + B_{\text{к}}}{C_{\text{к}} Z_{\text{пш}} + D_{\text{к}}}$;

$Z_{\text{пш}}$ — входное сопротивление путевого приемника.

Выражение для расчета сопротивления передачи общей схемы замещения рельсовой цепи при наложении поездного шунта в любой точке рельсовой линии может быть записано как:

$$Z_{\text{пш}} = K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} \times (A_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{ш}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{ш}})).$$

Переходя от расчетных значений параметров к фактическим, полученным в результате непрерывного мониторинга параметров рельсовой цепи, запишем выражение для расчета коэффициента шунтовой чувствительности в любой момент времени как:

$$K_{\text{ш}} = \frac{I_{\text{пш}} K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} |A_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{ш}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{ш}})|}{|U_{\text{шп}}|},$$

где $I_{\text{пш}}$ — ток на входе путевого приемника;

$U_{\text{шп}}$ — напряжение на выходе источника питания.

Коэффициенты общего четырехполюсника рельсовой линии с наложенным на нее поездным шунтом предлагается определять следующим образом. Учитывая, что рельсовая линия представляется в виде последовательного соединения трех четырехполюсников (РЛ1, ПШ и РЛ2 — см. рис. 2), и используя выражения для расчета коэффициентов четырехполюсников свободной рельсовой линии, найдем значения искомым коэффициентов путем последовательного перемножения матриц:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_{\text{ш}} & B_{\text{ш}} \\ C_{\text{ш}} & D_{\text{ш}} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_1) & Z_{\text{в}} \text{sh}(\gamma l_1) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_1)}{Z_{\text{в}}} & \text{ch}(\gamma l_1) \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{\text{пш}}} & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_2) & Z_{\text{в}} \text{sh}(\gamma l_2) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_2)}{Z_{\text{в}}} & \text{ch}(\gamma l_2) \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

где l_1 и l_2 — соответственно длины РЛ1 и РЛ2;

$Z_{\text{в}}$ и γ — соответственно волновое сопротивление и коэффициент распространения рельсовой линии;

$R_{\text{пш}}$ — сопротивление поездного шунта.

Выполнив преобразования и введя для упрощения расчетных выражений дополнительные переменные N_1-N_5 , получим следующие выражения:

$$A_{\text{ш}} = N_1 + N_2 + N_3 N_5;$$

$$B_{\text{ш}} = Z_{\text{в}} (N_3 + N_4 (1 + N_5));$$

$$C_{ш} = \frac{1}{Z_{в}}(N_2 + N_4) + \frac{N_1}{R_{шш}};$$

$$D_{ш} = N_1 + N_2 + N_4 N_5,$$

где $N_1 = \text{ch}(\gamma l_1) \text{ch}(\gamma l_2)$; $N_2 = \text{sh}(\gamma l_1) \text{sh}(\gamma l_2)$;
 $N_3 = \text{sh}(\gamma l_1) \text{ch}(\gamma l_2)$; $N_4 = \text{ch}(\gamma l_1) \text{sh}(\gamma l_2)$;
 $N_5 = \frac{Z_{в}}{R_{шш}}$.

Рассмотрим некоторые частные случаи, возникающие в процессе движения поезда по рельсовой линии. Для определенности примем, что поезд вступает на релейный конец рельсовой цепи.

1. Вступление первой колесной пары на рельсовую линию. В этом случае сопротивление поездного шунта равно сопротивлению одной колесной пары, то есть равно сопротивлению нормативного шунта 0,06 Ом. Длины РЛ1 и РЛ2 будут равны соответственно $l_1 = L_{рц}$ и $l_2 = 0$, где $L_{рц}$ — длина рельсовой цепи. Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = \text{ch}(\gamma L_{рц}); N_2 = N_4 = 0; N_3 = \text{sh}(\gamma L_{рц}),$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{ш} = N_1 + N_3 N_5; B_{ш} = Z_{в} N_3; C_{ш} = \frac{N_1}{R_{шш}}; D_{ш} = N_1.$$

2. Нахождение последней колесной пары на рельсовой линии. В этом случае сопротивление поездного шунта равно сопротивлению одной колесной пары, то есть равно сопротивлению нормативного шунта 0,06 Ом. Длины РЛ1 и РЛ2 будут равны соответственно $l_1 = 0$ и $l_2 = L_{рц}$, где $L_{рц}$ — длина рельсовой цепи. Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = \text{ch}(\gamma L_{рц}); N_2 = N_3 = 0; N_4 = \text{sh}(\gamma L_{рц}),$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{ш} = N_1; B_{ш} = Z_{в} (N_4 (1 + N_5));$$

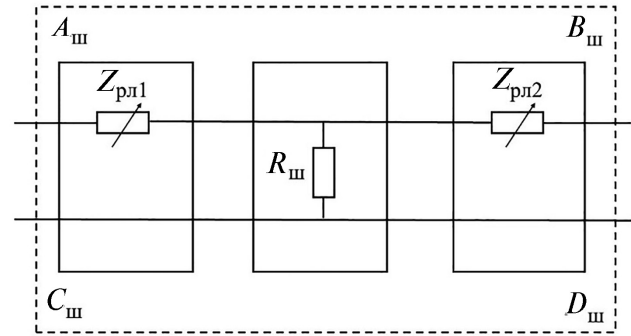


Рис. 2. Схема замещения рельсовой линии

$$C_{ш} = \frac{N_4}{Z_{в}} + \frac{N_1}{R_{шш}}; D_{ш} = N_1 + N_4 N_5.$$

3. Поезд полностью находится на рельсовой линии, длина поезда больше длины рельсовой цепи. В этом случае сопротивление поездного шунта будет определяться количеством колесных пар (n), находящихся на рельсовой линии,

то есть $R_{шш} = \frac{0,06}{n}$. Длины РЛ1 и РЛ2 будут равны 0. Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = 1; N_2 = N_3 = N_4 = 0,$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{ш} = D_{ш} = 1; B_{ш} = C_{ш} = 0.$$

4. Поезд полностью находится на рельсовой линии, длина поезда меньше длины рельсовой цепи. В этом случае сопротивление поездного шунта будет определяться количеством колесных пар (n), находящихся на рельсовой линии,

то есть $R_{шш} = \frac{0,06}{n}$. Длины РЛ1 и РЛ2 равны L_{12} .

Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = \text{ch}^2(\gamma L_{12}); N_2 = \text{sh}^2(\gamma L_{12});$$

$$N_3 = N_4 = \text{sh}(\gamma L_{12}) \cdot \text{ch}(\gamma L_{12}),$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{ш} = D_{ш} = \operatorname{ch}^2(\gamma L_{12}) + \operatorname{sh}^2(\gamma L_{12}) + \\ + \operatorname{sh}(\gamma L_{12}) \operatorname{ch}(\gamma L_{12}) \frac{Z_B}{R_{пш}};$$

$$B_{ш} = Z_B \left(\operatorname{sh}(\gamma L_{12}) \operatorname{ch}(\gamma L_{12}) \left(2 + \frac{Z_B}{R_{пш}} \right) \right);$$

$$C_{ш} = \frac{1}{Z_B} \left(\operatorname{sh}^2(\gamma L_{12}) + \operatorname{sh}(\gamma L_{12}) \operatorname{ch}(\gamma L_{12}) + \frac{\operatorname{ch}^2(\gamma L_{12})}{R_{пш}} \right).$$

Заключение

Модель изменения параметров сигнального тока на входе путевого приемника в динамике движения подвижной единицы по рельсовой цепи позволяет решать следующие аналитические и практические задачи.

1. Расчет коэффициента чувствительности рельсовой цепи к фактическому поезвному шунту и исследование динамики изменения коэффициента в одних и тех же точках рельсовой линии при воздействиях различных дестабилизирующих факторов, следствием которых может стать повышение удельного сопротивления рельсов или изменение удельного сопротивления балласта. При этом возможными причинами отклонений фактических значений от нормативных (расчетных для конкретных условий эксплуатации) у одной рельсовой цепи, выявленных при прохождении нескольких поездов (маневровых составов), могут быть отступления от норм содержания рельсовой цепи, а возможными причинами отклонений, выявленных у нескольких рельсовых цепей по маршруту движения только одного поезда (маневрового состава), могут быть загрязнения поверхностей колес.

2. Построение инвариантного к внешним возмущениям [2] классификатора состояний рельсовой цепи, на основе эталонных моделей изменения значений $U_{пп}$ и $I_{пп}$ в процессе движения поезда от момента вступления до момента освобождения рельсовой линии для различных диапазонов значений первичных параметров (сопротивления рельсов — от расчетного значения в сторону увеличения; сопротивления балласта — от минимального расчетного значения (1; 0,5; 0,1 Ом · км в зависимости

от типа и структуры рельсовой цепи) как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения). Эталонные значения $U_{пп}$ и $I_{пп}$ при различных значениях U и I могут быть получены на основании выражений:

$$U = A_{ош} U_{пп} + B_{ош} I_{пп}$$

$$\text{и } I = C_{ош} U_{пп} + D_{ош} I_{пп},$$

где $A_{ош}$, $B_{ош}$, $C_{ош}$, $D_{ош}$ — коэффициенты общего четырехполюсника рельсовой цепи в шунтовом режиме, полученного путем объединения всех входящих в схему замещения четырехполюсников.

3. Организация непрерывного мониторинга состояния рельсовых цепей (шунтовой чувствительности) с целью своевременного выявления критических значений дестабилизирующих факторов или критических условий функционирования. ▲

Библиографический список

1. Тарасов Е. М. Принцип построения классификатора состояний рельсовых линий множеством информативных признаков / Е. М. Тарасов // Известия Транссиба. — 2012. — № 1(9). — С. 112–118.
2. Track Circuit Shunting Performance Study // Research Results 21-13. — July 2021. — 4 p. — U. S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development, and Technology. — URL: <https://trid.trb.org/View/1869604>.
3. Zhang Zh. Analysis and Research on Poor Shunting of Track Circuits in High-speed Railway Stations Based on Computer Technology / Zh. Zhang, M. Shi, R. Wang // BTCS 2020. Journal of Physics: Conference Series, 1648 (2020), 042023. — DOI: 10.1088/1742-6596/1648/4/042023.
4. Швалов Д. В. Алгоритмы принятия решений для автоматизированного выполнения и планирования работ по проверке рельсовых цепей на шунтовую чувствительность / Д. В. Швалов // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 19–32. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-19-32.
5. Пат. RU 2 369 507 C1. МПК В61L 23/16. Способ и устройство определения сопротивления поездного шунта / Ю. И. Полевой, А. В. Вайшнарас; патентообладатель государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС) (RU). — Заявка № 2008112324/11; приоритет изобретения 31.03.2008; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.

6. Брылеев А. М. Устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, В. А. Шишляков, Ю. А. Кравцов. — М.: Транспорт, 1966. — 264 с.
7. Пат. RU 2 750 137 С1. МПК G01R 27/04, B61L 23/00. Способ дистанционного измерения сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133742; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 22.06.2021, Бюл. № 18.
8. Пат. RU 2 744 490 С1. МПК B61L 23/00. Устройство измерения переходного сопротивления между каждой колесной парой и рельсами / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133744; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 10.03.2021 Бюл. № 7.
9. Пат. RU 2 745 713 С1. МПК G01R 27/02. Способ автоматического измерения сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133740; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 30.03.2021, Бюл. № 10.
10. Пат. RU 2 747 077 С1. МПК G01R 27/04, B61L 25/02. Система мониторинга ложной свободности рельсовой цепи и сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133736; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 26.04.2021, Бюл. № 12.
11. Пат. RU 2 748 742 С1. МПК G01R 27/04. Способ измерения сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133745; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 31.05.2021, Бюл. № 16.
12. А. с. на изобретение № 48523. Приспособление к дрезинам и т. п., служащее для повышения шунтового эффекта при проходе их по рельсовым цепям / Е. В. Курдюмов. — Заявл. 10 марта 1936 г. (спр. о. перв. № 188845); опубл. 31 августа 1936 г.
13. Пат. SU 1 141 035 А1. МПК B61L 23/16. Рельсовая цепь / Ю. В. Соболев, А. С. Капуста, П. П. Золочевский и др.; патентообладатель Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта им. С. М. Кирова (SU). — Заявка № 3615631/27-11; приоритет изобретения 30.06.1983; опубл. 23.02.1985, Бюл. № 7.
14. А. с. №. 356185. МПК B61L 3/12. Устройство локомотивной сигнализации / В. Г. Дудин. — Заявка № 1408291/18-24; приоритет изобретения 25.11.1970; опубл. 23.10.1972, Бюл. № 32.
15. Пат. RU 2 311 307 С1. МПК B60T 8/1761, B60T 8/62. Устройство для управления торможением поезда / Б. Д. Никифоров, М. Д. Рабинович, В. М. Абрамов и др.; патентообладатель Закрытое акционерное общество «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий» (ЗАО «ОЦВ») (RU). — Заявка № 2006120294/11; приоритет изобретения 09.06.2006; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.
16. Пат. RU 166457 U1. МПК E01B 31/17. Устройство для очистки поверхности катания ходовых рельсов / А. В. Пультяков, В. П. Мартыновский, А. Ф. Наталин и др.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВПО ИрГУПС) (RU). — Заявка № 2016121750/11; приоритет изобретения 01.06.2016; опубл. 27.11.2016.
17. Пультяков А. В. Обеспечение шунтовой чувствительности электрических рельсовых цепей с помощью устройства для очистки поверхности катания ходовых рельсов / А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов, В. П. Мартыновский и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. — 2018. — Т. 1. — С. 335–338.
18. Ефанов Д. В. Динамические вопросники для организации систем поддержки принятия решений, интегрированных в программные средства диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 1. — С. 101–136. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-101-136.
19. Dong W. Fault Diagnosis for Compensating Capacitors of Jointless Track Circuit Based on Dynamic Time Warping / W. Dong // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. — Vol. 2014, Article ID 324743. — 13 p. — DOI: 10.1155/2014/324743.
20. Qi H. Study on Shunt State of Track Circuit Based on Transient Current / Huan Qi, You-Peng Zhang, Bin Zhao // WSEAS Transactions on Circuits and Systems, E-ISSN: 2224-266X. — 2015. — Vol. 14. — Pp. 399–405.
21. Швалов Д. В. Динамическая модель фазочувствительной рельсовой цепи в шунтовом режиме / Д. В. Швалов, Е. П. Плечистова, А. Д. Мамонтова // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской железной дороги (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.). В 2-х ч. Ч. 1; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. — Гомель: БелГУТ, 2022. — С. 234–236.
22. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. — М.: Транспорт, 1990. — 295 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 229–238
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-229-238

Methods of Monitoring the Fulfillment of the Shunt Effect of Track Circuits

Information about author

Shvalov D. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: d_shvalov@mail.ru

Rostov State Transport University, "Railway Automation and Remote Control" Department, Rostov-on-Don

Abstract: The value of the transient resistance "wheel — rail" is the determining factor for ensuring the shunt effect of track circuits. Taking into account the severity of consequences of failure to ensure the shunt effect — accidents or train derailments due to a switch being thrown under a train or opening of a traffic light fencing an occupied track section, continuous monitoring of the condition of track circuits (shunt sensitivity) is necessary for timely detection of critical values of destabilising factors or operating conditions. The article discusses ways to automate measurements of train shunt resistance and ways to prevent shunt loss (non-fulfillment of the shunt effect) by an occupied track circuit. The work also examines the possibility of implementing continuous monitoring of the shunt effect (monitoring of shunt sensitivity) based on a model of changing the values of their parameters during the movement of rolling units along a rail line. The obtained results can be used to solve such analytical and practical problems as: calculation and investigation of the dynamics of change in the sensitivity coefficient of the track circuit to the actual train shunt; construction of a classifier of the track circuit states invariant to external perturbations during the train movement from the moment of entry to the moment of release of the rail line; organisation of continuous monitoring of the shunt sensitivity of the track circuit.

Keywords: track circuit; shunt sensitivity; track circuit model; shunt effect fulfillment; maintenance technology.

References

1. Tarasov E. M. Printsip postroeniya klassifikatora sostoyaniy rel'sovykh liniy mnozhestvom informativnykh priznakov [The principle of constructing a classifier of states of rail lines by a set of informative features]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. 2012, Iss. 1(9), pp. 112–118. (In Russian)
2. Track Circuit Shunting Performance Study. Research Results 21-13, July 2021, 4 p. U. S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development, and Technology. Available at: <https://trid.trb.org/View/1869604>.
3. Zhang Zh., Shi M., Wang R. Analysis and Research on Poor Shunting of Track Circuits in High-speed Railway Stations Based on Computer Technology. *BTCs 2020. Journal of Physics: Conference Series*, 1648 (2020), 042023. DOI: 10.1088/1742-6596/1648/4/042023.
4. Shvalov D. V. Algoritmy prinyatiya resheniy dlya avtomatizirovannogo vypolneniya i planirovaniya rabot po proverke rel'sovykh tsepey na shuntovuyu chuvstvitel'nost' [Decision-making algorithms for automated execution and planning of work on checking rail circuits for shunt sensitivity]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 19–32. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-19-32. (In Russian)
5. Polevoy Yu. I., Vayshnaras A. V. *Sposob i ustroystvo opredeleniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [Method and device for determining the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 369 507 C1, 2009. (In Russian)
6. Bryleev A. M., Shishlyakov V. A., Kravtsov Yu. A. *Ustroystvo i rabota rel'sovykh tsepey* [Construction and operation of rail circuits]. Moscow: Transport Publ., 1966, 264 p. (In Russian)
7. Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sposob distantsionnoy izmereniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [A method for remote measurement of the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 750 137 C1, 2021. (In Russian)
8. Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Ustroystvo izmereniya perekhodnogo soprotivleniya mezhdu kazhdoy kolesnoy paroy i rel'sami* [Device for measuring transient resistance between each wheel pair and rails]. Patent RF, no. 2 744 490 C1, 2021. (In Russian)
9. Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sposob avtomaticheskogo izmereniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [A method for automatically measuring the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 745 713 C1, 2021. (In Russian)
10. Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sistema monitoringa lozhnoy svobodnosti rel'sovoy tsepi i soprotivleniya poezdnoy shunta* [Monitoring system of false freeness of the rail circuit and train shunt resistance]. Patent RF, no. 2 747 077 C1, 2021. (In Russian)
11. Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sposob izmereniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [A method for measuring the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 748 742 C1, 2021. (In Russian)
12. Kurdyumov E. V. *Prisposoblenie k drezinam i t. p., sluzhashchee dlya povyshe-niya shuntovogo efekta pri prokhode ikh po rel'sovym tsepyam* [Adaptation to railcars, etc., serving to increase the shunt effect during their passage along the rail circuits]. A. s. na izobrenenie № 48523, 1936. (In Russian)
13. Sobolev Yu. V., Kapusta A. S., Zolochevskiy P. P. et al. *Rel'sovaya tsep'* [Rail chain]. Patent RF, no. 1 141 035 A1, 1985. (In Russian)
14. Dudin V. G. *Ustroystvo lokomotivnoy signalizatsii* [Locomotive signaling device]. A. s. № 356185, 1972. (In Russian)
15. Nikiforov B. D., Rabinovich M. D., Abramov V. M. et al. *Ustroystvo dlya upravleniya tormo-zheniem poezda* [Device for train braking control]. Patent RF, no. 2 311 307 C1, 2007. (In Russian)
16. Pul'tyakov A. V., Martynovskiy V. P., Natalin A. F. et al. *Ustroystvo dlya ochistki poverkhnosti kataniya khodovykh rel'sov* [A device for cleaning the rolling surface of running rails]. Patent RF, no. 166457 U1, 2016. (In Russian)
17. Pul'tyakov A. V., Skorobogatov M. E., Martynovskiy V. P. et al. Obespechenie shuntovoy chuvstvitel'nosti elektricheskikh rel'sovykh tsepey s pomoshch'yu ustroystva dlya ochistki poverkhnosti kataniya khodovykh rel'sov [Provision of shunt sensitivity of electric rail circuits with the help of a device for cleaning the rolling surface of running rails]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2018, vol. 1, pp. 335–338. (In Russian)
18. Efanov D. V., Khoroshev V. V. Dinamicheskie voprosniki dlya organizatsii sistem podderzhki prinyatiya resheniy, integrirovannykh v programmnye sredstva diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki [Dynamic questionnaires for organizing decision support systems integrated into software tools for diagnosing and monitoring devices of railway automation]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2021, vol. 7, Iss. 1, pp. 101–136. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-101-136. (In Russian)
19. Dong W. Fault Diagnosis for Compensating Capacitors of Jointless Track Circuit Based on Dynamic Time Warping. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, article ID 324743, 13 p. DOI: 10.1155/2014/324743.
20. Qi H., Zhang Y.-P., Zhao B. Study on Shunt State of Track Circuit Based on Transient Current. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, E-ISSN: 2224-266X, 2015, vol. 14, pp. 399–405.
21. Shvalov D. V., Plechistova E. R., Mamontova A. D. Dinamicheskaya model' fazochuvstvitel'noy rel'sovoy tsepi v shuntovom rezhime [Dynamic model of phase-sensitive rail circuit in shunt mode]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy KhII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 160-letiyu Belorusskoy zheleznoy dorogi (Gomel', 24–25 noyabrya 2022 g.). V 2-kh ch. Ch. 1; pod obshch. red. Yu. I. Kulazhenko* [Problems of security in transport: materials of the XII Intern. scientific-practical. conf., dedicated 160th anniversary of the Belarusian Railway (Gomel, November 24–25, 2022)]. In 2 hours. Part 1; under total ed. Yu. I. Kulazhenko. Gomel': BelGUT Publ., 2022, pp. 234–236. (In Russian)
22. Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepenskiy B. M. *Rel'sovye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivanie* [Rail chains. Analysis of work and maintenance]. Moscow: Transport Publ., 1990, 295 p. (In Russian)