

О воздействии характеристик подвижного состава на шунтирующее сопротивление рельсовых цепей



Румен ДИМИТРОВ

Rumen DIMITROV

On the Impact of the Characteristics of Rolling Stock on Shunting Resistance of Rail Circuit

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 62)

Исследовано воздействие комбинации характеристик подвижного состава, включая электрическое сопротивление колёсной пары, нагрузку на ось/колесо, скорость транспортного средства, электрическое сопротивление контакта колесо–рельс. Изучались данные трёх референтных транспортных средств – двухосной дрезины, четырёхосного конвенционального и четырёхосного скоростного локомотивов. Применены два подхода – детерминированный и вероятностный (метод Монте Карло). На их основе обеспечен процесс выявления статического и динамического шунтов для трёх диапазонов скоростей движения и двух степеней загрязнения рельсов изолирующей плёнкой.

Ключевые слова: железная дорога, рельсовые цепи, электрическое сопротивление, статический шунт, динамический шунт, подвижной состав.

Димитров Румен – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, эксперт ООО «ТИНСА», София, Болгария.

Функционирование рельсовых цепей зависит от воздействия комбинации нескольких групп факторов. С одной стороны, это переменные и параметры самих рельсовых цепей, с другой стороны – характеристики подвижного состава и с третьей стороны – факторы, имеющие отношение к состоянию железнодорожного пути.

Часть этих факторов имеет случайный характер, из-за чего расчёт так называемого «шунтирующего импеданса», т.е. шунтирующего полного сопротивления подвижного состава, которое воздействует на рельсовую цепь, представляет собой исключительно сложную задачу.

С точки зрения функционирования рельсовой цепи понятие «шунтирующего импеданса» подвижного состава можно было бы заменить, по мнению автора, понятиями «статического шунта» рельсовой цепи, когда отсутствует движение подвижного состава, и «динамического шунта» – при его движении. Это не очень упрощает поставленную задачу по оценке воздействия подвижного состава на шунтовой режим рельсовой цепи, но позволяет разложить её на отдельные комбинации, которые создают самые неблагоприятные

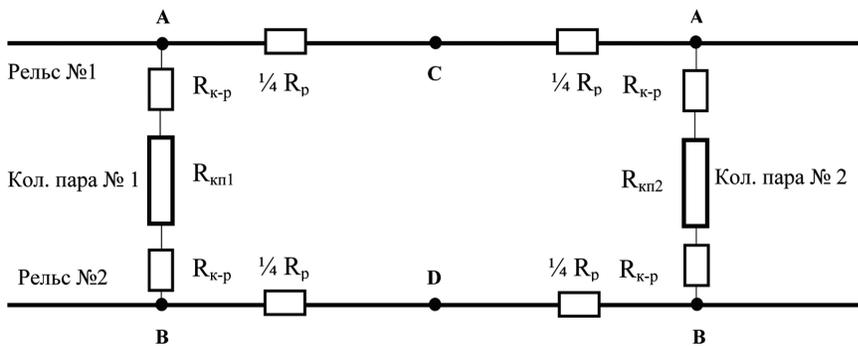


Рис. 1. Эквивалентная схема взаимодействия: $R_{кп1}$ и $R_{кп2}$ – электрическое сопротивление условно обозначенных колёсных пар № 1 и № 2; $R_{к-р}$ – электрическое сопротивление контакта колесо–рельс; R_p – электрическое сопротивление рельсовой петли между точками А–А и В–В при контакте колёсных пар с рельсами.

(граничные) условия её функционирования в этом режиме.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, самое неблагоприятное сочетание переменных рельсовой цепи в шунтовом режиме имеет место зимой при замёрзшем балласте, когда:

- специфическое сопротивление рельсов – минимально;
- специфическое сопротивление изоляции/балласта – максимально;
- напряжение питающего источника – максимально.

В этих условиях сопротивление балласта (изоляция) железнодорожного пути достигает 100–150 Ом • км, что в расчётах рельсовых цепей отождествляется с «бесконечностью». Ток между рельсами практически отсутствует, а для шунтирующего эффекта определяющим является воздействие одной колёсной пары подвижного состава. О специфике воздействия как одной, так и двух, четырёх и более колёсных пар в стационарных условиях, да и во время движения, точных и даже приближённых данных у автора нет. Поэтому предлагаемая статья посвящена исследованию воздействия одной из возможных комбинаций характеристик подвижного состава, которые оказывают влияние на шунтирующий эффект рельсовой цепи. Эта комбинация включает:

- электрическое сопротивление колёсной пары;
- нагрузку на ось/колесо;
- скорость транспортного средства: стационарные условия и движение с низкой/средней/высокой скоростью;

- электрическое сопротивление контакта колесо–рельс.

Для поставленной цели исследуется воздействие следующих референтных транспортных средств:

- двухосного специального самоходного транспортного средства (дрезины типа ДМ) с массой 12,56 т и максимально допустимой скоростью 80 км/ч. Далее это средство будет называться «двухосным самоходным транспортным средством» или «двухосной дрезиной»;
- четырёхосное конвенциональное тяговое средство с массой 84 т и максимально допустимой скоростью 130 км/ч. Далее оно будет идентифицировано как «четырёхосное конвенциональное тяговое транспортное средство» или «четырёхосный конвенциональный локомотив»;
- четырёхосное скоростное тяговое средство с массой 90 т и максимально допустимой скоростью 200 км/ч. Далее это средство будет называться «четырёхосным скоростным тяговым транспортным средством» или «четырёхосным скоростным локомотивом».

Указанные транспортные средства охватывают весь диапазон допустимых в условиях Болгарии скоростей до 200 км/ч, распределённых для целей исследования в трёх поддиапазонах:

- низкие скорости – 0–80 км/ч;
- средние скорости – 80–130 км/ч;
- высокие скорости – 130–200 км/ч.

Для оценки воздействия характеристик подвижного состава на шунтирующий эффект рельсовой цепи предлагаются два подхода:



- детерминированный, который можно отнести к конкретному месту железнодорожной сети и его условиям;

- вероятностный, который можно отнести к железнодорожной сети в целом, когда часть характеристик и переменных рассматриваются как случайные величины или события.

2. ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД

2.1. Двухосные самоходные средства

С учётом специфического сопротивления рельсов для случая двухосного самоходного транспортного средства в зимних, граничных для рельсовой цепи условиях можно использовать эквивалентную схему взаимодействия (рис. 1).

Чтобы не усложнять расчёты, представляется, что в данном случае шунтирующий импеданс (шунтирующее полное сопротивление) колёсной пары (первой/второй) можно заменить шунтирующим активным сопротивлением, не учитывая реактивные составляющие как со стороны подвижного состава, так и рельсовой цепи.

Электрическое сопротивление контакта колесо–рельс в идеальном случае (для стационарных условий без наличия загрязняющей/изолирующей плёнки на рельсах) можно определить по эмпирической формуле:

$$R_{к-р} = k / (0,102 \cdot F_k)^m, \quad (1)$$

где k – константа, которая для контакта «сталь–сталь» равна $3,5 \cdot 10^{-3}$; F_k – сила контактного нажатия (нагрузка на колесо) в N ; показатель степени m для линейного контакта, каким является колесо–рельс, равен 0,6.

Электрическое сопротивление рельсовой петли как критическое значение переменной в шунтовом режиме рельсовой цепи можно принять равным 1 Ом/км. В данном случае длина петли определяется расстоянием между колёсными парами двухосного средства, т.е. 6 м.

Однако на сопротивление контакта колесо–рельс оказывают влияние скорость движения транспортного средства и наличие загрязняющей/изолирующей плёнки на рельсах.

В [2] указано, что во время движения («сталь по стали») из-за неровностей контактных площадок и давления движущегося тела проявляются микроподскоки,

в связи с чем электрическое сопротивление контакта может на 2–3 порядка превышать статическую величину. Для целей исследования будем считать, что при низких скоростях сопротивление контакта увеличивается на два порядка, т.е. в 100 раз, при средних скоростях – между двумя и тремя порядками, в 500 раз, а при высоких скоростях – на три порядка, в 1000 раз.

Наряду с этим существует представление, что наличие изолирующей плёнки из-за загрязнений на рельсах приводит к повышению электрического сопротивления контакта колесо–рельс в 5–10 раз. Для определённости повышение сопротивления от 0 до 5 раз будем называть загрязнением рельсов I степени, а от 6 до 10 раз – II степени. При этом, если имеет место больше одного типа загрязнений (плёнка на рельсах, обусловленная попаданием смазочных материалов, подачей песка во время торможения, коррозией), то будем считать, что они вместе вызывают загрязнения.

Применяя (1) в ходе вычислительных процедур референтной двухосной дрезины, получаем

$$R_{к-р} = 0,02759 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Из рис. 1 следует, что шунтирующее активное сопротивление состоит из электрического сопротивления самой колёсной пары $R_{к1}$ и удвоенного электрического сопротивления контакта колесо–рельс, т.е.: $R_1 = R_{к1} + 2R_{к-р}$, а $R_2 = R_{к2} + 2R_{к-р}$. (2)

На практике это сопротивление между точками А–В (рис. 1). При этом R_1 плюс 1/2 сопротивления R_p рельсовой петли между точками контакта обеих колёсных пар с рельсами (А–А и В–В) оказывается включённым параллельно R_2 плюс 1/2 сопротивления R_p рельсовой петли между теми же точками, т.е. (тривиально):

$$R_{12} = (R_1 + 1/2 R_p) \cdot (R_2 + 1/2 R_p) / ((R_1 + 1/2 R_p) + (R_2 + 1/2 R_p)), \quad (3)$$

где R_{12} является электрическим сопротивлением, которым транспортное средство воздействует на рельсы обеими колёсными парами одновременно. На самом деле это эквивалентное сопротивление шунта транспортного средства, прикладываемое к виртуальным точкам С–D.

Вычислительные процедуры по определению детерминированного шунтирующего воздействия самоходной двухосной

Таблица 1

Шунты	Условия	Состояние рельсов	Сопротивление шунта, Ом	
			Одной колёсной пары	Кол. пара № 1 + кол. пара № 2
Статический	Стационарные	Чистые рельсы	0,0101–0,0501	0,0065–0,0265
		Загрязнение I ст. max	0,0103–0,0503	0,0066–0,0266
		Загрязнение II ст. max	0,0106–0,0506	0,0068–0,0268
Динамический	Низкая скорость движения	Чистые рельсы	0,0155–0,0555	0,0093–0,0293
		Загрязнение I ст. max	0,0376–0,0759	0,0203–0,0403
		Загрязнение II ст. max	0,0652–0,1052	0,0341–0,0541

дрезины на рельсовую цепь при самых неблагоприятных шунтовых условиях выполнены для:

- двух граничных значений электрического сопротивления колёсной пары – 0,01 и 0,05¹ Ом;
- нагрузки на ось/колесо, вычисляемые по (1);
- скорости транспортного средства: стационарные условия и движение в диапазоне допустимых скоростей (в данном случае эта скорость условно считается «низкой»);
- сопротивления контакта колесо–рельс, вычисляемое по (2) и (3).

Дополнительно на шунтирующий эффект оказывает влияние:

¹ Значение 0,05 как допустимая верхняя граница электрического сопротивления колёсной пары указано в Регламенте ЕС № 1302/2014 от 18 ноября 2014 г., а значение 0,01 как контролируемая нижняя граница этого сопротивления – в документе UIC 512 VE.

- наличие изолирующей плёнки на рельсах как максимальное загрязнение I степени. Учитывается увеличением сопротивления контакта колесо–рельс в 5 раз;
- появление изолирующей плёнки на рельсах как максимальное загрязнение II степени. Учитывается увеличением сопротивления контакта колесо–рельс в 10 раз;
- низкая скорость движения. Учитывается как максимальная низкая увеличением сопротивления контакта колесо–рельс в 100 раз.

Наряду с этим должны быть в силе следующие допущения и уточнения:

- отсутствует изолирующее покрытие из окиси на бандажах колёсных пар, которое может иметь место из-за длительного неиспользования последних;
- аппаратура рельсовой цепи отрегулирована в соответствии с действующими регулировочными таблицами и путевое

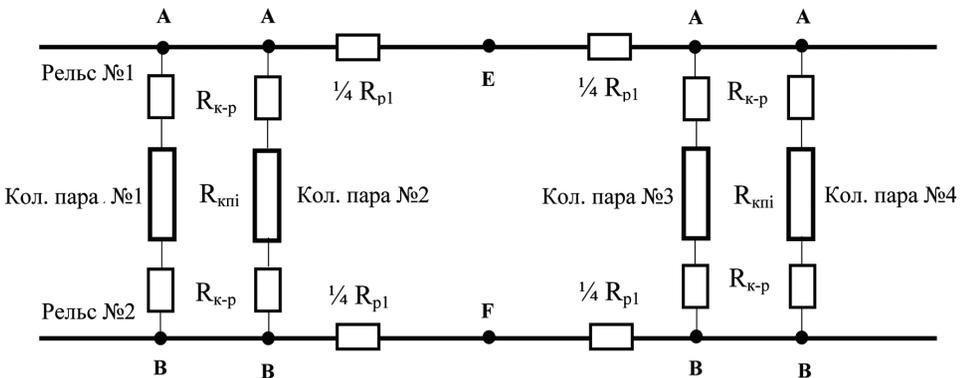


Рис. 2. Эквивалентная схема взаимодействия при наличии локомотива: $R_{кпi}$ – электрическое сопротивление условно обозначенной колёсной пары i ; i принимает значения от 1 до 4; $R_{к-р}$ – сопротивление рельсовой петли между точками А–А и В–В, т. е. между точками контакта с рельсами обеих колёсных пар; $R_{р1}$ – сопротивление рельсовой петли между точками А–А и В–В для каждой из тележек. В данном случае длина рельсовой петли определяется расстоянием между внутренними колёсными парами, т. е. 5 м.



Шунты	Условия	Состояние рельсов	Сопротивление шунта, Ом:		
			Одной колёсной пары	Одной тележки	Тележка 1 + тележка 2
Статический	Стационарные условия	Чистые рельсы	0,0100–0,0500	0,0057–0,0257	0,0041–0,0141
		Загрязнение I ст. тах	0,0101–0,0501	0,0058–0,0258	0,0041–0,0142
		Загрязнение II ст. тах	0,0103–0,0503	0,0058–0,0258	0,0042–0,0142
Динамический	Низкая скорость движения	Чистые рельсы	0,0127–0,0527	0,0071–0,0271	0,0048–0,0148
		Загрязнение I ст. тах	0,0235–0,0635	0,0125–0,0325	0,0075–0,0175
		Загрязнение II ст. тах	0,0371–0,0771	0,0192–0,0392	0,0109–0,0209
	Средняя скорость движения	Чистые рельсы	0,0235–0,0635	0,0125–0,0325	0,0075–0,0175
		Загрязнение I ст. тах	0,0777–0,1177	0,0395–0,0595	0,0210–0,0310
		Загрязнение II ст. тах	0,1453–0,1853	0,0734–0,0934	0,0379–0,0479

реле не функционирует в режиме перегрузки по напряжению/току, что могло бы ухудшить шунтовой режим.

В таблице 1 представлены результаты вычислительных процедур по определению шунтирующего воздействия референтного двухосного транспортного средства на рельсы для самых неблагоприятных зимних условий. В клетках светлосерого цвета результаты имеют только теоретическое и иллюстративное значение, поэтому они без комментария. Клетки темносерые отражают ситуации, когда шунтирующее сопротивление оказывается больше сопротивления нормативного шунта 0,06 Ом.

Сопротивление шунта (граничные значения одной колёсной пары 0,01 и 0,05 Ом и разная максимальная степень загрязнения рельсов) для стационарных условий может быть идентифицировано как «статический шунт» воздействия транспортного средства на рельсовую цепь, а при движении последнего – как «динамический».

2.2. Четырёхосные тяговые транспортные средства

2.2.1. Четырёхосное конвенциональное тяговое ТС

Для референтного четырёхосного конвенционального локомотива сопротивление контакта колесо–рельс $R_{к-р} = 0,01353 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Эквивалентная схема взаимодействия такого локомотива с рельсовой цепью по-

лучается на базе схемы (рис. 1), которая с учётом наличия четырёх колёсных пар (двух двухосных тележек) принимает следующий вид (рис. 2). Однако, чтобы не перегружать рис. 2, по отношению к обеим колёсным парам каждой тележки следует применять рис. 1. Длина петли в этом случае определяется расстоянием между колёсными парами каждой тележки, т.е. 2,8 м.

Для вычисления электрического сопротивления контакта каждой колёсной пары с рельсами применяется (2), а для каждой тележки и обеих тележек одновременно – (3).

Вычислительные процедуры по детерминированному определению шунтирующего воздействия выполнены для следующих дополнительных предпосылок по сравнению со случаем двухосной дрезины:

- условно принимается, что максимальная низкая скорость равна 80 км/ч;
- условно принимается, что максимальная средняя скорость равна максимальной скорости четырёхосного конвенционального локомотива, т.е. 130 км/ч.

Низкая скорость имитируется как при двухосной дрезине, а максимальная средняя скорость – повышением сопротивления контакта колесо–рельс в 500 раз.

Имитируются и дополнительные по сравнению с двухосным средством условия: движение с максимальной средней скоростью по чистым рельсам, а также по мак-

Таблица 3

Шунты	Условия	Состояние рельсов	Сопротивление шунта, Ом:		
			Одной колёсной пары	Одной тележки	Тележка 1 + тележка 2
Статический	Стационарные условия	Чистые рельсы	0,0100–0,0500	0,0058–0,0258	0,0045–0,0145
		Загрязнение I ст. тах	0,0101–0,0501	0,0058–0,0258	0,0045–0,0145
		Загрязнение II ст. тах	0,0103–0,0503	0,0059–0,0259	0,0046–0,0146
Динамический	Низкая скорость движения	Чистые рельсы	0,0126–0,0526	0,0070–0,0270	0,0051–0,0151
		Загрязнение I ст. тах	0,0230–0,0630	0,0122–0,0322	0,0077–0,0177
		Загрязнение II ст. тах	0,0360–0,0760	0,0187–0,0387	0,0110–0,0210
	Средняя скорость движения	Чистые рельсы	0,0230–0,0630	0,0122–0,0322	0,0077–0,0177
		Загрязнение I ст. тах	0,0749–0,1149	0,0382–0,0582	0,0207–0,0307
		Загрязнение II ст. тах	0,1398–0,1798	0,0707–0,0907	0,0370–0,0470
	Высокая скорость движения	Чистые рельсы	0,0360–0,0760	0,0187–0,0387	0,0110–0,0210
		Загрязнение I ст. тах	0,1398–0,1798	0,0707–0,0907	0,0370–0,0470
		Загрязнение II ст. тах	0,2696–0,3096	0,1355–0,1555	0,0694–0,0794

симально загрязнённым рельсам I и II степени.

В таблице 2 представлены результаты вычислительных процедур по определению шунтирующего воздействия референтного четырёхосного конвенционального локомотива на рельсовую цепь. Они относятся к воздействию одной колёсной пары, одновременному воздействию колёсных пар одной тележки и одновременному воздействию колёсных пар обеих тележек.

2.2.2. Четырёхосное скоростное тяговое ТС

Для референтного четырёхосного скоростного тягового транспортного средства сопротивление контакта колесо–рельс $R_{к-р} = 0,01298 \cdot 10^{-3}$ Ом. В этом случае для вычислительных процедур применяется та же эквивалентная схема (рис. 2).

По сравнению со случаем четырёхосного конвенционального локомотива процедуры по детерминированному определению шунтирующего воздействия скоростного локомотива выполнены для максимально высокой скорости 200 км/ч.

Условно принимаемые максимально низкая и максимально средняя скорости имитируются, как и в случае четырёхосного конвенционального локомотива, а условно принимаемая максимально высокая

скорость – повышением сопротивления контакта колесо–рельс в 1000 раз.

Рассматриваются два дополнительных условия: движение с максимально высокой скоростью по чистым рельсам, а также по максимально загрязнённым рельсам I и II степени.

В таблице 3 представлены результаты вычислительных процедур по определению шунтирующего воздействия референтного четырёхосного скоростного локомотива. Они относятся к воздействию одной колёсной пары, одновременному воздействию колёсных пар одной тележки и одновременному воздействию обеих тележек.

3. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД

Вероятностное моделирование шунтирующего воздействия каждого из трёх референтных транспортных средств выполнено в самых неблагоприятных для шунтового режима зимних условиях по методу Монте Карло.

3.1. Двухосные самоходные транспортные средства

Для двухосного самоходного ТС (дрезины типа ДМ) моделирование выполнено в соответствии с эквивалентной схемой рис. 1. Модель предполагает:



Условия	Вероятность (частота) в % для случая отсутствия регистрации шунта:		
	Колёсной пары 1	Колёсной пары 2	Колёсной пары 1 + колёсной пары 2
Стационарные условия, чистые рельсы	0,48–0,82	0,6–0,8	0
Стационарные условия, загрязнение рельсов I степени (случайная величина)	0,48–0,84	0,6–0,8	0–0,02
Стационарные условия, загрязнение рельсов I степени, максимум	0,44–1,14	0,66–0,78	0
Стационарные условия, загрязнение рельсов II степени (случайная величина)	0,52–0,8	0,66–0,84	0
Стационарные условия, загрязнение рельсов II степени, максимум	0,54–0,96	0,56–0,9	0
Низкая скорость (случайная величина), чистые рельсы	0,98–1,36	1,02–1,58	0
Низкая скорость максимум, чистые рельсы	2,06–2,36	2,14–2,26	0
Низкая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов I степени (случайная величина)	4,7–5,16	4,7–5,16	0
Низкая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов I степени, максимум	13,26–13,8	13,26–13,8	0
Низкая скорость максимум, загрязнение рельсов I степени (случайная величина)	13,62–14	13,62–14	0
Низкая скорость максимум, загрязнение рельсов I степени, максимум	41,48–42,42	41,48–42,42	0
Низкая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов II степени (случайная величина)	29,98–30,38	29,16–30,06	0
Низкая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов II степени, максимум	44,46–44,76	43,26–45,96	0
Низкая скорость максимум, загрязнение рельсов II степени (случайная величина)	77,1–78,42	77,52–78,34	0
Низкая скорость максимум, загрязнение рельсов II степени, максимум	98,1–98,15	98,3–98,34	0

- электрическое сопротивление колёсной пары в диапазоне 0,01–0,05 Ом – как случайная величина с нормальным законом распределения²;

- нагрузки на ось/колесо – вычисляются как детерминированное значение для соответствующего типа транспортного средства;

- скорости транспортного средства: стационарные условия и движение со скоростью в диапазоне низких скоростей (0–80 км/ч), рассматривая их как случайные величины с условно принятым нормальным законом распределения³ и как максимальное для диапазона значение;

- сопротивление контакта колесо–рельс – вычисляется как детерминирован-

ное значение для соответствующего типа транспортного средства.

Дополнительно на шунтирующий эффект оказывают влияние:

- изолирующая плёнка на рельсах. Учитывается как случайное и максимальное загрязнение I степени, моделируется увеличением сопротивления контакта колесо–рельс от 0 до 5 раз (случайная величина с условно принятым нормальным законом распределения) и в 5 раз (максимальное загрязнение I степени);

- изолирующая плёнка на рельсах. Учитывается как случайное и максимальное загрязнение II степени, моделируется увеличением сопротивления контакта колесо–рельс от 6 до 10 раз (случайная величина с условно принятым нормальным законом распределения) и в 10 раз (максимальное загрязнение II степени);

- низкая скорость движения. Учитывается как случайно низкая (для всего диапазона низких скоростей 0–80 км/ч)

²На базе результатов проверок, выполненных с участием автора в НИИТ в период 2002–2010 гг. для электрического сопротивления атакующих (передних) колёсных пар пассажирских, грузовых вагонов и самоходных транспортных средств.

³Для построения нормального распределения в электронной таблице EXCEL используется функция NORM.INV(X; Среднее; Стандартное отклонение).

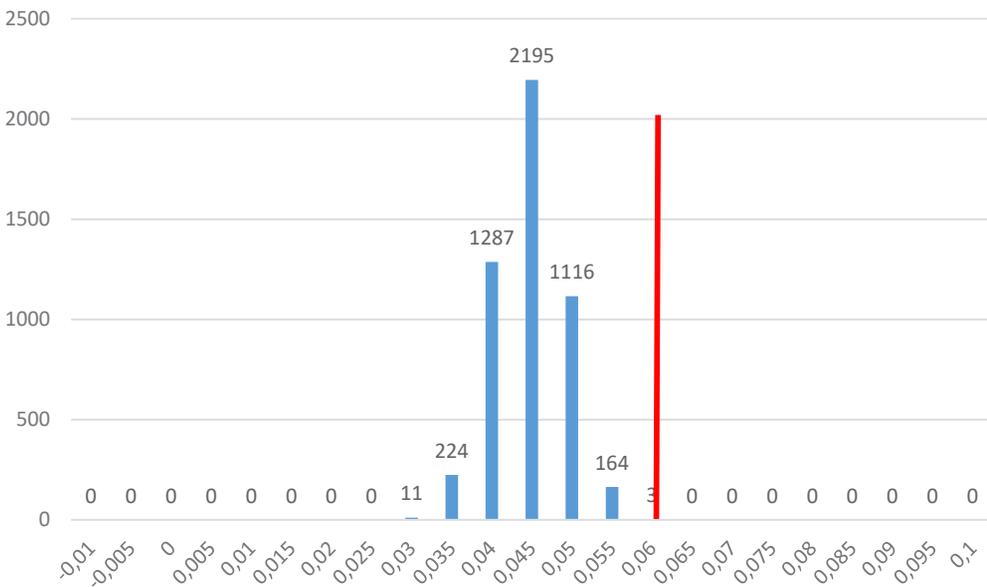


Рис. 3. Низкая скорость максимум, загрязнение рельсов II степени максимум, двухосная самоходная дрезина.

и максимально низкая скорость (для верхней границы диапазона), которые моделируются увеличением сопротивления контакта колесо—рельс от 0 до 100 раз (случайная величина с условно принятым нормальным законом распределения) и в 100 раз — как максимально низкая скорость.

Сделанные в 2.1 допущения остаются в силе.

По указанному методу смоделированы:

- стационарные условия (скорость 0) и чистые рельсы;
- стационарные условия (скорость 0) и загрязнение рельсов I степени (случайная и максимальная величины);
- стационарные условия (скорость равна 0) и загрязнение рельсов II степени (случайная и максимальная величины);
- движение с низкой скоростью (случайная и максимальная величины) при чистых рельсах;
- движение с низкой скоростью (случайная и максимальная величины) и загрязнение рельсов I степени (случайная и максимальная величины);
- движение с низкой скоростью (случайная и максимальная величины) и загрязнение рельсов II степени (случайная и максимальная величины).

Результаты моделирования для 5000 сценариев — как вероятность (частота) в процентах относительно отсутствия ре-

гистрации шунта лишь от колёсной пары 1, от колёсной пары 2 и одновременно от обеих колёсных пар референтного самоходного двухосного средства — представлены в таблице 4, где в клетках серого цвета результаты обладают только теоретическим и иллюстративным значением, а потому не подлежат комментарию.

На рис. 3 представлена гистограмма по результатам вероятностного моделирования шунтирующего эффекта (динамического шунта) двухосной самоходной дрезины для низкой максимальной скорости движения и максимального загрязнения рельсов II степени (при одновременном воздействии обеих колёсных пар). В данном случае вероятность необнаружения шунта практически равна 0%. Вправо от вертикальной линии находится зона недопустимых значений суммы сопротивления колёсных пар и контактов колесо—рельс. Видно, что вершина гистограммы (медiana распределения) относится к сумме сопротивления колёсных пар и контактов колесо—рельс 0,045 Ом, что согласуется с результатом из таблицы 1 для тех же условий.

3.2. Четырёхосные тяговые транспортные средства

Вероятностное моделирование шунтирующего воздействия четырёхосного тягового транспортного средства по сравнению



Условия	Вероятность (частота) в % для случая отсутствия регистрации шунта				
	Колёсной пары 1	Колёсной пары 4	Тележки 1	Тележки 2	Тележки 1 + тележки 2
Стационарные условия ...					
Низкая скорость ...					
Средняя скорость (случайная величина), чистые рельсы	2,8–2,88	2,4–2,52	0	0	0,02–0,04
Средняя скорость максимум, чистые рельсы	8,54–9,08	8,12–9,0	0	0	0
Средняя скорость (случайная величина), загрязнение рельсов I степени (случайная величина)	16,96–17,12	16,2–16,3	0–0,02	0–0,02	0,04–0,06
Средняя скорость (случайная величина), загрязнение рельсов I степени, максимум	42,34–44,08	43,44–44,58	0,040,06	0	0–0,02
Средняя скорость максимум, загрязнение рельсов I степени (случайная величина)	55,62–56,5	55,7–57,16	0,48–0,62	0,44–0,74	0–0,4
Средняя скорость максимум, загрязнение рельсов I степени, максимум	99,84–99,9	99,8–99,88	0,18–0,32	0,2–0,36	0–0,03
Средняя скорость (случайная величина), загрязнение рельсов II степени (случайная величина)	62,98–63,14	63,38–63,7	3,66	3,6–3,74	0–0,04
Средняя скорость (случайная величина), загрязнение рельсов II степени, максимум	75,24–75,96	74,84–75,58	14,44–14,52	14,1–14,84	0,02
Средняя скорость максимум, загрязнение рельсов II степени (случайная величина)	99,98100	99,96	71,58–71,74	71,4	0
Средняя скорость максимум, загрязнение рельсов II степени, максимум	100	100	100	100	0
Высокая скорость (случайная величина), чистые рельсы	9,18–11,02	9,84–10,76	0	0	0
Высокая скорость максимум, чистые рельсы	37,74–40,1	38,74–40,28	0	0	0
Высокая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов I степени (случайная величина)	44,32–44,88	44,04–45,38	3,26–4,36	3,5–4,16	0,02–0,06
Высокая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов I степени, максимум	77,06–78,34	77,62–78,64	20,76–21,9	20,42–21,62	0,04
Высокая скорость максимум, загрязнение рельсов I степени (случайная величина)	80,82–81,8	80,8–81,2	27,94–29,08	27,64–29,24	0–0,08
Высокая скорость максимум, загрязнение рельсов I степени, максимум	100	100	100	100	0–0,3
Высокая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов II степени (случайная величина)	84,38–85,56	84,16–85,5	46,58–48,5	46,84–48,58	2,76–3,58
Высокая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов II степени, максимум	88,06–88,32	88,1–88,32	64,32	64,24–64,32	10,66–10,8
Высокая скорость максимум, загрязнение рельсов II степени (случайная величина)	99,98–100	100	99,52	99,5–99,6	39,68–40,12
Высокая скорость максимум, загрязнение рельсов II степени, максимум	100	100	100	100	100

со случаем двухосного дополнено предпосылками, касающимися позиции скорости транспортного средства — стационарные условия и движение:

- со случайной и максимальной скоростью в диапазоне средних скоростей. Учитываются случайно средняя (для всего диапазона средних скоростей 80–130 км/ч) и максимально средняя скорости (для верхней границы этого диапазона), которые моделируются увеличением сопротивления контакта колесо—рельс соответственно от 100 до 500 раз (случайная величина с условно принятым нормальным законом распределения) и в 500 раз — как максимальная средняя скорость;

- со случайной и максимальной скоростью для диапазона высоких скоростей четырёхосного скоростного локомотива. Учитываются случайно высокая (для всего диапазона высоких скоростей 130–200 км/ч) и максимально высокая скорости (для верхней границы этого диапазона), которые моделируются увеличением сопротивления контакта колесо—рельс от 500 до 1000 раз (случайная величина с условно принятым нормальным законом распределения) и в 1000 раз — как максимально высокая скорость.

Смоделированы следующие дополнительные условия (для соответствующего типа транспортного средства):

- движение со средней скоростью (случайная и максимальная величины) при чистых рельсах;

- движение со средней скоростью (случайная и максимальная величины) и загрязнение рельсов I степени (случайная и максимальная величины);

- движение со средней скоростью (случайная и максимальная величины) и загрязнение рельсов II степени (случайная и максимальная величины);

- движение с высокой скоростью (случайная и максимальная величины) при чистых рельсах;

- движение с высокой скоростью (случайная и максимальная величины) и загрязнение рельсов I степени (случайная и максимальная величины);

- движение с высокой скоростью (случайная и максимальная величины) и загрязнение рельсов II степени (случайная и максимальная величины).

Результаты вероятностного моделирования шунтирующего воздействия на рельсы рельсовой цепи четырёхосного тягового транспортного средства при самых неблагоприятных для шунтового режима зимних условиях даны (таблица 5) только для четырёхосного скоростного локомотива, ибо:

- результаты моделирования для обоих типов локомотивов близки в стационарных условиях низкой и средней скоростью движения, что объясняется близкими значениями сопротивления контакта колесо—рельс;

- для четырёхосного конвенционального локомотива не моделируется высокая скорость движения, которая имеет место при скоростном локомотиве.

Для стационарных условий и низких скоростей результаты не показаны, поскольку они схожи с результатами таблицы 4.

На рис. 4 представлена гистограмма вероятностного моделирования (для 5000 сценариев) шунтирующего эффекта (динамического шунта) четырёхосного скоростного локомотива при высокой скорости движения как случайной величины и загрязнении рельсов II степени как случайной величины при одновременном воздействии колёсных пар обеих тележек. Видно, что вершина гистограммы (медiana распределения) относится к сумме сопротивления колёсных пар и контактов колесо—рельс 0,03 Ом. Значения в двух концах гистограммы (особенно отрицательные на левом конце) являются естественным результатом применения метода Монте Карло.

Рис. 5 представляет гистограмму вероятностного моделирования шунтирующего эффекта (динамического шунта) четырёхосного скоростного локомотива при высокой максимальной скорости движения и максимальном загрязнении рельсов II степени при одновременном воздействии колёсных пар обеих тележек. В данном случае вероятность необнаружения шунта обеих тележек равна 100%. При этом сумма сопротивления колёсных пар и контактов колесо—рельс заметно выше нормативного значения 0,06 Ом (в более 2/3 сценариев оно равняется 0,075 Ом, а в остальной 1/3 — 0,08 Ом, что согласуется с результа-



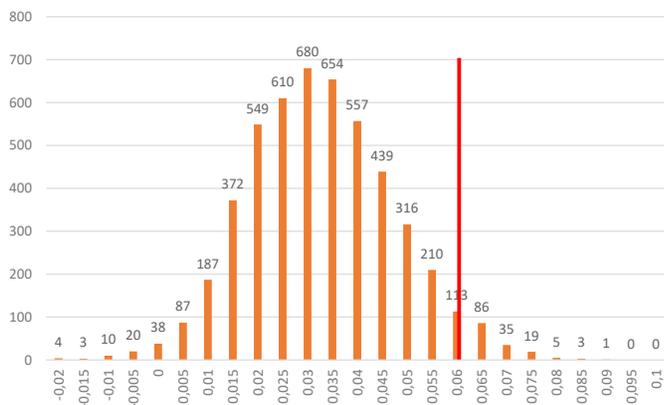


Рис. 4. Высокая скорость (случайная величина), загрязнение рельсов II степени (случайная величина), четырёхосный локомотив.

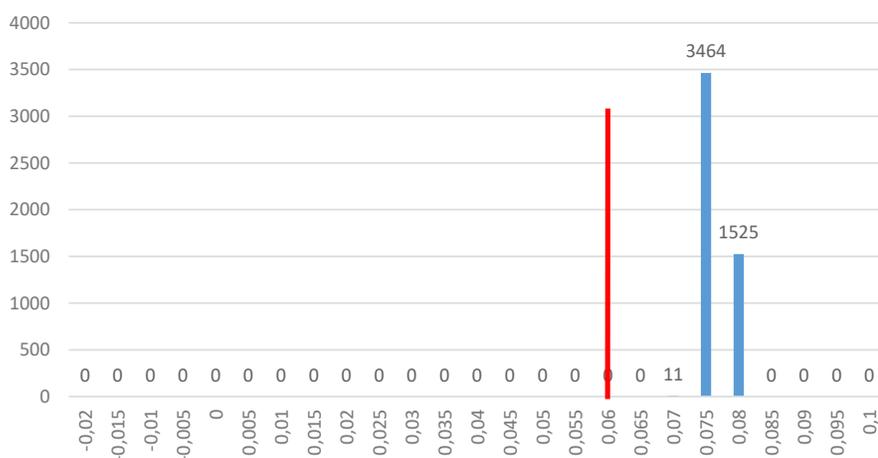


Рис. 5. Высокая скорость максимум, загрязнение рельсов II степени максимум, четырёхосный локомотив.

тами из таблицы 2 для тех же условий). Правее разделительной вертикальной линии находится зона недопустимых значений суммы сопротивления колёсных пар и контактов колесо—рельс.

4. ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из таблиц 1 и 4 следует:

1. В стационарных условиях при чистых рельсах, а также при загрязнении рельсов I и II степени (от случайного до максимального значений) для реализации шунтирующего эффекта двухосного самоходного транспортного средства (дрезины) достаточно воздействия на рельсы только одной колёсной пары. Статический шунт в этих условиях будет выявляться гарантированно с вероятностью 100%.

2. При низкой скорости движения (в диапазоне допустимых для дрезины скоростей), I и II степени загрязнения рельсов (от случайного до максимального значений) сопротивление шунта от одной колёсной пары двухосной дрезины превышает значения нормативного шунта с вероятностью от 1% до приблизительно 100%. Динамический шунт в этих условиях будет выявляться гарантированно с вероятностью 100% только под воздействием обеих колёсных пар одновременно.

Таблицы 2, 3 и 5 приводят к следующим выводам:

1. В стационарных условиях при чистых рельсах, а также при загрязнении рельсов I и II степени (от случайного до максимального значений) для реализации шунтирующего эффекта четырёхосного конвенцио-

нального и четырёхосного скоростного тягового транспортного средства (локомотивов) достаточно воздействие на рельсы только одной колёсной пары. Статический шунт в этих условиях будет выявляться гарантированно с вероятностью 100 %.

2. При низкой и средней скорости движения (до 80 и до 130 км/ч), чистых рельсах, а также при I и II степени максимального загрязнения рельсов шунтирующий эффект четырёхосного конвенционального и четырёхосного скоростного локомотивов будет гарантирован – динамический шунт в этих условиях проявит себя с вероятностью 100 %.

3. При высокой скорости движения (200 км/ч), чистых рельсах, а также максимальном загрязнении рельсов I степени (от случайного до максимального значений) шунтирующий эффект четырёхосного скоростного локомотива обеспечивается при одновременном воздействии на рельсы всех его колёсных пар, т.е. динамический шунт в этих условиях будет выявляться с вероятностью 100 %.

4. При высокой скорости движения (200 км/ч) и II степени загрязнения рельсов (от случайного до максимального значений) вероятность необнаружения шунта от одновременного воздействия на рельсы всех колёсных пар локомотива – от 40 % до 100 %. В этих условиях шунтирующий эффект от четырёхосного скоростного локомотива не гарантирован, динамический шунт не будет выявляться.

5. На участках с рельсовыми цепями при II степени загрязнения рельсов движение одиночного четырёхосного скоростного локомотива со скоростью близкой к 200 км/ч в пределах такой рельсовой цепи недопустимо. В подобных условиях скорость локомотива следует снизить до средней (в случае 130 км/ч), тогда динамический шунт будет выявляться с вероятностью 100 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Критической по отношению к шунтовому режиму рельсовой цепи является эксплуатация её зимой.

2. Переходное сопротивление контакта колесо–рельс при чистых рельсах и отсут-

ствии окиси на бандажах колёсных пар более чем на три порядка ниже электрического сопротивления одной колёсной пары.

3. «Статический шунт» отличается существенно от «динамического шунта». В частности: а) в стационарных условиях изолирующая плёнка контакта колесо–рельс не снимает гарантии надёжного шунтирующего эффекта одной колёсной пары двухосного самоходного или четырёхосного тягового средства; б) рискованной в отношении гарантий шунтирующего эффекта от одиночного двухосного самоходного или четырёхосного тягового транспортного средства является комбинация изолирующей плёнки на рельсах и скорости движения этого средства, особенно высокой.

4. При движении двухосной дрезины или четырёхосного локомотива и наличии изолирующей плёнки на рельсах переходное сопротивление контакта колесо–рельс может стать соизмеримым или даже выше электрического сопротивления одной колёсной пары. Из-за этого сумма их сопротивлений в состоянии значительно превысит сопротивление нормативного шунта 0,06 Ом, что не даст гарантий надёжного шунтирующего эффекта в разных обстоятельствах, условиях и вариантах эксплуатации рельсовой цепи и транспортного средства.

5. Случайные состояния загрязнения рельсов, случайные по величине скорости движения и случайные значения электрического сопротивления одной колёсной пары транспортного средства можно отнести к железнодорожной сети в целом. Максимальные загрязнения рельсов, максимальные скорости движения и максимальное электрическое сопротивление одной колёсной пары можно точно так же отнести к реальному, предварительно идентифицированному месту железнодорожной сети и реальному транспортному средству.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрический справочник: в 3-х т. – Т. 2: Электротехнические устройства. – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с.

2. Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. О разнице между статической и динамической силами трения // Физика твёрдого тела. – 1993. – Том 35. – № 4. [Электронный ресурс]: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14873>. Доступ 06.09.2018.

Координаты автора: **Димитров Р.** – rudimitrov@mail.bg.

Статья поступила в редакцию 06.09.2018, принята к публикации 20.09.2018.

