



Анализ электромагнитной совместимости рельсовых цепей и тягового электроснабжения



Юрий ЗЕНКОВИЧ
Yuri I. ZENKOVICH

Александр ИВАНЕНКО
Alexander A. IVANENKO



Зенкович Юрий Иосифович – заслуженный изобретатель России, кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Иваненко Александр Александрович – начальник технического отдела департамента безопасности движения ОАО «РЖД», Москва, Россия.

Analysis of Electromagnetic Compatibility of Track Circuits and Traction Power Supply

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 44)

Рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости устройств тягового электроснабжения с рельсовыми цепями при гололёдных явлениях на контактном проводе. Приводятся расчетные соотношения для определения значения токов подмагничивания дроссель-трансформаторов при электрической дуге, возникающей вследствие образования наледи на контактном проводе, а также анализируются причины ложной занятости рельсовых цепей на станции.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ложная занятость, рельсовая цепь, электрическая дуга, коэффициент асимметрии, тяговый ток, контактный провод, удельное сопротивление рельсов.

На участках железных дорог при электротяге переменного тока наблюдаются случаи ложной занятости рельсовых цепей при обледенении контактного провода. Как правило, они имеют место на станциях и очень редко на перегонах.

Ложная занятость наступает из-за воздействия тягового тока на аппаратуру рельсовых цепей и проявляется при приближении поезда к входному сигналу станции, когда внезапно разрешающий сигнал входного светофора перекрывается на запрещающее показание перед вступлением поезда на установленный для него маршрут движения по станции. В результате этого машинист может проехать запрещающее показание входного светофора, что квалифицируется как нарушение правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта.

Проведём подробный анализ причин возникновения таких сбоев в работе устройств СЦБ в период гололёдных явлений на контактном проводе. На рис. 1 представлена схема тягового электроснабжения электроваза, включающая в себя тяговую подстанцию ТП, рельсовые цепи 1РЦ-3РЦ с дроссель-трансформаторами ДТ, к вторичным обмоткам которых подключается аппаратура

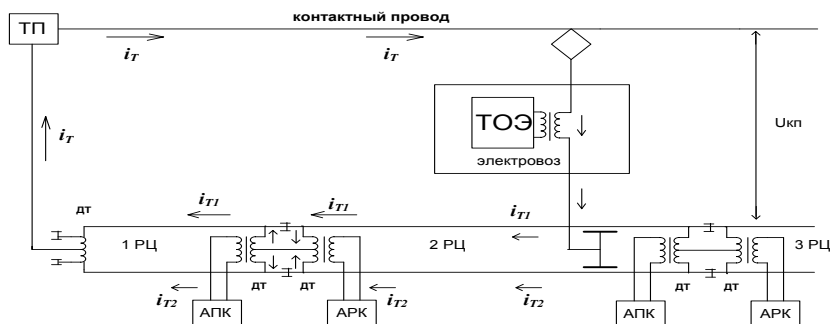


Рис. 1.

питающего конца АПК рельсовой цепи и аппаратура релейного конца АПК. На рис. 1 показаны также схема токосъёма электровоза с тяговым оборудованием электровоза (ТОЭ) и тяговые токи i_T , i_{T1} , i_{T2} , протекающие через контактный провод и по рельсам, причём $i_T = i_{T1} + i_{T2}$.

При образовании наледи на контактном проводе между лыжей пантографа электровоза и контактным проводом возникает электрическая дуга [1]. Для анализа условий возникновения дуги может быть использована электрическая схема замещения тягового электроснабжения электровоза в виде, представленном на рис. 2, где L — эквивалентная индуктивность трансформатора тяговой подстанции ТП и трансформатора электровоза. Сопротивление контактного провода и рельсов обратной тяговой сети можно считать активной величиной r , так как их индуктивность во много раз меньше величины L . Переключателем П будет имитироваться процесс вступления электровоза на участок с наледью на контактном проводе и, следовательно, переходный процесс, вызывающий зажигание электрической дуги, напряжение на которой обозначено U .

На рис. 3 показана приближенная кусочно-линейная аппроксимация характеристики электрической дуги. До тех пор, пока напряжение между графитовой вставкой полоза токоприемника электровоза и контактным проводом не достигнет величины U_p , дуга не горит и электрическая цепь при включенном рубильнике П (рис. 2) разорвана. При повышении напряжения на дуге до значения U_1 дуга зажигается и на ней устанавливается напряжение U_2 . Снижение напряжения со значения U_1 до U_2 происходит не мгновенно, однако при низкой частоте источника $U_{кп}$, равной 50 Гц, и при упрощенном рассмотрении задачи без учёта инерционности дуги можно этим временем пренебречь и считать,

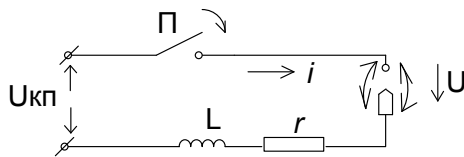


Рис. 2.

что сразу после зажигания дуги на ней устанавливается напряжение U_2 . Напряжение на дуге U_2 остаётся неизменным, вплоть до момента, когда ток в цепи проходит через нуль и дуга гаснет. Если за начало отсчёта времени выбрать момент зажигания дуги, то переходный процесс в электрической цепи схемы (рис. 2) будет характеризоваться следующими параметрами:

$$U_{кп} = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha_n) - U_2, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha_n = \arcsin\left(\frac{U_1}{U_m}\right).$$

В этом случае ток переходного процесса для $i > 0$ может быть представлен в виде:

$$i = \frac{U_m}{z} \cdot \left[\frac{\sin(\omega t + \alpha_n - \phi) - \frac{U_2}{U_m}}{e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\alpha_n - \phi)} \right] - \frac{U_2}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2)$$

$$\text{где } \phi = \arctg(\omega L / r), \quad z = \sqrt{(\omega L)^2 + r^2}, \quad \tau = L / r.$$

На рис. 4 представлены графики зависимости напряжения $U_{кп}$ и тока i , а также напряжения на дуге $U = \pm U_2$. Как видно из графика, установившийся режим тока i в интервале времени от 0 до 1 определяется изменяющимся во времени напряжением $U_{кп}$, которое не достигает значения U_1 и описывается уравнением (2). Интервалы погасания дуги между токами 1–2 и 3–4 зависят от параметров электрической цепи и могут быть сведены к нулю, то есть электрическая дуга может гореть непрерывно. Условием непрерывного горения в этом случае является соотношение между напряжениями в точке 1 (рис. 4) когда $U_3 \geq U_1$, что, в свою очередь, зависит от амплитуд-



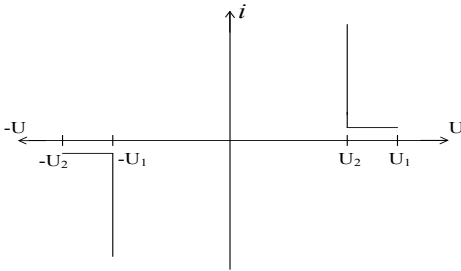


Рис. 3.

ного значения U_m на контактом проводе и индуктивности L .

При достаточно больших значениях L и U_m дуга может гореть непрерывно. Рассмотрим условия, при которых это будет происходить.

Если при $i = 0$ напряжение $U = |U_3| \geq |-U_1|$, то дуга горит без перерывов, а точки 1 и 2, 3 и 4 соответственно сливаются в одну. В этом случае установившийся режим наступит, когда угол α_n изменится и примет некоторое наибольшее значение α_m .

Напряжение источника, при котором изменяется полярность тока дуги, также увеличится до некоторого значения $U > |-U_1|$.

Величина α_m может быть определена из условия, что время между моментами зажигания дуги и прохождения тока через нуль равно половине периода π . В этом случае будем иметь:

$$\frac{U_m}{z} \left[\frac{\sin(\alpha_m - \varphi + \pi) - \frac{\pi}{\omega \cdot \tau} \sin(\alpha_m - \varphi)}{e^{\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}}} \right] - \frac{U_2}{r} (1 - e^{\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}}) = 0, \quad (3)$$

откуда:

$$\alpha_m = \varphi - \arcsin \left(\frac{U_2 \cdot z \cdot (1 - e^{\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}})}{U_m \cdot r \cdot (1 + e^{\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}})} \right). \quad (4)$$

При существующих значениях индуктивности L и напряжения контактной сети тягового электроснабжения дуга горит непрерывно. Однако процесс непрерывного горения не может вызывать сбои в работе устройств СЦБ, так как ток i не содержит постоянной

составляющей, а от высших гармонических составляющих этого тока имеется достаточно надёжная защита, основанная на применении синхронных фазочувствительных приёмников типа ДСШ [2], в которых путевые и местные цепи питаются от разных и независимых источников питания.

В то же время следует отметить, что электрическая дуга сопровождается мощным тепловым процессом, который выбрасывает в окружающую среду огромное количество тепла. Выделяемая электрическая мощность в среднем составляет от 50 до 100 кВА. Такая энергия способна мгновенно расплавить лёд в окрестности полоза токоприёмника и восстановить контакт в системе электроснабжения электровоза, то есть погасить электрическую дугу. После погасания дуги и остывания элементов токоёма электровоза при его непрерывном движении происходит снова наезд на налесь контактного провода и зажигание электрической дуги. Таким образом, во время движения электровоза происходят периодическое включение и выключение электрической дуги и связанный с этими явлениями процесс коммутации переменного тока с накопителями энергии.

Известно, что при включении синусоидального напряжения в электрической цепи, содержащей индуктивность L и активное сопротивление r (рис. 2), образуется переходный процесс, при котором ток i будет содержать вынужденную i_e и свободную составляющую i_{ce} :

$$i = i_e + i_{ce}. \quad (5)$$

При этом i_e определяется из выражения:

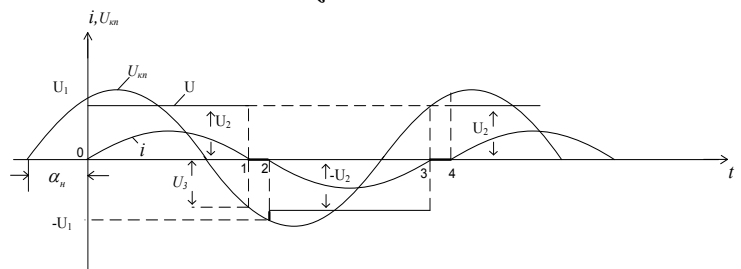
$$i_e = \frac{U_m}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (6)$$

$$\text{где } z = \sqrt{(\omega L)^2 + r^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}.$$

А свободная составляющая тока i_{ce} может быть рассчитана по выражению:

$$i_{ce} = -\frac{U_m}{z} \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7)$$

Рис. 4.



где $\tau = L/r$, ψ — текущее значение фазы синусоидального тока.

Учитывая, что процесс коммутации электрической цепи происходит периодически с некоторым периодом T , который, в свою очередь, зависит от ряда таких факторов, как толщина льда на контактном проводе, скорость движения электровоза, потребляемый электровозом ток и др., то в переменном тяговом токе электровоза образуется некоторое среднее значение постоянной составляющей тока:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{ce}(t) dt. \quad (8)$$

Среднее значение I_{cp} представляет собой постоянный ток, который протекает в обратной тяговой сети наравне с переменным тяговым током i_T . Этот ток I_{cp} проходит через тяговые обмотки дроссель-трансформаторов ДТ (рис. 1) и при наличии асимметрии в рельсовой линии намагничивает магнитную систему дроссель-трансформатора, не имеющую воздушного зазора [3, 4]. В этом случае происходит смещение рабочей точки электромагнитной системы ДТ, и система входит в насыщение, то есть индукция перестаёт изменяться под действием сигнального тока рельсовой цепи, который тоже протекает через обмотку дроссель-трансформатора, но имеет частоту, отличную от частоты тягового тока. В результате процесса дроссель-трансформатор не наводит ЭДС от сигнального тока в дополнительную обмотку, где подключена аппаратура рельсовой цепи, и напряжение на путевых реле падает до напряжения отпускания якоря реле [5]. Это приводит к ложной занятости рельсовой цепи. Необходимо также заметить, что максимальное значение i_{max} тока переходного процесса может составлять удвоенное значение амплитуды вынужденного тока I_m^e (рис. 5).

В эксплуатируемых сейчас рельсовых цепях при электротяге переменного тока асимметрия рельсовой линии оценивается по переменному тяговому току, протекающему через тяговую обмотку дроссель-трансформатора. Установленные нормы на асимметрию по переменному тяговому току

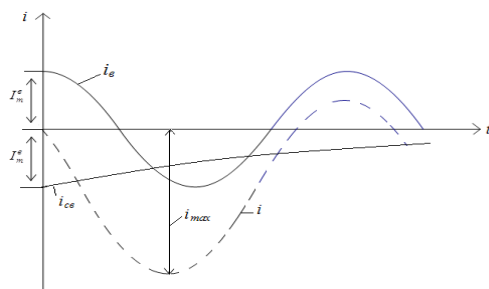


Рис. 5.

обеспечивают устойчивую работу рельсовых цепей в условиях эксплуатации при отсутствии наледи на контактном проводе. Обледенение контактного провода приводит к изменению состава тягового тока, в котором появляется наряду с переменным током частотой 50 Гц и постоянный ток. Причем асимметрия по постоянному току может иметь совершенно другие значения по сравнению с контролируемыми значениями на переменном токе. Это объясняется тем, что, например, при продольной асимметрии рельсовой линии удельное сопротивление рельсов на частоте 50 Гц в 6–8 раз выше, чем удельное сопротивление на постоянном токе. Следует к тому же отметить, что контролировать асимметрию по постоянному току используемыми в эксплуатации измерительными приборами не представляется возможным, да и сама процедура измерения асимметрии по постоянному току не предусмотрена в графике технологического обслуживания рельсовых цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. — М.: Энергия, 1975. — 752 с.
2. Аркатов В. С., Кравцов Ю. А., Степенский Б. М. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание. — М.: Транспорт, 1990. — 295 с.
3. Иваненко А. А., Зенкович Ю. И., Щербина Е. Г. Защита рельсовых цепей от ложной занятости // Автоматика, связь информатика. — 2011. — № 4. — С. 29–31.
4. Кравцов Ю. А., Зенкович Ю. И., Гоман Е. А. и др. Работа рельсовых цепей в условиях гололедообразования на контактном проводе // Автоматика, связь, информатика. — 2004. — № 5. — С. 17–19.
5. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник. — Т. 1. — М.: Планета, 2000. — 960 с.

Координаты авторов: **Зенкович Ю. И.** — zenkovich@bk.ru, **Иваненко А. А.** — ivanenkoAA@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 21.04.2016, принята к публикации 25.08.2016.

