

УДК 656.259

Т.Н. Сердюк

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени акад. В. Лазаряна, Днепропетровск

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В СТАНЦИОННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ

*В работе рассмотрен метод измерения параметров рельсовых цепей и электромагнитных помех в них. Показано распределение электромагнитных помех по длине неоднородной фидерной зоны и оценено их влияние на работу приемников рельсовых цепей.*

**Ключевые слова:** рельсовая цепь, электромагнитные помехи, фидерная зона, измерения.

### Введение

Среди электромагнитных помех, которые возникают в рельсовой сети системы тягового электроснабжения, особого внимания заслуживают импульсные и гармонические помехи, которые содержатся в тяговом токе. Основной причиной появления гармонических и импульсных составляющих в обратном тяговом токе частотой, кратной частоте основной гармоники (50 Гц), является работа выпрямителей тяговых подстанций постоянного тока и электродвигателей подвижного состава, а также пробой изоляции станционных питающих кабелей. В обратном тяговом токе присутствуют также и импульсные помехи, которые возникают в результате коммутационных переключений на тяговых подстанциях, изменения режимов ведения электровазозов, грозовых разрядов. Импульсные и гармонические помехи могут привести к ложной свободности (занятости) секций станции, сбоя кодов и других аварийных ситуаций при исправности аппаратуры рельсовой цепи (РЦ). Таким образом, задача, включающая в себя обеспечение электромагнитной совместимости устройств автоматики с системой тягового электроснабжения на заданном участке и измерение электромагнитных помех в рельсовых цепях, является весьма актуальной.

Анализ электромагнитной совместимости аппаратуры станционных рельсовых цепей с системой тягового электроснабжения включает в себя: определение степени влияния излучения источника на существующую аппаратуру; оценку уровня помех, возникающих в приемнике; нахождение источника и причины возникновения помехи; получение информации об электромагнитной обстановке конкретного месторасположения аппаратуры и восприимчивости приемника.

Для решения поставленной задачи и научного обоснования метода измерения электромагнитных помех в станционных ПЦ необходимо разработать математическую модель системы тягового электроснабжения участков с учетом влияния заземления различных устройств на рельсы и неоднородности

обратной тяговой сети, которая возникает за счет наличия на участке станций и перегонов.

### Математическая модель

Существует ряд математических моделей системы тягового электроснабжения, в которых локальная нагрузка (электровазозы, потребляющие электрическую энергию из контактно сети) заменена равномерно распределенной, что характерно для участков с большой интенсивностью движения поездов [1 – 4]. Поэтому данная работа посвящена разработке математической модели системы тягового электроснабжения грузонапряженных участков, которая послужит научным обоснованием методики автоматизированного измерения помех во время контроля параметров РЦ в процессе технического обслуживания.

Кодовый ток, который протекает в рельсовой цепи, подвержен влиянию всевозможных источников воздействий. При электрической тяге рельсовые линии используются не только в качестве канала для протекания сигнального и кодового тока, а и для пропуска обратного тягового тока. Данная математическая модель построена для случая, когда ток, потребляемый электровазозом, поступая в рельсовую сеть, разветвляется на токи  $I_1$  и  $I_2$ , протекающие в рельсовых линиях. При этом часть обратного тягового тока возвращается на подстанцию не по рельсовым линиям, а через землю. Величина токов утечки определяется удельными проводимостями контуров рельс – рельс, рельсы – земля, контактная сеть – рельсы, контактная сеть – земля.

Гармонический состав тягового тока обычно известен в результате теоретических или экспериментальных исследований. Поэтому можно оценить помеху отдельно для каждой гармоники тягового тока. Но при этом важно знать характер распределения тока каждой гармоники в рельсовых линиях.

Для анализа динамических процессов в электрических цепях предлагается рассматривать рельсовую цепь как шестиполосник, а тяговую сеть – как 2-п-полосник. Такое представление электриче-

скої цепи позволяет учитывать влияние различных источников помех и действие внешних факторов, которые приводят к изменению параметров рельсовой линии и оказывают влияние на работу смежных устройств системы железнодорожной автоматики и телемеханики и линий связи. Для заданной схемы

замещения (рис.1) справедлива следующая система дифференциальных уравнений, составленная с помощью методов контурных токов для внешних и внутренних контуров восьмиполосника, который имеет один поперечный элемент (землю) и базисный узел (б), и метода узловых потенциалов [5]:

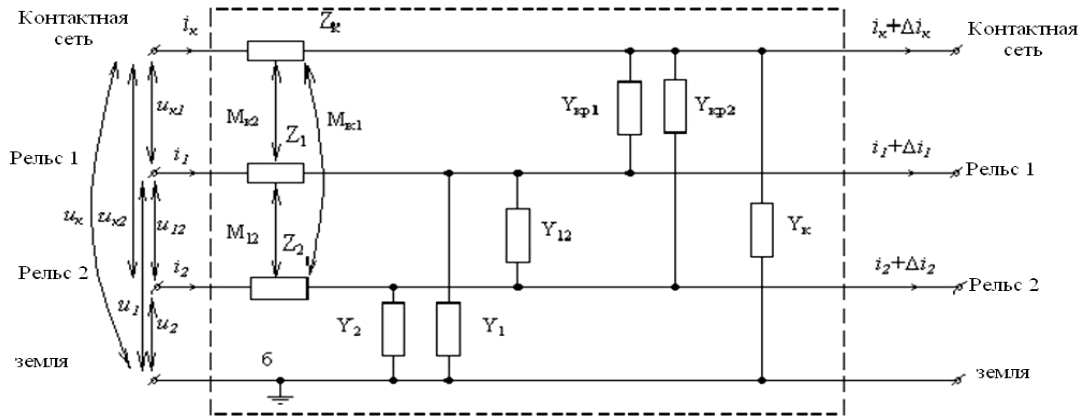


Рис. 1. Схема замещения тяговой сети однопутного участка

$$\begin{cases}
 -\frac{d\dot{U}_k}{dx} = \dot{I}_k \cdot Z_k - \dot{I}_1 \cdot Z_{M1k} - \dot{I}_2 \cdot Z_{M2k}, \\
 -\frac{d\dot{U}_1}{dx} = \dot{I}_1 \cdot Z_1 - \dot{I}_k \cdot Z_{M1k} - \dot{I}_2 \cdot Z_{M12}, \\
 -\frac{d\dot{U}_2}{dx} = \dot{I}_2 \cdot Z_2 - \dot{I}_1 \cdot Z_{M12} - \dot{I}_k \cdot Z_{M2k}, \\
 \frac{d\dot{U}_{12}}{dx} = -\frac{d\dot{U}_1}{dx} + \frac{d\dot{U}_2}{dx}, \\
 \frac{d\dot{U}_{k1}}{dx} = -\frac{d\dot{U}_k}{dx} + \frac{d\dot{U}_1}{dx}, \\
 \frac{d\dot{U}_{k2}}{dx} = -\frac{d\dot{U}_k}{dx} + \frac{d\dot{U}_2}{dx}, \\
 -\frac{d\dot{I}_1}{dx} = \underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_1 + \underline{Y}_{12} \cdot (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) - \underline{Y}_{kp1} \cdot (\dot{U}_1 - \dot{U}_k), \\
 -\frac{d\dot{I}_2}{dx} = \underline{Y}_2 \cdot \dot{U}_2 + \underline{Y}_{12} \cdot (\dot{U}_2 - \dot{U}_1) - \underline{Y}_{kp2} \cdot (\dot{U}_2 - \dot{U}_k), \\
 -\frac{d\dot{I}_k}{dx} = \underline{Y}_k \cdot \dot{U}_k + \underline{Y}_{kp1} \cdot (\dot{U}_k - \dot{U}_1) - \underline{Y}_{kp2} \cdot (\dot{U}_k - \dot{U}_2),
 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_k, \dot{U}_{12}, \dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}$  – комплексные значения падений напряжения на 1 км длины контуров: рельс1 – земля, рельс2 – земля, контактная сеть – земля, рельс 1 – рельс 2, контактная сеть – рельс 1, контактная сеть – рельс 2, соответственно, В;  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_k$  – комплексные значения на 1 км длины в контурах рельс1 – земля, рельс 2 – земля, контактная сеть – земля соответственно, А;  $Z_1, Z_2, Z_k$  – комплекс удельных сопротивлений в тех же контурах соответственно, Ом/км;  $Z_{M1k}, Z_{M2k}, Z_{M12}$  – комплекс сопротивлений взаимоиндукции в контурах контактная сеть – рельс 1, контактная сеть – рельс 2, рельс 1 – рельс 2, соответственно, Ом/км;  $\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \underline{Y}_k, \underline{Y}_{12}, \underline{Y}_{kp1}, \underline{Y}_{kp2}$  – комплекс удельных

проводимостей для контуров: рельс1 – земля, рельс2 – земля, контактная сеть – земля, рельс 1 – рельс 2, контактная сеть – рельс 1, контактная сеть – рельс 2, соответственно, См/км.

Расчеты, которые проводятся для участков с локально сосредоточенной нагрузкам, разрешают получить значение напряжения и тока в рельсах для определенного момента времени. В общем случае напряжение и ток уменьшаются по мере отдаления от локомотива, а их изменение носит экспонентный характер. Для определения средней величины тока на участке за определенный период времени необходимо применять метод наложения, который разрешает получить результирующую диаграмму путем алгебраического суммирования ординат отдельных диаграмм.

При расчетах тяговых сетей и определении влияния их на работу элементов РЦ, прежде всего, представляют интерес средние за временем величины, поэтому сосредоточенные нагрузки заменяют равномерно распределенным [1]. В результате для определения распределения потенциала  $U_{px}^x$ , амплитуды гармонической составляющей обратного тока  $I_{px}$  и тока утечки  $I_{бх}$  по длине фидерной зоны с двусторонним питанием были получены выражения

$$U_{px}^x = i \cdot \left( r_{из} - Z_B \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{\text{ch} \gamma \cdot ((L/2) - x)}{\text{sh}(\gamma L/2)} \right), \quad (2)$$

$$I_{px} = i \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{\text{sh} \gamma \cdot ((L/2) - x)}{\text{sh}(\gamma L/2)}, \quad (3)$$

$$I_{бх} = -(I_{кх} + I_{px}), \quad (4)$$

где  $i$  – удельная нагрузка, А/км;  $L$  – длина фидерной зоны, км;  $r_{из}$  – сопротивление изоляции между

рельсами и землей, Ом/км;  $Z_B$  – волновое сопротивление рельсовых линий, Ом/км;  $\gamma$  – коэффициент распространения волны, 1/км;  $x$  – текущая координата, км;  $I_{кx}$  – значения тока в контактной сети при известной координате  $x$ , А.

Результаты моделирования распределения падений напряжений и тока в рельсовой линии по длине фидерной зоны частотой 50 Гц, выполненного для станции Запорожье Левое, которая включает в себя неоднородные участки за счет станционного путевого развития (участки 1, 3, 5) и наличия двух перегонов (2, 4), показанного на рис. 2. Для моделирования были взяты сигналы именно этой частоты, поскольку она соответствует частоте кодового тока.

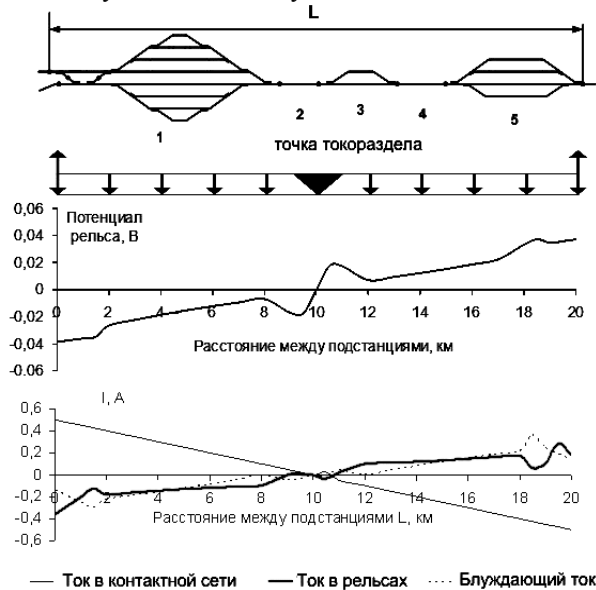


Рис. 2. Результаты моделирования распространения гармонической составляющей частотой 50 Гц по длине фидерной зоны участка Запорожье Левое

Таким образом, зная характер распределения гармонических составляющих по длине фидерной зоны, можно определить причины возникновения помехи (локомотив или оборудование тяговой подстанции), выявить РЦ, которые работают в наихудших условиях, а также определить критические значения параметров РЦ, при которых нарушается ее нормальное функционирование. По результатам моделирования, представленным на рис. 2, в наихудших условиях оказываются РЦ, расположенные вблизи отсасывающих фидеров подстанций.

### Метод измерения помех в рельсовых цепях и обратной тяговой сети

Среди методов измерения электромагнитных помех известны такие, которые базируются на бесконтактных записях кривых токов и напряжений и основываются на однозначной связи тока и магнитного поля, а также те, которые связаны с подключением осциллографа, спектрографа, магнитографа или другого измерительного прибора, к аппаратуре рель-

совых РЦ. В результате измерения в рельсовой цепи выполняются в шунтовом или нормальном режиме, который по обыкновению сопровождается отключением аппаратуры питающего или релейного концов РЦ. В качестве параметра исследования, как правило, принимается максимальное значение высочайшей гармонической составляющей тока и напряжения, при котором обеспечивается ее нормальная работа с сопряженными устройствами и системами.

Наиболее перспективными являются методы измерения электромагнитных помех в рельсовых цепях, которые базируются на непосредственном измерении их уровней и спектрального состава при подключении к аппаратуре РЦ и не требующих прекращения движения поездов для реализации контрольных измерений. Использование таких методов позволяет уменьшить количество отказов в РЦ и повысить надежность их работы.

Предложено выполнять измерение электромагнитных помех в станционных РЦ с фазочувствительным приемником без отключения аппаратуры питающего и релейного концов. Суть метода заключается в подключении измерительного оборудования к путевой обмотке путевого реле типа ДСШ-12 через делитель. Для реализации измерений специально разработано измерительное устройство, предназначенное для ввода аналогового сигнала в компьютер с целью дальнейшей обработки и накопления данных. Амплитуда входного напряжения, которое поступает к измерительному устройству, должна находиться в пределах  $0... \pm 5$  В. Разработанный метод и средства измерения позволяют контролировать параметры сигнального и тягового токов, определять спектральный состав тягового и сигнального тока, уровни и виды помех и оценить не только их влияние на работу аппаратуры РЦ, а также правильность функционирования устройств системы тягового электроснабжения (например, выпрямителей, фильтров тяговых подстанций, аварийных реле, включенных в питающие фидера и отвечающих за переключение питания с основного фидера на резервный).

Структурная схема для проведения измерений параметров рельсовых цепей и электромагнитных помех представлена на рис. 3. Аппаратура питающего конца РЦ подключается через путевой трансформатор ПТ, релейного конца – через сигнальный СТ. Со вторичной обмотки трансформатора СТ, включенного параллельно путевому приемнику ДСШ-12, напряжение через делитель поступает на специально-разработанное устройство – аналого-цифровой преобразователь, который включает в себя блок-коммутатора, усилитель-ограничитель, мультиплексоры, регистры управления и данных и таймер и предназначено для передачи сигнала в персональный компьютер для осциллографирования и анализа параметров сигнального и кодового тока РЦ и определения амплитуды и частоты помех, возникающих в обратном тяговом токе.

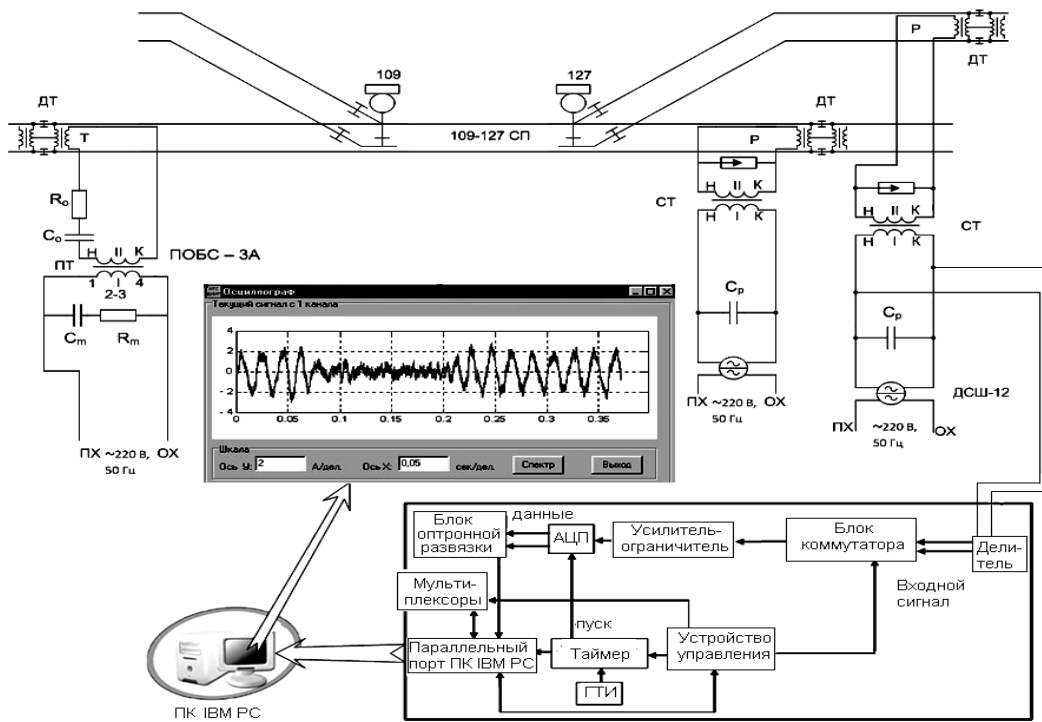


Рис. 3. Структурная схема для реализации измерений параметров сигнального тока и помех в обратном тяговом токе в станционной разветвленной рельсовой цепи

Метод предназначен для использования при проведении регламентных работ при обслуживании электромехаником аппаратур РЦ. Особенность применения предложенного метода - необходимость повышения напряжения на пугевой обмотке путевого реле типа ДСШ-12, АНШ2-4000 и др. к максимально допустимому значению, чтобы предотвратить исключение реле при уменьшении напряжения ниже минимально допустимого значения.

### Экспериментальные исследования

Измерения были проведены на станции Запорожья Левое Приднепровской железной дороги. Участок электрифицирован постоянным тяговым током. Питание участка двустороннее. Для исследований была выбрана рельсовая цепь 109-127СП.

Сначала исследуем 109-127СП. На рис. 4 показаны осциллограмма сигнального тока и гармонических составляющих обратного тягового тока в нормальном режиме работы рельсовой цепи (участок свободен), а также их спектральный состав. Причиной возникновения гармонических составляющих кратных по частоте 50 Гц является работа тяговых двигателей локомотива ВЛ-8 расположенного на соседней рельсовой цепи. Работа рельсовой цепи 109-127СП в нормальном режиме обеспечена, поскольку результирующая величина тока помех незначительна и не совпадает по частоте с сигнальным током. Присутствие помех свидетельствует о наличии асимметрии тягового тока, которая составила 4 % и не превышала допустимой нормы 10-12 %, и говорит о необходимости проверки аппаратуры и

элементов рельсовой цепи. Зафиксированные помехи осуществляют лишь мешающее действие на работу приемника рельсовой цепи ДСШ-12.

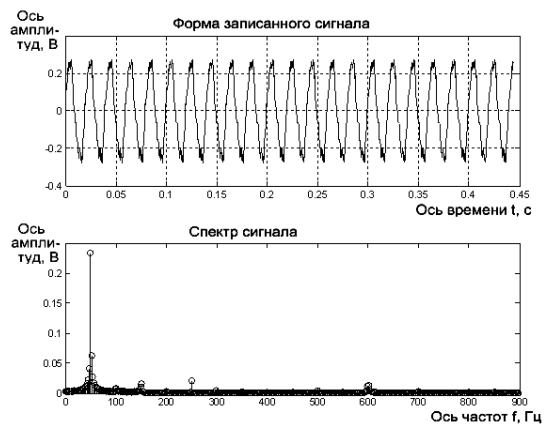


Рис. 4. Осциллограмма напряжения, пропорционального сигнальному току и гармоническим составляющим обратного тягового тока при работе рельсовой цепи 109-127 СП в нормальном режиме и наличии электровоза на соседней секции

Исследование работы указанной РЦ в шунтовом режиме (при наличии поезда на участке) показало присутствие гармонических составляющих кратных 50 Гц с амплитудой в 3-5 раз, превышающей амплитуду гармоник, зафиксированных в нормальном режиме работы РЦ 129-127 СП с электровозом на предыдущей секции (рельсовой цепи). Амплитуда гармонических составляющих превышает значения, зафиксированные в нормальном режиме, поскольку они не ослаблены дроссель-трансформа-

тором. Осциллограммы и спектры сигнального тока и гармонических составляющих обратного тягового тока, измеренные на приемном конце РЦ 129-127 СП в шунтовом режиме, представлены на рис. 5.

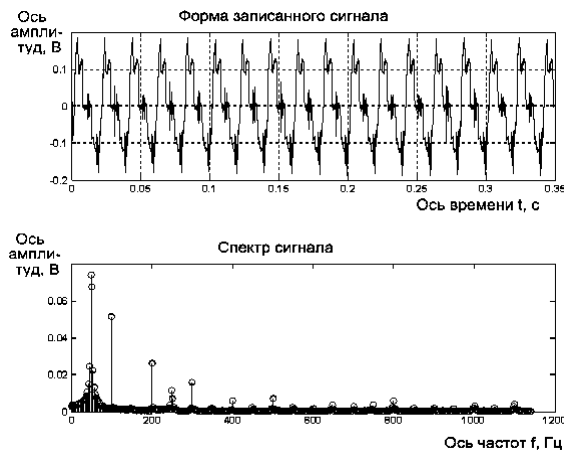


Рис. 5. Осциллограмма и спектр сигнального тока и гармонических помех в обратном тяговом токе при работе рельсовой цепи 109-127 СП в шунтовом режиме

Причиной появления гармоник 50 Гц есть остаточный сигнальный ток из-за плохого контакта при наложении поездного шунта. Работа рельсовой цепи в шунтовом режиме обеспечена, поскольку величина сигнального тока и соответственно напряжения не достаточна для удержания якоря реле ДСШ-12 в притянутом состоянии. И в данном случае амплитуда гармоник 50 Гц не превышала 0,6 В. Таким образом, надежное функционирование рельсовой цепи выполняется, а выявленные помехи оказывают на работу рельсовой цепи лишь мешающее действие.

Экспериментальные исследования были проведены совместно с электромехаником дистанции сигнализации и связи ШЧ-11 Корчевским Ю.П. – ныне выпускником кафедры автоматики, телемеханики и связи Днепрпетровского национального университета имени акад. В. Лазаряна, что подтверждается соответствующим актом.

### Выводы

Разработан метод, который позволяет определять спектральный состав тягового и сигнального тока, уровни и виды помех и оценить их влияние на аппаратуру РЦ. Возможно по результатам спектрального анализа обратного тягового тока контро-

лировать правильность функционирования устройств системы тягового электроснабжения (выпрямителей, фильтров тяговых подстанций, аварийных реле, которые отвечают за переключение фидеров с основного на резервное питание).

Преимуществом предложенного метода является то, что он универсален и может быть использован при определении параметров сигнального и кодового тока, а также помех всех видов станционных и перегонных РЦ без прекращения движения поездов. Недостатком предложенного метода является проведение измерений в отдельно взятой РЦ.

Метод предназначен для использования при проведении регламентных работ по обслуживанию электромехаником СЦБ аппаратуры рельсовых цепей. Особенность применения предложенного метода – необходимость повышения напряжения на путевой обмотке путевого реле типа ДСШ-12, АНШ2-4000 и др. к максимально допустимому значению, чтобы предотвратить обесточивание путевого реле при снижении напряжения ниже минимально допустимого значения.

Предложенный метод и аппаратура апробированы на станции Запорожье Левое Приднепровской железной дороги.

### Список литературы

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К.Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Бадер М.П. Экспериментальное исследование гармонического состава тока в тяговой сети и рельсовых цепях / М.П. Бадер // Межвузовский сборник научных трудов. – М.: МИИТ, 1984. – № 756. – С. 17-20.
3. Котельников А.В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А.В. Котельников, А.В. Наумов, Л.П. Слободянюк. – М.: Транспорт, 1990 – 215 с.
4. Ермоленко Д.В. Улучшение электромагнитного воздействия тиристорного подвижного состава и системы тягового электроснабжения / Д.В. Ермоленко, В.И. Павлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 8. – С. 25-30.
5. Сердюк Т.Н. Взаимодействие системы тягового электроснабжения постоянного тока с рельсовыми цепями / Т.Н. Сердюк, В.И. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – № 4. – С. 108-112.

Поступила в редколлегию 28.05.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. В.К. Иванов, Институт радиопизики и электроники НАН Украины, Харьков.

### ВИМІРЯННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД В СТАНЦІЙНИХ РЕЙКОВИХ КОЛАХ

Т.М. Сердюк

У роботі розглянуто метод вимірювання параметрів рейкових кіл та електромагнітних завад в них. Показано розподіл електромагнітних завад по довжині неоднорідної фідерної зони й оцінено їх вплив на роботу приймачів рейкових кіл.

**Ключові слова:** рейкове коло, електромагнітні переешкоди, фідерна зона, вимірювання.

### MEASUREMENT OF ELECTROMAGNETIC INFLUENCES IN STATION RAIL CIRCUITS

T.N. Serdyuk

The method of measurement of parameters of rail circuits and electromagnetic influences is considered in this paper. The distribution of electromagnetic influences in feeder zone is shown. The influence of its on the work of track's receivers of rail circuits is evaluated.

**Keywords:** clatotype chain, electromagnetic hindrances, feeder area, measurings.