

М. П. БАДЕР (МГУПС)

Кафедра Энергоснабжение электрических железных дорог, Московский государственный университет путей сообщения, ул. Образцова 9, стр. 9, Москва, Российская Федерация, 127994, тел.: (495) 684-22-87, эл. почта: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ИНФРАСТРУКТУРЫ НА УЧАСТКАХ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

### Введение

Мировой опыт показывает, что на участках с высокоскоростными и тяжеловесными поездами с достаточно большим электропотреблением применяется система тягового электроснабжения переменного тока 27,5 кВ, которая имеет очень широкую возможность маневра энергетической эффективностью в зависимости от размеров движения. Так в сравнении с обычной системой электротяги 27,5 кВ система с усиливающими и экранирующими проводами (ЭУП) повышает провозную способность в 1,4 раза, автотрансформаторная система 2х25 кВ – в 1,8 - 1,9 раза. В США, Канаде, ЮАР применяется нетрадиционная система 50 кВ, обеспечивающая при длине межподстанционной зоны 60 км и 10-минутном интервале весовые нормы поездов до 20 тыс. тонн. Дальнейшее увеличение провозной способности может быть достигнуто повышением уровня напряжения питающего провода выше традиционного напряжения 25 кВ – 35, 65, 94, 110 кВ. Возможность реализации систем с нетрадиционным повышенным напряжением в питающем проводе, а также автотрансформаторной системы 2х50 кВ практически полностью снимает ограничения пропускной способности по условиям электроснабжения.

Известно также, что одним из направлений повышения надёжности и эффективности тяговой сети переменного тока является её усиление, так как недостаточность сечения проводов приводит к увеличению потерь энергии и напряжения и связанное с последним показателем снижение скорости движения поездов. В настоящее время наибольшее распространение получили способы усиления тяговой сети за счет включения усиливающих и экранирующих проводов (ЭУП). Определённый эффект даёт также применение устройств ёмкостной компенсации.

Существуют несколько способов повышение энергетической эффективности электрической тяги постоянного тока [1]. Один из них -

это усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ с помощью фидера постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ и пунктов питания контактной сети на перегоне 24/3 кВ. При этом на тяговой подстанции устанавливается дополнительная выпрямительная установка 24 кВ. На пункте питания устанавливается преобразовательный модуль 24/3 кВ, состоящий из автономного инвертора и выпрямительного агрегата 3 кВ, а питающая линия прокладывается по опорам контактной сети

Резко повысить пропускную способность и эффективность электрической тяги постоянного тока позволяет уровень напряжения в тяговой сети постоянного тока 24 кВ [1, 2]. В том числе значительно увеличить расстояние между подстанциями, снизить сечение проводов тяговой сети, уменьшить потери электроэнергии в устройствах электроснабжения, полностью устранить несимметрию питающего напряжения. Всё это и отсутствие индуктивных потерь при постоянном токе может превысить по эффективности все системы переменного тока.

Очередной виток научно-технического прогресса обусловлен бурным развитием силовой электроники и компьютерных технологий. Совершенствование системы электрической тяги и перспективы её развития predetermined необратимым процессом обновления всей системы преобразования энергии, затрачиваемой на перевозочный процесс. Применение преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный ток, тиристорных преобразователей уровня напряжения постоянного тока, создание высокоэкономичных алгоритмов компьютерного управления преобразованием электроэнергии, замена коллекторных двигателей постоянного тока на бесколлекторные асинхронные трехфазного тока составляют основное направление технического перевооружения систем электрической тяги и в настоящее время широко используются в ряде промышленно развитых стран.

© Бадер М. П., 2014

### Основная часть

Новые системы тягового электроснабжения требуют прокладки дополнительных проводов и использования многопроводных линий, поэтому очень важно создать методику расчета распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, что позволит с высокой степенью точности обосновать их электромагнитную совместимость со смежными коммуникациями связи и устройствами железнодорожной автоматики.

Электромагнитная связь линий имеет место при наличии одновременного электрического и магнитного влияний между двумя или несколькими электрически длинными линиями. В электрически длинных линиях напряжения и токи не могут рассматриваться независимыми друг от друга. Они связаны друг с другом через волновое сопротивление соответствующей линии (подобно тому, как электрические и магнитные поля электромагнитных волн связаны друг с другом через волновое сопротивление пространства).

Является ли линия электрически длинной или короткой, определяется во временной и частотной областях по разным критериям [1]: во временной области линия считается электрически длинной, если время нарастания передаваемых по ней импульсов имеет один порядок с временем распространения импульса вдоль линии или даже меньше его, и тем самым напряжение и ток линии зависят от места, т.е.  $u = u(t, x)$  и  $i = i(t, x)$ ; в частотной области линия считается электрически длинной, если комплексные амплитуды импульсов напряжения и

тока зависят от расположения на линии, т.е.  $U = U(x)$  и  $I = I(x)$ . Этот эффект имеет место, если длина волны имеет один порядок с длиной линии или даже меньше ее.

Математическое описание электромагнитной связи в многопроводных системах зависит от очень многих условий, поэтому принципиальный подход вначале проиллюстрируем на двухпроводной системе. Затем формально этот подход распространим на  $(n+1)$  - проводную систему.

На рис. 1 показаны полевая и цепочечная модели двух параллельных линий с общим обратным проводом. Переменное магнитное поле  $H(x, t)$ , связанное с линейным током активного проводящего контура 1 (полезный сигнал), вернее, его поток, пронизывает пассивный соседний проводящий контур 2 и индуцирует там напряжение, которое вызывает в этом контуре индуктивный паразитный ток. Вследствие имеющейся между обеими линиями разности потенциалов существует переменное электрическое поле  $E(x, t)$  которое наводит в пассивной линии емкостный паразитный ток.

Отличие от чисто индуктивной и емкостной связей состоит в том, что при электромагнитной связи величины  $u, i, E$  и  $H$  являются функциями места и времени и, кроме того, связаны между собой волновым сопротивлением соответствующей системы.

При выводе дифференциальных уравнений для напряжений и токов в связанных линиях рассмотрим вначале электрически короткий участок линий длиной  $\Delta x$  (рис. 1, б). Индуцирующее действие магнитного поля мешающей системы моделируется в схеме замещения взаимной индуктивностью  $L'_{12}\Delta x$ , действие электрического поля – емкостью связи  $C'_{12}\Delta x$ .

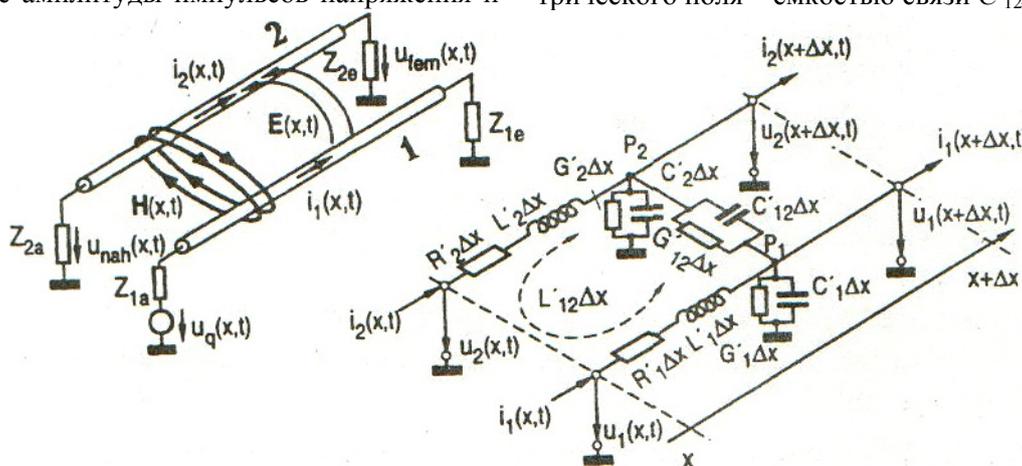


Рис. 1. Полевая (а) и цепочечная модель (б) электромагнитносвязанной двухпроводной системы с общим обратным проводом; 1 - линия, создающая помехи; 2 - линия, воспринимающая помехи;  
 $R' = R/l, L' = L/l, C' = C/l, G' = G/l$  - удельные параметры линий

Применение второго закона Кирхгофа  $\sum u = 0$  к контуру, образованному каждой линией с ее обратным проводом, последующее деление на  $\Delta x$  и, наконец, осуществление предельного перехода  $\Delta x \rightarrow 0$  [1] дают:

для линии 1

$$-\frac{\partial u_1(x,t)}{\partial x} = R'_1 i_1(x,t) + L'_1 \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t} + L'_{12} \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t},$$

а для линии 2

$$-\frac{\partial u_2(x,t)}{\partial x} = R'_2 i_2(x,t) + L'_2 \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t} + L'_{21} \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

Аналогично этому, применяя первый закон Кирхгофа к узлам  $P_1$  и  $P_2$ , получаем для линии 1 и для линии 2 соответственно:

$$-\frac{\partial i_1(x,t)}{\partial x} = (G'_1 + G'_{12}) u_1(x,t) + (G'_1 + G'_{12}) \frac{\partial u_1(x,t)}{\partial t} - G'_{12} u_2(x,t) - C'_{12} \frac{\partial u_2(x,t)}{\partial t},$$

$$-\frac{\partial i_2(x,t)}{\partial x} = (G'_2 + G'_{21}) u_2(x,t) + (G'_2 + G'_{21}) \frac{\partial u_2(x,t)}{\partial t} - G'_{21} u_1(x,t) - C'_{21} \frac{\partial u_1(x,t)}{\partial t}.$$

В этих уравнениях появляются частные производные, как по координате, так и по времени. Переходом из временной области в частотную. То есть, ограничением синусоидальных возбуждений и переходом к комплексным амплитудам, которые содержат коэффициент  $e^{j\omega t}$ , временная зависимость может быть исключена с помощью подстановок

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow j\omega; \quad \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \frac{d}{dx};$$

$$u_i(x,t) \rightarrow \dot{U}_i; \quad i_i(x,t) \rightarrow \dot{I}_i,$$

получаем системы обыкновенных дифференциальных уравнений в частной области:

для линии 1

$$-\frac{d}{dx} \dot{U}_1 = (R'_1 + j\omega L'_1) \dot{I}_1 + j\omega L'_{12} \dot{I}_2;$$

для линии 2

$$-\frac{d}{dx} \dot{U}_2 = j\omega L'_{21} \dot{I}_1 + (R'_2 + j\omega L'_2) \dot{I}_2;$$

(2)

или для линии 1

$$-\frac{d}{dx} \dot{I}_1 = [G'_1 + G'_{12} + j\omega(C'_1 + C'_{12})] \dot{U}_1 - (G'_{12} + j\omega C'_{12}) \dot{U}_2$$

для линии 2

$$-\frac{d}{dx} \dot{I}_2 = (G'_{21} + j\omega C'_{21}) \dot{U}_1 + [G'_2 + G'_{21} + j\omega(C'_2 + C'_{21})] \dot{U}_2 \quad (3)$$

Переходя к матричной записи, можно компактно записать при одновременном сохранении наглядности:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R'_1 + j\omega L'_1) & j\omega L'_{12} \\ j\omega L'_{21} & (R'_2 + j\omega L'_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G'_1 + G'_{12} + j\omega(C'_1 + C'_{12}) & -(G'_{12} + j\omega C'_{12}) \\ -(G'_{21} + j\omega C'_{21}) & G'_2 + G'_{21} + j\omega(C'_2 + C'_{21}) \end{bmatrix}$$

Матрица коэффициентов

$$\begin{bmatrix} (R'_1 + j\omega L'_1) & j\omega L'_1 \\ j\omega L'_{21} & (R'_2 + j\omega L'_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

называется матрицей удельных сопротивлений  $[Z]$ , матрица коэффициентов

$$\begin{bmatrix} G'_1 + G'_{12} + j\omega(C'_1 + C'_{12}) & -(G'_{12} + j\omega C'_{12}) \\ -(G'_{21} + j\omega C'_{21}) & G'_2 + G'_{21} + j\omega(C'_2 + C'_{21}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

–м матрицей полных удельных проводимостей  $[Y]$ .

При помощи этих сокращений системы линейных дифференциальных

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} \quad (7)$$

уравнений (4) могут быть еще более упрощены:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Повторное дифференцирование по координате и взаимная подстановка приводят к обыкновенным дифференциальным уравнениям 2-го порядка для напряжений  $U$  и токов  $I$ ,

$$\frac{d^2}{dx^2} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

После подстановки соответствующих величин и граничных условий по этим уравнениям могут быть определены напряжения и токи в любой точке, в частности, в начале и в конце обеих линий в частотной области [1].

Для многопроводной системы с  $n$  параллельными прямыми проводами и одним общим обратным матрицы удельных полных сопро-

© Бадер М. П., 2014



водной системы в зависимости от напряжений и токов в началах линий,

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \left\{ e^{-\gamma x} \left[ \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{G} \\ \dot{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} \right] + \right. \\ &+ \left. e^{+\gamma x} \left[ \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{G} \\ \dot{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} \right] \right\}, \\ \dot{I}(x) &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{T} \end{bmatrix} \left\{ e^{-\gamma x} \left[ \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{G} \\ \dot{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} \right] - \right. \\ &- \left. e^{+\gamma x} \left[ \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{G} \\ \dot{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}(0) \\ \dot{I}(0) \end{bmatrix} \right] \right\}. \end{aligned}$$

Эти уравнения называются также обобщенными телеграфными уравнениями  $(n + 1)$ -проводной системы. Первый член описывает бегущие по проводной системе, второй - обратные волны. Из наложения бегущих и обратных волн напряжения и тока получают напряжения и токи в любом месте проводной системы.

При учете условий соединений в начале и конце линий из телеграфных уравнений при двух линиях могут быть определены возникающие на концах линии напряжения связи. Рассмотрение связанных многопроводных систем во временной области математически получается более сложным. По данному вопросу имеется обширная специальная литература, приведенная в [1].

В исходные данные вносятся расчетная схема замещения. Определяются для данной схемы конкретные значения параметров ветвей нагрузки и источников напряжения, а также характеристики проводов линий: тяговой сети; двухпроводной линии связи; трехфазной трехпроводной линии продольного электроснабжения напряжением 10 кВ; трехфазных фильтров.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. Учебник для вузов / М. П. Бадер. М.: Транспорт, 2002. – 640 с.
2. Бадер М. П. О повышении энергетической эффективности преобразовательного оборудования тяговых подстанций / М. П. Бадер, Ю. М. Иньков // Электричество, 2008, № 2. – С. 60-65.

Поступила в печать 20.05.2014.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Так как к линиям продольного электроснабжения 10 кВ подключается большое количество однофазных потребителей, как правило, малой мощности (например, освещение переездов, электроснабжение линейно-путевых зданий на перегонах и остановочных пунктах, резервное питание сигнальных точек автоблокировки и ряд других потребителей), то на схеме замещения нагрузка может быть задана средними значениями элементов активно-индуктивного характера  $R_H$ ,  $L_H$  и условно приложенная в конце фидерного участка.

Зная токи и напряжения в любой заданной точке многопроводной линии тягового электроснабжения определяются наведенные напряжения в смежной линии и электромагнитное влияние тяговой сети и линий продольного электроснабжения на коммуникации связи и цепи железнодорожной автоматики.

## Заключение

Предложена методика расчета электромагнитных процессов в многопроводных линиях тягового электроснабжения. Выполненные исследования и проведенный анализ показали возможность моделирования распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, которые позволяют определять не только токи и напряжения в любой заданной точке многопроводной линии, но и одновременно наведенные напряжения в смежной линии. Всё это позволяет с высокой степенью точности проводить обоснование электромагнитной совместимости тяговой сети и линий продольного электроснабжения с коммуникации связи и цепями железнодорожной автоматики.

## REFERENCES

1. Bader M. P. Elektromagnitnaja sovместimost' [Electromagnetic compatibility]. Moscow, Transport Publ., 2002. P. 640.
2. Bader M. P., In'kov Ju. M. O povyshenii jenergeticheskoj jeffektivnosti preobrazovatel'nogo oborudovaniya tjagovyh podstancij [On increasing the energy efficiency of the converter traction substations]. Jelektrichestvo – Electricity, 2008, № 2, pp. 60-65.

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

Сформулированы требования и рассмотрена методика обоснования электромагнитной совместимости многопроводных линий тягового электроснабжения и элементов инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением. Методика позволяет определять токи и напряжения в любой точке многопроводных линий тяговой сети. Проанализирована и показана возможность моделирования распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, что позволяет с высокой степенью точности проводить обоснование электромагнитной совместимости тяговой сети и линий продольного электроснабжения с коммуникации связи и цепями железнодорожной автоматики.

© Бадер М. П., 2014

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, высокоскоростное движение, энергоэффективность, электромагнитная совместимость, потери электроэнергии, элементы инфраструктуры, линии продольного электроснабжения, наведенные напряжения, коммуникации связи, цепи железнодорожной автоматики.

УДК 621.332

М. П. БАДЬОР (МІІТ)

Кафедра Енергопостачання електричних залізниць, Московський державний університет шляхів сполучення, вул. Образцова 9, буд. 9, Москва, Російська Федерація, 127994, тел.: (495) 684-22-87, ел. пошта: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ НА ДІЛЯНКАХ З ВИСОКОШВИДКІСНИМ РУХОМ

Сформульовані вимоги і розглянута методика обґрунтування електромагнітної сумісності багатопровідних ліній тягового електропостачання та елементів інфраструктури на ділянках з високошвидкісним рухом. Методика дозволяє визначати струми і напруги в будь-якій точці багатопровідних ліній тягової мережі. Проаналізована і показана можливість моделювання поширення електромагнітних коливань уздовж багатопровідних ліній тягового електропостачання, що дозволяє з високим ступенем точності проводити обґрунтування електромагнітної сумісності тягової мережі і ліній поздовжнього електропостачання з комунікації зв'язку і ланцюгами залізничної автоматики

**Ключові слова:** система тягового електропостачання, високошвидкісний рух, енергоефективність, електромагнітна сумісність, втрати електроенергії, елементи інфраструктури, лінії поздовжнього електропостачання, наведеної напруги, комунікації зв'язку, ланцюги залізничної автоматики.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

UDC 621.332

М. P. BADER (MIIT)

Department of Energy supply of electric railways, Moscow State University of Transport Communications, 9 Obraztsova Street, build. 9, Moscow, Russia Federation, 127994, tel.: (495) 684-22-87, e-mail: [badjor@mail.ru](mailto:badjor@mail.ru)

## THE ANALYSIS AND THE SYNTHESIS OF THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM AND INFRASTRUCTURE IN THE DISTRICTS WITH THE HIGH-SPEED TRAFFIC

The article defines the requirements and discusses the methodology justification electromagnetic compatibility of multiconductor lines of traction power supply and infrastructure in areas with high-speed. The methodology allows determining the currents and voltages at any point multiconductor lines traction network. Analyzed and the possibility of modeling of electromagnetic waves along the multi-lane line traction power supply that allows a high degree of accuracy, we justify the EMC traction network and power supply with longitudinal lines of communication links and chains of railway automatics.

**Keywords:** traction power supply system, high-speed, electromagnetic compatibility, loss of electricity, elements of infrastructure, lines of longitudinal power supply, induced voltage, communication of connection, chain of railway automatics.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Saenko Y. L.*

© Бадер М. П., 2014