

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311:621.331

### Многолучевая модель системы внешнего электроснабжения железной дороги переменного тока\*

А.В. Крюков<sup>а</sup>, Д.П. Вторушин<sup>б</sup>

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

<sup>а</sup>and\_kryukov@mail.ru, <sup>б</sup>vtorushin\_d\_p@bk.ru

Статья поступила 16.11.2012, принята 15.02.2013

*Предложена модель системы внешнего электроснабжения (СВЭ) железной дороги переменного тока, построенная на основе многолучевой схемы с использованием синхронизированных векторных измерений PMU – WAMS (Phasor Measurement Unit – Wide Area Measurement System). Существенное отличие предлагаемой модели от традиционных лучевых моделей REI состоит в использовании фазных координат и другом порядке построения эквивалента. Актуальность разработки адекватных моделей СВЭ определяется переходом электроэнергетики на новую технологическую платформу, основанную на использовании интеллектуальных сетей (smart grid). Компьютерное моделирование показало высокую точность расчета режимов систем тягового электроснабжения на основе предложенной модели СВЭ. Максимальная погрешность для сети высокого напряжения составила 0,82 %, погрешность определения напряжения на токоприемнике электровоза не превысила 0,27 %.*

**Ключевые слова:** система внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока, узловая эквивалентная модель.

### Multibeam model of external power supply system for alternating current railway

A. V. Kryukov<sup>а</sup>, D. P. Vtorushin<sup>б</sup>

Irkutsk State University of Railway Transport, 15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, Russia

<sup>а</sup>and\_kryukov@mail.ru, <sup>б</sup>vtorushin\_d\_p@bk.ru

Received. 16.11.2012, accepted 15.02.2013

*A new model of power grid that feeds AC traction power-supply system has been proposed. This model was built on the basis of a multibeam scheme using PMU WAMS measurements. The significant difference of the proposed model from traditional REI-models lies in the use of phase coordinates and different modeling order. The development of the feeding power grid models became topical due to the conversion of electric power systems to the new technological platform based on the intelligent networks application, which are also called Smart Grid. The results of computer modeling have proven high accuracy in calculating power-supply system traction modes based on the use of the proposed power grid model. The maximum error for high-voltage power network amounts to 0.82% and 0.27% on the locomotive collector bow.*

**Key words:** external power supply system of alternating current railway, node equivalent model.

**Введение.** Система тягового электроснабжения (СТЭ) железной дороги переменного тока состоит из большого числа элементов разных типов и обладает разнородными связями между ними. Кроме того, СТЭ неразрывно связана с двумя сложными динамическими объектами: питающей электроэнергетической системой (ЭЭС) и железнодорожной магистралью (ЖДМ). Часть ЭЭС, непосредственно примыкающая к опорным тяговым подстанциям (ТП), которую можно рассматривать как систему внешнего электроснабжения (СВЭ), опреде-

ляет модули и фазы напряжений в точках общего присоединения ЭЭС и СТЭ, от которых зависит вектор режимных параметров СТЭ. Этот вектор также функционально связан с материальным потоком перевозимых по ЖДМ грузов, определяющим электротяговые нагрузки.

Вопросы оперативного управления режимами СТЭ должны решаться с учетом характеристик ЭЭС (СВЭ). Особую актуальность задача корректного моделирования СВЭ (ЭЭС) приобретает в современных условиях, что вызвано двумя факторами. Первый связан с переходом электроэнергетики РФ на новую технологическую платформу [1], основанную на применении интеллектуальных электрических сетей (*smart grid*), функционирование которых требует разработки адек-

\* Работа выполнена в рамках плана научных исследований по направлению «Интеллектуальные сети (Smart Grid) для эффективной энергетической системы будущего». Договор № 11.G34.31.0044 от 27.10.2011 г.

ватных методов компьютерного моделирования ЭЭС. Второй аспект определяется организацией движения тяжеловесных и высокоскоростных поездов, которые будут создавать значительные пики электротяговых нагрузок. При этом применение недостаточно адекватных моделей СВЭ будет приводить к неприемлемым погрешностям моделирования режимов СТЭ.

**Постановка и методика решения задачи.** Полный учет питающей сети затруднен, особенно в задачах оперативного управления режимами СТЭ. Это связано с тем, что в ситуационных центрах ОАО «РЖД», осуществляющих управление СТЭ, доступна информация только о линиях электропередачи, непосредственно примыкающим к шинам высокого напряжения тяговых подстанций (ТП). Поэтому особую актуальность приобретает задача получения упрощенных эквивалентных

моделей питающей ЭЭС для целей управления режимами СТЭ. Для синтеза эквивалента ЭЭС могут использоваться многолучевые модели (МЛМ), изоморфные моделям REI, предложенным в работах [2, 3]. Существенное отличие предлагаемой в настоящей статье модели от моделей REI состоит в использовании фазных координат и другом порядке построения эквивалента. Задача получения многолучевой эквивалентной модели ЭЭС может быть сформулирована следующим образом. Для типовой схемы подключения ТП к внешней сети (рис. 1) необходимо получить эквивалентную модель в виде, представленном на рис. 2.

В наиболее общем случае, при питании ТП от сетей разного класса напряжений многолучевая модель будет иметь вид, представленный на рис. 3.

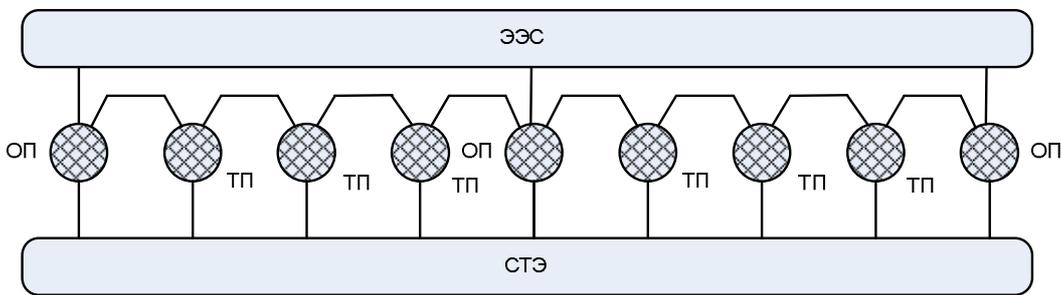


Рис. 1. Исходная схема: ОП – опорные подстанции

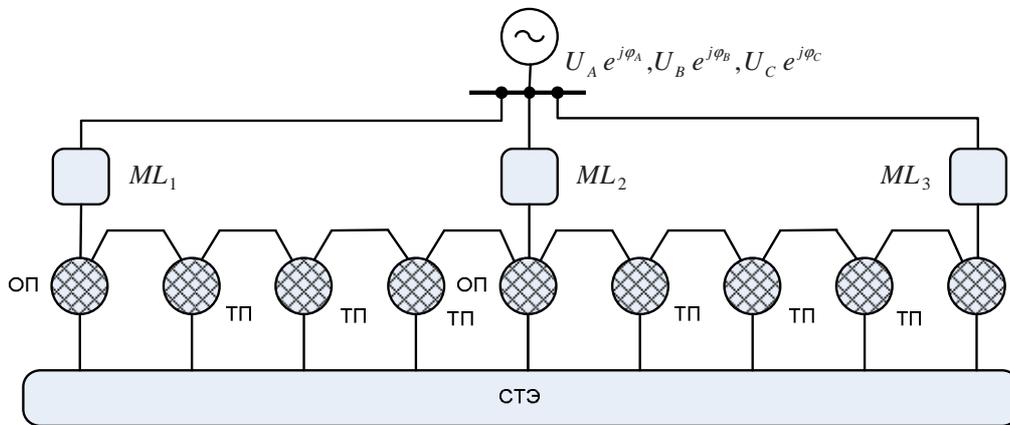


Рис. 2. Многолучевая модель

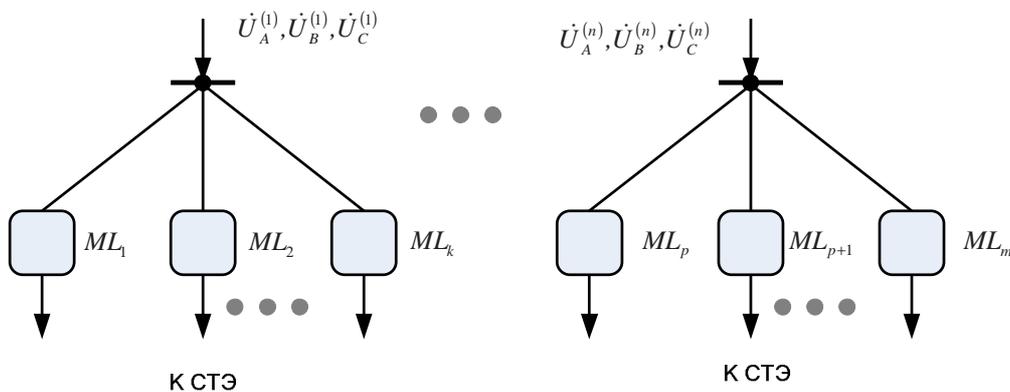


Рис. 3. Обобщенная структура МЛМ

Лучевые компоненты  $ML_k$ ,  $k=1..n$  могут задаваться в виде наборов комплексных сопротивлений  $\underline{Z}_{Ak}, \underline{Z}_{Bk}, \underline{Z}_{Ck}$ , матриц узловых сопротивлений

$$\underline{Z}_k = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Ak} & \underline{Z}_{ABk} & \underline{Z}_{ACk} \\ \underline{Z}_{ABk} & \underline{Z}_{Bk} & \underline{Z}_{BCk} \\ \underline{Z}_{ACk} & \underline{Z}_{BCk} & \underline{Z}_{Ck} \end{bmatrix}$$

или решетчатых схем замещения, предложенных в работах [4, 5]. Ниже рассмотрен первый вариант формирования компонент  $ML_k$ . Такая модель может быть отнесена к классу «грубых», так как не учитывает взаимные индуктивные и емкостные связи. Однако ниже будет показано, что эта модель является адекватной, и на ее основе возможно получение приемлемой для практических целей точности.

Параметры  $\dot{U}_A^{(j)}, \dot{U}_B^{(j)}, \dot{U}_C^{(j)}, j=1..n$ ;

$$\underline{Z}_{Ak}, \underline{Z}_{Bk}, \underline{Z}_{Ck}, k=1..m$$

определяются следующим образом. С использованием измерительной информации от устройств *PMU WAMS* составляется системы линейных уравнений:

$$\dot{U}^{(j)} = \dot{U}_k + \text{diag} \underline{Z}_k \dot{I}_k, \quad (1)$$

$$j=1..n, k=1..m$$

где  $\dot{U}^{(j)} = [\dot{U}_A^{(j)} \quad \dot{U}_B^{(j)} \quad \dot{U}_C^{(j)}]^T$  – искомые векторы напряжений источников питания; индекс  $T$  отвечает операции транспонирования;  $\dot{U}_k = [\dot{U}_{Ak} \quad \dot{U}_{Bk} \quad \dot{U}_{Ck}]^T$  – измеренные значения комплексов напряжения на шинах опорных подстанций;  $\text{diag} \underline{Z}_k = \text{diag} (\underline{Z}_{Ak} \quad \underline{Z}_{Bk} \quad \underline{Z}_{Ck})$  – искомые комплексы сопротивлений лучей МЛМ;  $\dot{I}_k = [\dot{I}_{Ak} \quad \dot{I}_{Bk} \quad \dot{I}_{Ck}]^T$  – измеренные значения токов на вводах ОП.

Система (1) является недоопределенной, поэтому используется несколько замеров, и параметры

$$\dot{U}_A^{(j)}, \dot{U}_B^{(j)}, \dot{U}_C^{(j)}, j=1..n$$

$$\underline{Z}_{Ak}, \underline{Z}_{Bk}, \underline{Z}_{Ck}, k=1..m,$$

образующие вектор  $\dot{\underline{X}}$ , рассчитываются на основе метода наименьших квадратов. При этом на основе уравнений (1) составляется переопределенная система следующего вида:

$$\dot{\underline{A}} \dot{\underline{X}} = \dot{\underline{B}},$$

где  $\dot{\underline{A}}$  – матрица, составленная из измеренных значений комплексов токов на вводах ОП;  $\dot{\underline{B}}$  – вектор, включающий измерения напряжений на шинах ОП.

Тогда

$$\dot{\underline{X}} = (\tilde{\underline{A}}^T \dot{\underline{A}})^{-1} \tilde{\underline{A}}^T \dot{\underline{B}},$$

где  $\tilde{\underline{A}}$  – матрица  $\dot{\underline{A}}$  с комплексно-сопряженными элементами.

Порядок определения параметров эквивалентной лучевой модели можно проиллюстрировать на примере схемы ЭЭС и СТЭ, показанной на рис. 5. Соответствующая этой схеме лучевая модель приведена на рис. 5. Определение параметров модели осуществляется на основе следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{I}_{A1} \underline{Z}_{A1}; \\ \dot{U}_A &= \dot{U}_{A2} + \dot{I}_{A2} \underline{Z}_{A2}; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{I}_{B1} \underline{Z}_{B1}; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B2} + \dot{I}_{B2} \underline{Z}_{B2}; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C1} + \dot{I}_{C1} \underline{Z}_{C1}; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C2} + \dot{I}_{C2} \underline{Z}_{C2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \underline{Z}_{A1}, \underline{Z}_{B1}, \underline{Z}_{C1}, \underline{Z}_{A2}, \underline{Z}_{B2}, \underline{Z}_{C2}$  – неизвестные, подлежащие определению;  $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{C1}, \dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2}, \dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}, \dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$  – измеряемые параметры. Измерения могут быть осуществлены на основе устройств синхронизированных векторных измерений *PMU WAMS* [6].

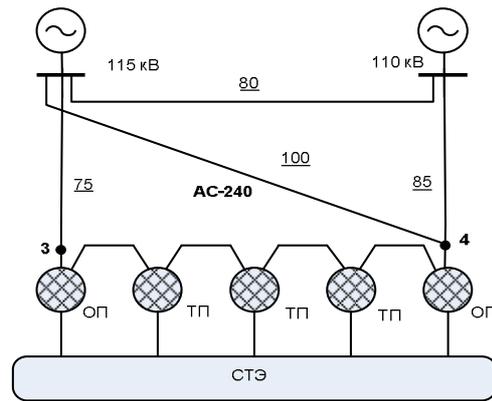


Рис. 4. Исходная схема

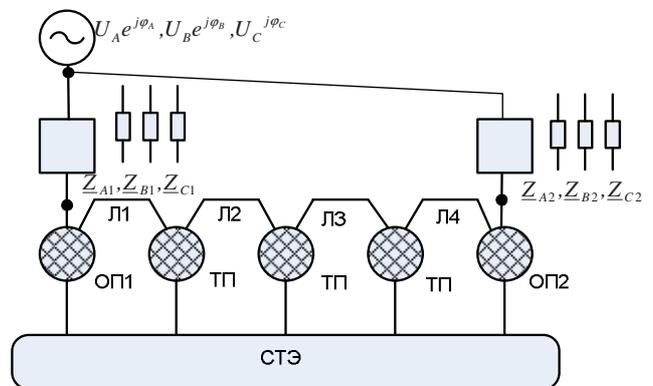


Рис. 5. Структура эквивалентной модели

При наличии двух замеров комплексов напряжений и токов на вводах опорных подстанций система (2) может быть переписана так:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & -i_{A1}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -i_{B1}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -i_{C1}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_{A2}^{(1)} & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_{B2}^{(1)} & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_{C2}^{(1)} \\
 1 & 0 & 0 & -i_{A1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -i_{B1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -i_{C1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_{A2}^{(2)} & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_{B2}^{(2)} & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_{C2}^{(2)}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \dot{U}_A \\
 \dot{U}_B \\
 \dot{U}_C \\
 \underline{Z}_{A1} \\
 \underline{Z}_{B1} \\
 \underline{Z}_{C1} \\
 \underline{Z}_{A2} \\
 \underline{Z}_{B2} \\
 \underline{Z}_{C2}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \dot{U}_{A1}^{(1)} \\
 \dot{U}_{B1}^{(1)} \\
 \dot{U}_{C2}^{(1)} \\
 \dot{U}_{A2}^{(1)} \\
 \dot{U}_{B2}^{(1)} \\
 \dot{U}_{C2}^{(1)} \\
 \dot{U}_{A1}^{(2)} \\
 \dot{U}_{B1}^{(2)} \\
 \dot{U}_{C1}^{(2)} \\
 \dot{U}_{A2}^{(2)} \\
 \dot{U}_{B2}^{(2)} \\
 \dot{U}_{C2}^{(2)}
 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где верхний индекс отвечает номеру замера.  
 В сокращенном виде система (3) может быть представлена следующим образом:

$$\begin{bmatrix}
 \mathbf{E} & \mathbf{I}_1^{(1)} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_2^{(1)} \\
 \mathbf{E} & \mathbf{I}_1^{(2)} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_2^{(2)}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \dot{\mathbf{U}}_I \\
 \underline{\mathbf{Z}}_1 \\
 \underline{\mathbf{Z}}_2
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \dot{\mathbf{U}}_1^{(1)} \\
 \dot{\mathbf{U}}_2^{(1)} \\
 \dot{\mathbf{U}}_1^{(2)} \\
 \dot{\mathbf{U}}_2^{(2)}
 \end{bmatrix}$$

или

$$\dot{\mathbf{I}}_Z \underline{\dot{\mathbf{X}}} = \dot{\mathbf{U}}_Z,$$

где

$$\mathbf{I}_1^{(1)} = -diag(i_{A1}^{(1)} \quad i_{B1}^{(1)} \quad i_{C1}^{(1)});$$

$$\mathbf{I}_2^{(1)} = -diag(i_{A2}^{(1)} \quad i_{B2}^{(1)} \quad i_{C2}^{(1)});$$

$$\mathbf{I}_1^{(2)} = -diag(i_{A1}^{(2)} \quad i_{B1}^{(2)} \quad i_{C1}^{(2)});$$

$$\mathbf{I}_2^{(2)} = -diag(i_{A2}^{(2)} \quad i_{B2}^{(2)} \quad i_{C2}^{(2)});$$

$$\dot{\mathbf{U}}_I = [\dot{U}_A \quad \dot{U}_B \quad \dot{U}_C]^T;$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_1 = [\underline{Z}_{A1} \quad \underline{Z}_{B1} \quad \underline{Z}_{C1}]^T;$$

$$\underline{\mathbf{Z}}_2 = [\underline{Z}_{A2} \quad \underline{Z}_{B2} \quad \underline{Z}_{C2}]^T;$$

$$\underline{\dot{\mathbf{X}}} = [\dot{\mathbf{U}}_I^T \quad \underline{\mathbf{Z}}_1^T \quad \underline{\mathbf{Z}}_2^T]^T;$$

$$\dot{\mathbf{U}}_Z = [(\dot{\mathbf{U}}_1^{(1)})^T \quad (\dot{\mathbf{U}}_2^{(1)})^T \quad (\dot{\mathbf{U}}_1^{(2)})^T \quad (\dot{\mathbf{U}}_2^{(2)})^T]^T;$$

$$\dot{\mathbf{I}}_Z = \begin{bmatrix}
 \mathbf{E} & \mathbf{I}_1^{(1)} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_2^{(1)} \\
 \mathbf{E} & \mathbf{I}_1^{(2)} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_2^{(2)}
 \end{bmatrix}.$$

На основе метода наименьших квадратов можно записать:

$$\underline{\dot{\mathbf{X}}} = [(\tilde{\mathbf{I}}_Z)^T \tilde{\mathbf{I}}_Z]^{-1} (\tilde{\mathbf{I}}_Z)^T \dot{\mathbf{U}}_Z.$$

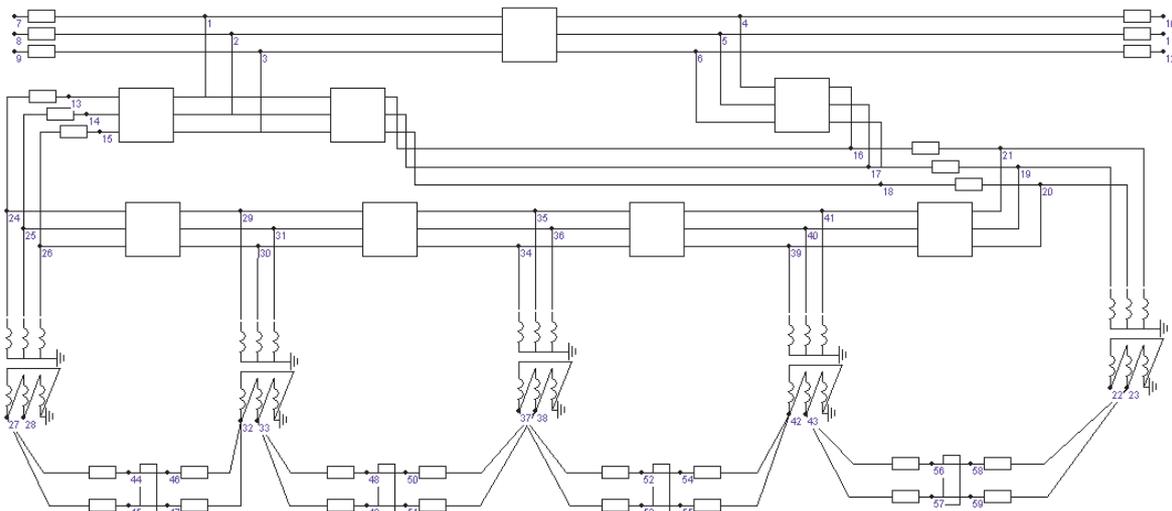


Рис. 6. Расчетная схема исходной модели СВЭ и СТЭ

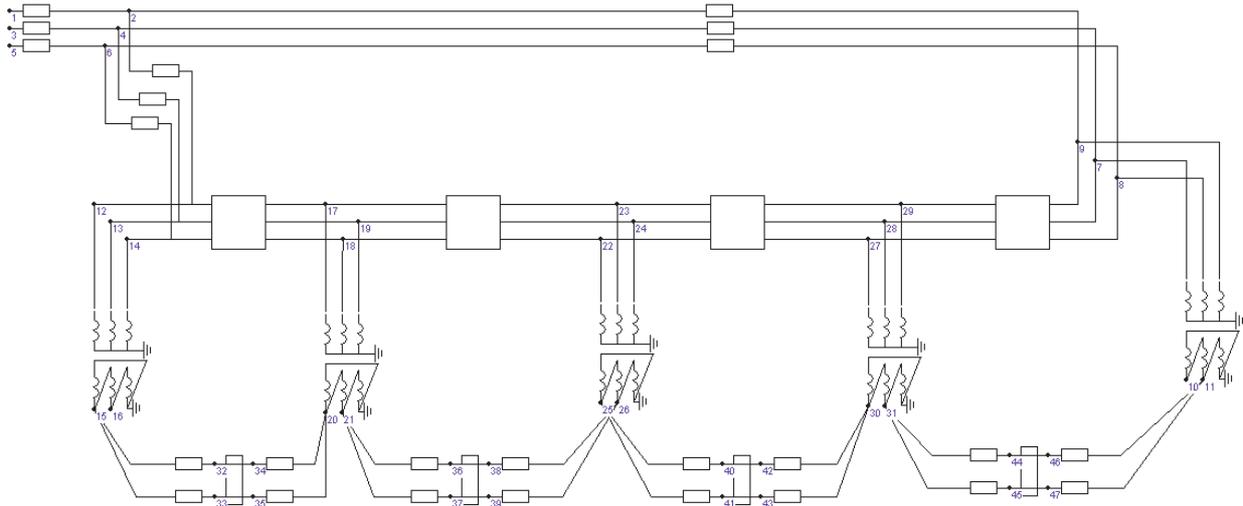


Рис. 7. Расчетная схема эквивалентной модели

**Результаты моделирования и их обсуждение.** Моделирование проводилось на основе программного комплекса (ПК) «Fazonord-Качество» [7] применительно к исходной схеме СВЭ и СТЭ, представленной на рис. 4. Расчетная схема, сформированная средствами ПК, приведена на рис. 6. На основе моделирования по этой схеме осуществлялась имитация реальных измерений, необходимых для определения параметров эквивалента СВЭ. Схема эквивалентной модели приведена на рис. 5. Соответствующая этой модели расчетная схема приведена на рис. 7.

Результаты моделирования при учете перемещающейся тяговой нагрузки в виде графиков погрешностей расчета режимов СТЭ представлены в табл. 1 и на рис. 9 – 11. На рисунках представлены значения

$$\delta U = \frac{U^{(B)} - U^{(M)}}{U^{(B)}} \cdot 100 ; \text{ индекс «B» относится к исходной схеме, индекс «M» – к эквивалентной модели.}$$

На рис. 12 приведены значения

$$\delta U_{MAX} = \max [\delta U^{(A)}, \delta U^{(B)}, \delta U^{(C)}] .$$

Токовый профиль для поезда массой 3900 тонн представлен на рис. 8.

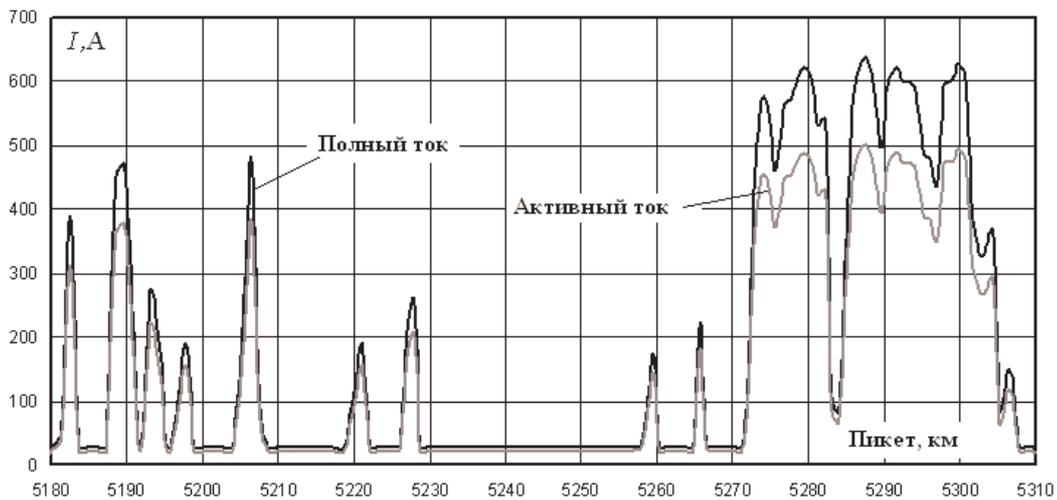


Рис. 8. Токовый профиль поезда массой 3900 тонн

Таблица 1

Погрешности расчета режима с использованием эквивалентной модели, %

Параметр	Опорная подстанция 1			Опорная подстанция 2			Токоприемник электровоза
	A	B	C	A	B	C	
Среднее значение	0,18	0,33	0,12	0,12	0,09	0,15	0,13
Максимум	0,4	0,82	0,21	0,31	0,17	0,37	0,27

ПРИМЕЧАНИЕ. Статистические характеристики определены для абсолютных величин.

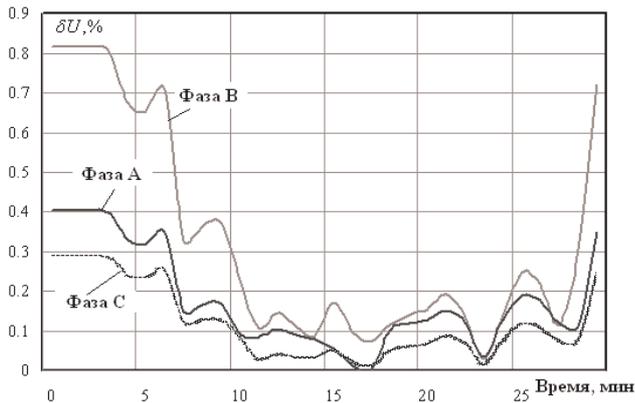


Рис. 9. Погрешности определения модулей напряжения ОП 1

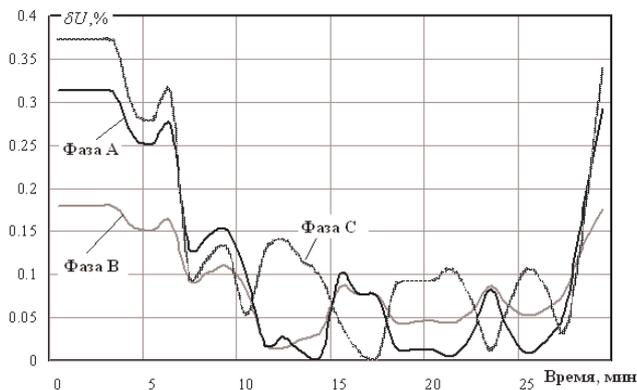


Рис. 10. Погрешности определения модулей напряжения ОП 2

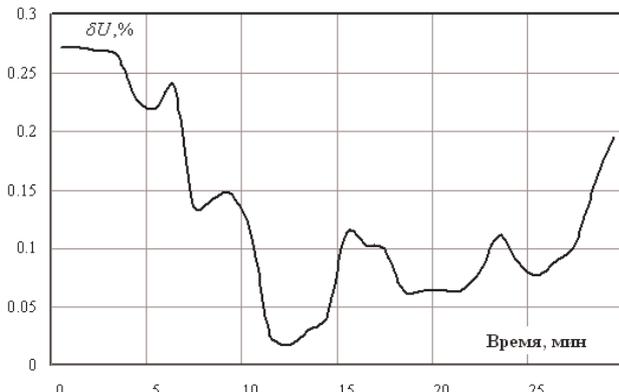


Рис. 11. Погрешности определения модулей напряжения на токоприемнике электроваза

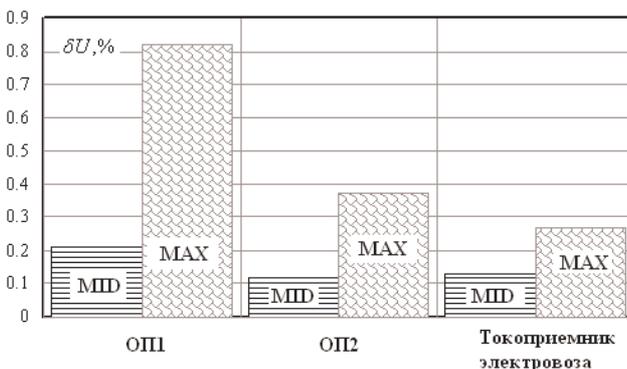


Рис. 12. Погрешности расчета режима с использованием эквивалентной модели

Таким образом, максимальная погрешность для сети высокого напряжения наблюдается для ОП1 и составляет 0,82 %; максимальная погрешность определения напряжения на токоприемнике электроваза достигает 0,27 %. Эти результаты свидетельствуют о приемлемости предлагаемой методики для решения практических задач управления режимами СТЭ.

### Заключение

1. Предложена методика построения модели системы внешнего электроснабжения железной дороги переменного тока, основанная на применении многолучевых схем с использованием информации, получаемой от устройств векторных измерений режимных параметров PMU WAMS.

2. Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о высокой точности расчета режимов СТЭ на основе предложенной модели. Максимальная погрешность для сети высокого напряжения в расчетном примере составила 0,82 %, погрешность определения напряжения на токоприемнике электроваза не превысила 0,27 %.

### Литература

1. Дорощев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 29-34.
2. Димо П. Узловой анализ электрических систем. М.: Мир, 1973. 263 с.
3. Димо П. Модели РЕИ и параметры режима. Объединенные энергосистемы. М.: Энергоатомиздат, 1987. 392 с.
4. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
5. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.
6. Мокеев А.В. Разработка и внедрение систем сбора телемеханической информации // Электрические станции. 2007. № 6. С. 60-61.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.К. Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов: программа для ЭВМ. Св. ГР. № 2007612771 Рос. Федерация; зарег. в реестре Федер. службы по интеллектуальной собственности, пат. и товарным знакам 28.06.2007.

### References

1. Dorofeev V.V., Makarov A. A. Active adaptive network – new quality for the United Energy System of Russia // Energoexpert. № 4. 2009. S. 29-34.
2. Dimo P. Nodal analysis of electric systems. M. Mir, 1973. 263 s.
3. Dimo P. REI models and mode characteristics. The United Energy Systems. M. Energoatomizdat, 1987. 392 s.
4. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multiple nonsymmetrical electric systems modes. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo un-ta, 2005. 273 s.
5. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Methods of joint modeling of traction and external power supply for alternating current. Irkutsk: IrGUPS, 2011. 170 s.
6. Mokeev A.V. Development and adoption of telemechanics data gathering. № 6. 2007. S. 60-61.
7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Fazonord-Quality-Calculations for electric power quality indices in the power-supply systems at the phase coordinates in accordance with train traffic: programmi dlia EVM. Svidetel'stvo ob oficial'noi registracii № 2007612771 Ros. Federatsiya; zareg. v reestre Feder. sluzhby po intelektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam 28.06.2007.