

и практика: II междунар. научно-практич. конф. СЕВКАВГТУ, 22 декабря 2011. – 2011. – С. 47- 50.

3. Чернова Г. А. Организация безопасной перевозки пассажиров с учетом эксплуатационной и экологической составляющих: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2005. – 168 с.

УДК 621.331

ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ON LINE МОДЕЛЕЙ

Вторушин Д.П., Крюков А.В.

*ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей
сообщения» (ИрГУПС),
664074, Иркутск, Чернышевского 15, кафедра «Электроснабжение
железнодорожного транспорта», vtorushin_d_p@bk.ru*

Аннотация

Предложен метод построения модели системы внешнего электро-снабжения железной дороги переменного тока. Модель строится на основе векторных измерений, получаемых при помощи устройств РМУ WAMS.

Ключевые слова: on-line модель, система внешнего электроснабжения железной дороги переменного тока.

EQUIVALENTING OF EXTERNAL POWER RAIL AC BASED ON LINE MODELS

Vtorushin D., Kryukov A.

Irkutsk State University of Railway Transport

Abstract

This paper proposes a method of constructing a model of the system of the external power supply railway AC. This model is based on the use of vector measurements, which were obtained using the device PMU WAMS.

Key words: on-line model, external railway electric system.

Введение. Система тягового электроснабжения (СТЭ) железной дороги переменного тока может быть отнесена к классу сложных, так как она состоит из большого числа элементов разных типов и обладает разнородными связями между ними. Кроме того, СТЭ неразрывно связана с двумя не менее 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), определяет модули и фазы напряжений в точках общего присоединения ЭЭС и СТЭ, от которых зависит вектор режимных параметров СТЭ. На основании изложенного можно сделать вывод о том, что вопросы оперативного управления режимами СТЭ должны решаться с учетом характеристик ЭЭС, непрерывно меняющихся во времени.

Постановка задачи. В традиционных методах моделирования СТЭ учет СВЭ осуществляется на основе простейших эквивалентных моделей в виде однофазных реактансов короткого замыкания и может приводить к существенным погрешностям [1]. Наиболее значительные погрешности имеют место при малых мощностях короткого замыкания на шинах 110-220 кВ тяговых подстанций.

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 ТП. Поэтому особую актуальность приобретает задача получения упрощенных эквивалентных моделей СВЭ для целей управления режимами СТЭ [2]. Актуальность этой задачи возрастает вследствие того, что в настоящее время осуществляется переход электроэнергетики РФ на новую технологическую платформу, в основу которой положена концепция интеллектуальных электрических сетей (*smart grid*) [3]. Информационную базу технологий *smart grid* предполагается строить на основе систем векторных измерений *PMU WAMS* [4] (рис.1). Синхронизация измерений осуществляется через спутники глобальных систем позиционирования ГЛОНАСС или *GPS*. С помощью устройств *PMU* возможно получить синхронизированные измерения модулей и фаз напряжений в точках примыкания опорных ТП к СВЭ (рис. 2). На этой основе могут быть реализованы эффективные алгоритмы получения эквивалентных моделей СВЭ. В настоящей статье предлагается алгоритм построения эквивалентной *on-line* модели для типовой схемы СВЭ и СВЭ (рис. 2).

Конкретные результаты моделирования получены применительно к схеме, представленной на рис. 3.

Алгоритм построения эквивалентной модели СВЭ включает следующие этапы:

- формирование модели СТЭ в виде уравнений установившегося режима (УУР) в фазных координатах по методике, предложенной в работе [1]; при этом для элементов СТЭ (участков контактной сети трансформаторов ТП), а также примыкающих к ТП линий электропередачи (ЛЭП1...ЛЭП4

на рис. 2) используются модели в виде решетчатых схем замещения из RLC -элементов, соединенных по схемам полных графов; учет СВЭ осуществляется путем задания в точках подключения ОП балансирующих узлов (рис. 4) с комплексами напряжений $\dot{U}_k = U_k e^{j\varphi_k}$, получаемых путем измерений с помощью устройств PMU ;

- получение данных от устройств PMU по каналам телемеханики и подстановка значений $\dot{U}_k = U_k e^{j\varphi_k}$ в сформированную *on-line* модель;
- расчет режима путем решения УУР в фазных координатах с использованием методов, предложенных в работе [1].

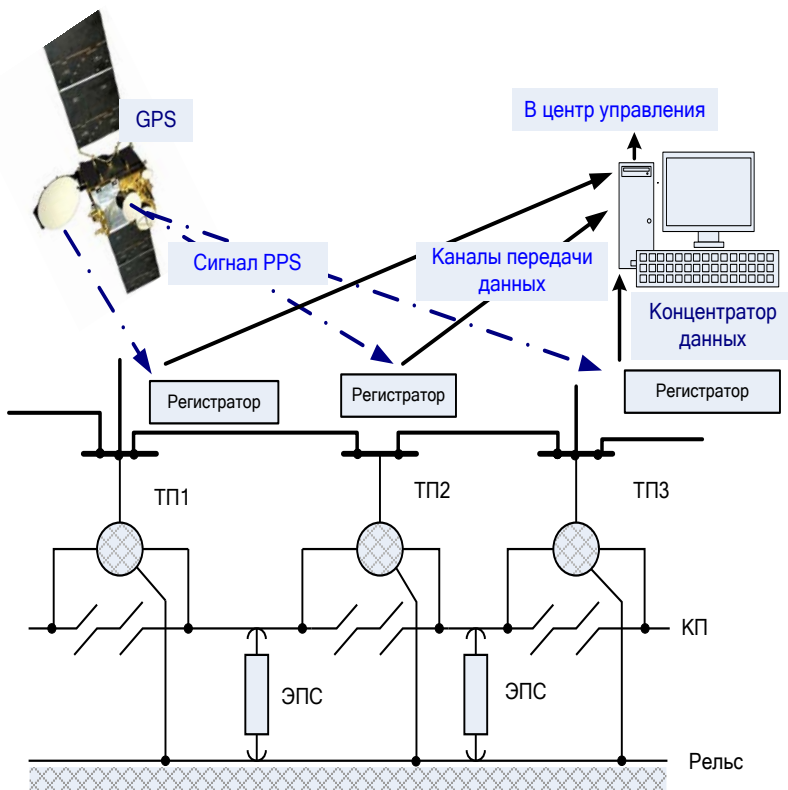


Рис. 1. Структура системы PMU - $WAMS$ для $СТЭ$

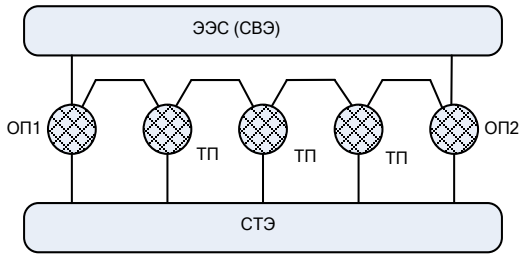


Рис. 2. Исходная схема: ТП – тяговые подстанции, ОП – опорные тяговые подстанции

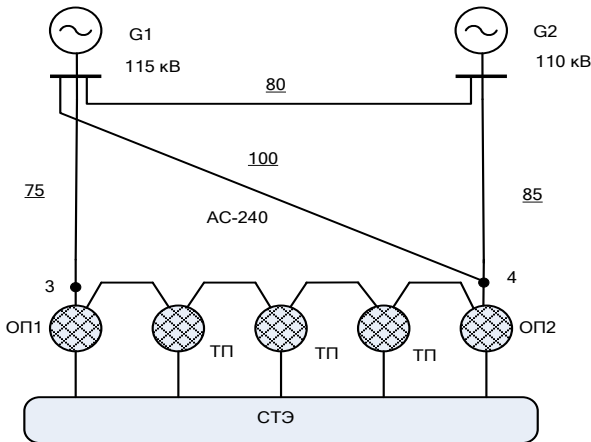


Рис. 3. Схема для моделирования

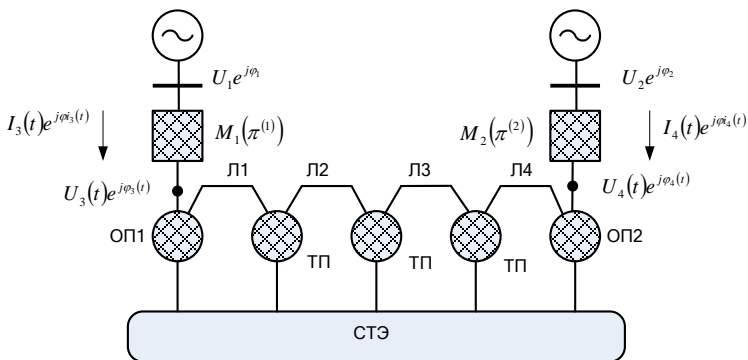


Рис. 4. Схема эквивалентной модели

Методика решения задачи. Моделирование осуществлялось применительно к исходной схеме, представленной на рис. 5, с помощью программного комплекса (ПК) «Fazonord-Качество», разработанного в ИРГУПСе [5]. В качестве измерительной информации в виде вектора $\mathbf{U}_T(t_k) = [U_1(t_k) \ \varphi_1(t_k) \ U_2(t_k) \ \varphi_2(t_k)]^T$ использовались результаты имитационного моделирования по полной схеме, рис. 5.

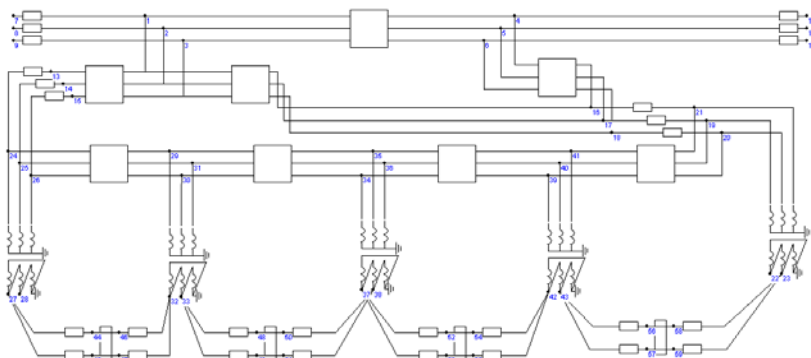


Рис. 5. Модель исходной схемы в ПК Fazonord

Расчетная схема, отвечающая *on-line* модели, сформированная средствами ПК «Fazonord-Качество», приведена на рис. 6. Для учета погрешностей *PMU* к вектору \mathbf{U}_T добавлялся белый шум с интенсивностью, соответствующей точности измерений, гарантированной поставщиками этих устройств [4]. Расчеты по *on-line* модели выполнялись в пошаговом режиме. При этом на k -м шаге в модель подставлялись соответствующие этому моменту времени значения комплексов напряжений в балансирующих узлах (с добавками, имитирующими погрешности устройств *PMU*), отвечающих шинам высокого напряжения опорных подстанций. Результаты моделирования представлены и на рис. 7, 8 в виде погрешностей расчета режима по эквивалентной модели

$$\delta x_j(t) = \frac{x_j^{(B)}(t) - x_j^{(E)}(t)}{x_j^{(B)}(t)} \cdot 100, \quad (1)$$

где $x_j^{(B)}$ – результаты расчета j -го режимного параметра по исходной (базовой) схеме;

$x_j^{(E)}$ – результаты расчета j -го режимного параметра по эквивалентной схеме.

Изменение параметров x_j во времени вызывалось вариацией тяговых нагрузок, создаваемых поездами, перемещающимися по участку моделируемой ЖДМ. Кроме того, на 20-й минуте вводилось существенное возмущение со стороны СВЭ в виде отключения источника $G2$. В целях оценки эффективности предлагаемой методики дополнительно выполнены расчеты режимов с использованием инженерной эквивалентной модели, основанной на использовании реактансов, определяемых мощностями короткого замыкания на шинах высокого напряжения опорных подстанций [2]. Схема этой модели показана на рис. 6. Напряжения источников задавались средненоминальными значениями, а фазы принимаются равными 0, 120, 240 градусов. Сопротивления определялись из расчета токов трехфазных коротких замыканий (КЗ) на шинах ОП1 и ОП2. Например, для фазы А ОП1

$$\underline{Z}_{КА1} = \frac{U_{CP} e^{j0}}{\dot{I}_{КА1}}, \quad (2)$$

где $\dot{I}_{КА1}$ - ток КЗ в фазе А.

Расчетная схема инженерной модели, сформированная средствами ПК «Fazonord-Качество», приведена на рис. 7. Схема *on-line* представлена на рис. 8.

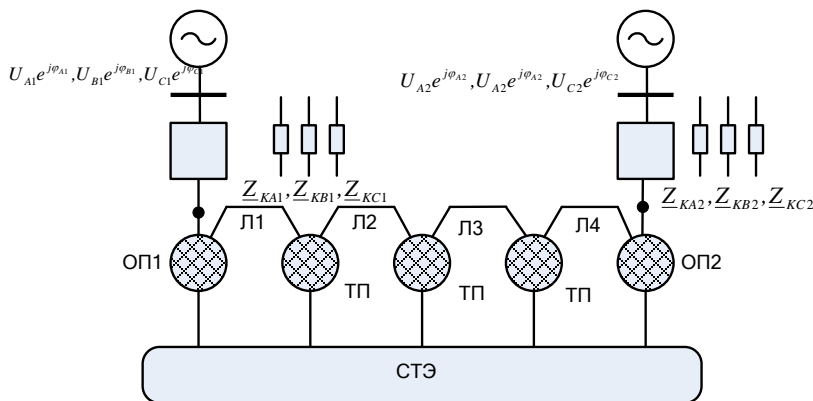


Рис. 6. Схема инженерной эквивалентной модели

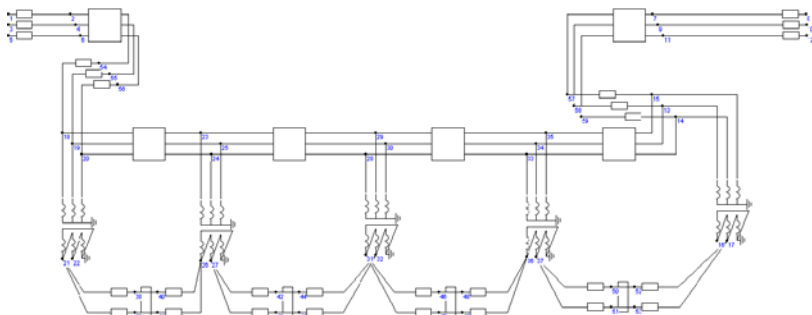


Рис. 7. Инженерная эквивалентная модель в ПК Fazonord

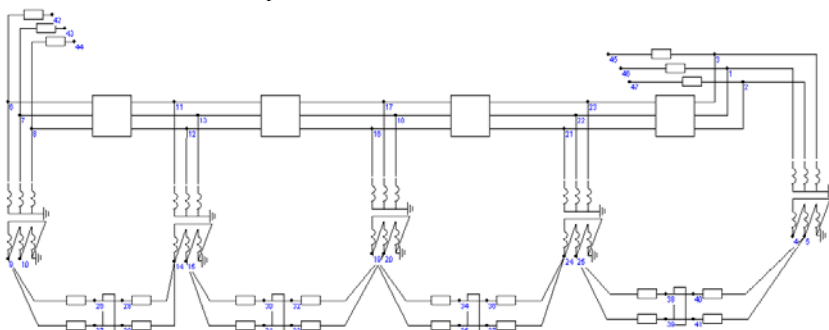


Рис. 8. On-line модель в ПК Fazonord

Результаты моделирования. Результаты моделирования в виде графиков напряжений на вводах ОП1, ОП2, токоприёмнике электровоза, а также графиков погрешностей определения указанных напряжений по эквивалентным моделям представлены на рис. 9-15.

На основе результатов моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Если режим СВЭ не претерпевает существенных изменений, обе методики построения эквивалентной модели СВЭ дают приемлемую для практических целей точность расчета режимов СТЭ. Максимальное значение погрешностей не превышает 2%.

2. При возникновении возмущения со стороны внешней сети погрешность, получаемая на основе *on-line*, увеличивается до 2,5 %, а погрешность инженерной методики возрастает до недопустимой величины, превышающей 18%.

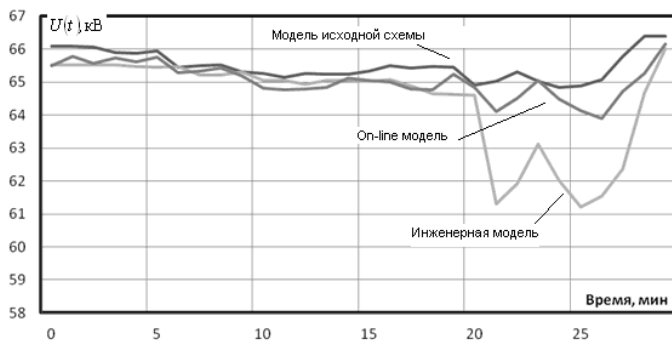


Рис. 9. Графики уровня напряжения на вводе ОП1

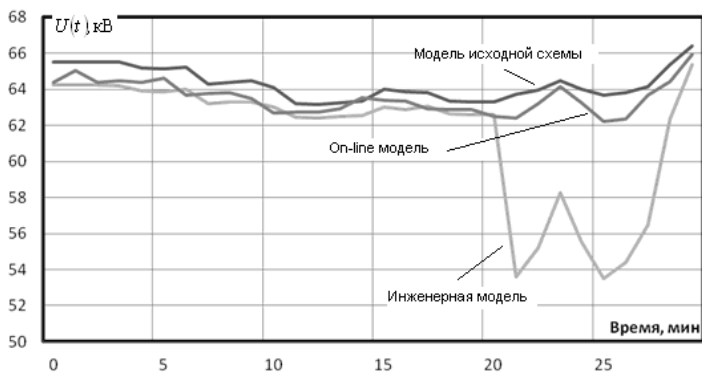


Рис. 10. Графики уровня напряжения на вводе ОП2

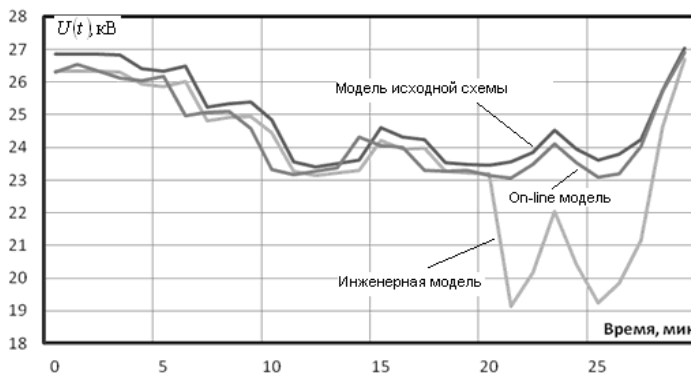


Рис. 11. Графики уровня напряжения на токоприёмнике электровоза



Рис. 12. Погрешности определения модулей напряжения для ОП1

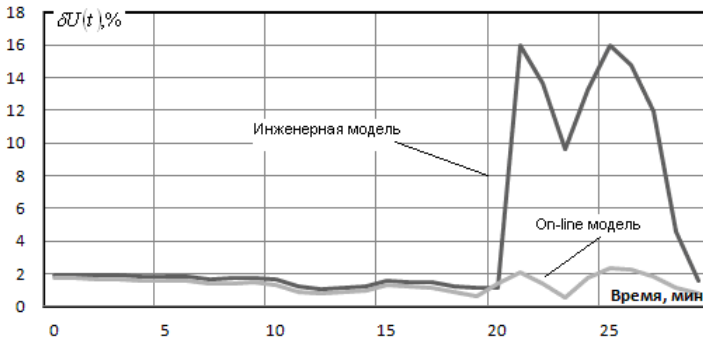


Рис. 13. Погрешности определения модулей напряжения для ОП2

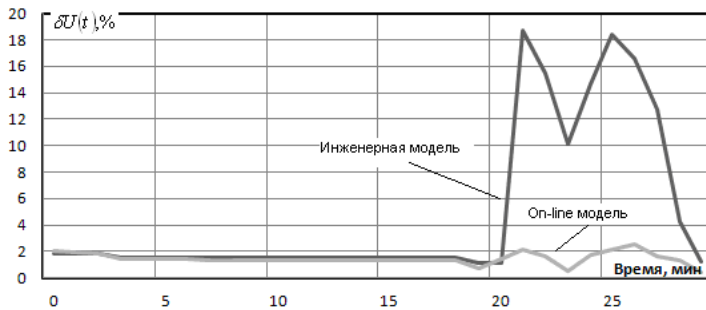


Рис. 14. Погрешности определения модулей напряжения на токоприёмнике электроваза

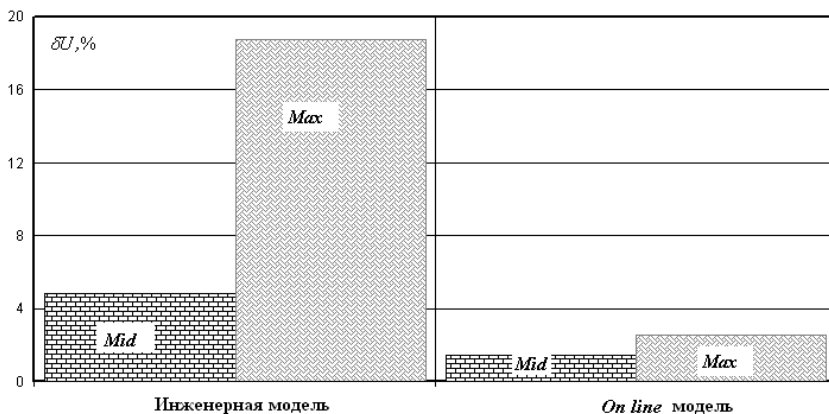


Рис. 15. Погрешности моделирования

Заключение

1. Предложена методика построения модели системы внешнего электроснабжения железной дороги переменного тока, основанная на использовании информации, получаемой от устройств векторных измерений режимных параметров *PMU WAMS*.

2. Особенность методики состоит в ее адаптивности к режимным изменениям, происходящим во внешней сети. Так, например, при отключении мощной электростанции в питающей ЭЭС погрешность расчета режима СТЭ по эквивалентной модели составляет 2,5 %, что вполне приемлемо при решении задач управления режимами СТЭ.

Библиографический список

1. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. – 273 с.
2. Крюков А.В., Вторушин Д.П. Структурно-параметрический синтез моделей электрических сетей, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – Т.2. – С. 81-87.
3. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЭЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 29-34.
4. Мокеев А.В. Разработка и внедрение систем сбора телемеханической информации // Электрические станции. – 2007. – № 6. – С. 60-61.