

С.В. Кочергин, А.В. Кобелев, Н.А. Хребтов, П.А. Киташин, К.И. Терехов
Sergey V. Kochergin, Alexander V. Kobelev, Nikita A. Khrebtov, Pavel A. Kitashin,
Kirill I. Terekhov, Evgeny B. Vinokurov

Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ
Simulation of rural distribution electrical networks 10/0,4 kV

Аннотация, abstract: Статья посвящена вопросам моделирования сельских распределительных сетей в 10/0,4 кВ.

The article deals with simulation of rural distribution networks of 10/0,4 kV. The main task of power saving in rural electrical energy industry is minimizing of electric system losses in rural distribution grids which amounts 50% of the whole farming sector electrical supply. One of the main factors governing the energy quality and transportation losses is voltages and currents unbalance caused by single phase appliance load domination. The calculation method of power and energy losses in electric grids with load unbalance based on symmetrical component method has gained the major prevalence.

Ключевые слова, keywords: распределительные электрические сети, несимметрия напряжений и токов, моделирование электрических сетей, качество электрической

энергии, power distribution networks, unbalance voltages and currents, the simulation of electrical networks, power quality.

Авторы, authors: Кочергин Сергей Валерьевич – Тамбовский государственный технический университет, кандидат технических наук, заместитель директора лаборатории «Качества электрической энергии», skochergin77@gmail.com;

Кобелев Александр Викторович – Тамбовский государственный технический университет, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика»;

Хребтов Никита Александрович – Тамбовский государственный технический университет, аспирант;

Киташин Павел Александрович – Тамбовский государственный технический университет;

Терехов Кирилл Игоревич – Тамбовский государственный технический университет, студент.

Kochergin Sergey V. – Tambov State Technical University, Ph.D., Deputy Director of the laboratory of «Electric Energy Quality», skocher-
gin77@gmail.com

Kobelev, Alexander V. – Tambov State Technical University, Ph.D., Head of Electric power department;

Khrebtov, Nikita A. – Tambov State Technical University, post-graduate student;

Kitashin, Pavel A. – Tambov State Technical University, post-graduate student;

Terekhov, Kirill I. – Tambov State Technical University, student;

Vinokurov, Evgeny B. – Tambov State Technical University, Ph.D., associate professor.

УДК 620.92

Статья поступила в редакцию: 03.08.2013

Статья принята к печати: 01.09.2013

© С.В. Кочергин, А.В. Кобелев, Н.А. Хребтов, П.А. Киташин, К.И. Терехов, 2013

Электрическая энергия является сертифицируемым товаром и при этом обладает целым рядом особенностей, в числе которых неразрывность и одновременность процессов производства и потребления, когда искажающее влияние на показатели качества электроэнергии (ПКЭ) может быть оказано как электроприёмниками потребителя, так и принесено извне в виде кондуктивной элек-

тромагнитной помехи, распространяемой по общей электрической сети. [1]

Электроэнергия является единственным видом продукции, транспортировка которой осуществляется за счёт расхода определённой части самой продукции, то есть потери электроэнергии при её передаче неизбежны. Первоочередной задачей экономии топливно-энергетических ресурсов сельской электроэнергетики является снижение потерь электроэнергии в сельских распределительных электрических сетях, которые достигают 50 % общего отпуска электроэнергии сельскому хозяйству. [2]

Одним из основных факторов, оказывающим влияние на качество и потери электрической энергии при её передаче от производителя к потребителю является несимметрия фазных токов и напряжений, возникающих по причине преобладания однофазной бытовой нагрузки.

Наибольшее распространение получил метод расчёта потерь мощности и энергии в электрических сетях при несимметричной нагрузке, основанный на методе симметричных составляющих.

Линию 0,4 кВ с равномерно распределёнными по фазам однофазными потребителями различной мощности (рис. 1) можно рассматривать как линию с несколькими распределёнными симметричными трехфазными приемниками, образованными тремя группами однофазных приемников различной мощности, соединённых «звездой», нулевая точка которых присоединена к нулевому проводу. [3]

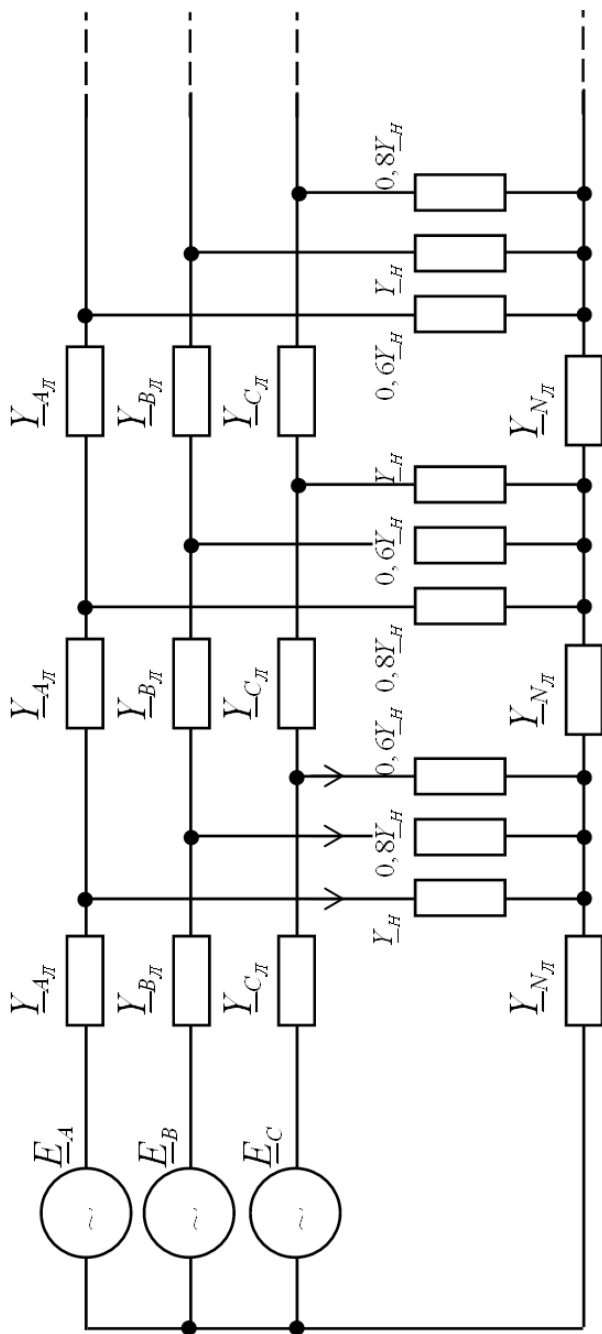


Рисунок 1. Линия с равномерно распределенными по фазам однофазными потребителями различной мощности

Любой несимметричный трехфазный приемник можно заменить эквивалентным симметричным трехфазным приемником и двумя разными по мощности однофазными потребителями, которые включены на фазные напряжения. Условием эквивалентности такой замены является равенство напряжений и токов на зажимах потребителей, а для эквивалентных схем несимметричных трехфазных потребителей и равенство комплексов пульсирующих мощностей [4].

В общем случае несимметричной трехфазной системы фазных напряжений на зажимах несимметричного приемника будем иметь следующие выражения для фазных токов [5]:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A \underline{Y}_{HA}, \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B \underline{Y}_{HB}, \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C \underline{Y}_{HC}$$

где $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – фазные напряжения;

$\underline{Y}_{HA}, \underline{Y}_{HB}, \underline{Y}_{HC}$ – проводимости фазных проводов.

Потери мощности характеризуются коэффициентом потерь мощности, равным отношению потерь мощности при несимметричной нагрузке P_n к потерям мощности обусловленных токами прямой последовательности P_1 :

$$K_p = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_1} = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1}$$

где $K_{2i} = \frac{I_2}{I_1}$ – коэффициент обратной последовательности токов;

$K_{0i} = \frac{I_0}{I_1}$ – коэффициент нулевой последовательности токов;

R_0, R_1 – активные сопротивления нулевой и прямой последовательности для участка сети;

I_1, I_2, I_0 – токи прямой, обратной и нулевой последовательности на том же участке сети.

Относительные значения фазных потерь напряжения на некотором участке сети определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \underline{\delta}_A &= \frac{\underline{\Delta U}_A}{\underline{\Delta U}_1} = 1 + \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z; \\ \underline{\delta}_B &= \frac{\underline{\Delta U}_B}{\underline{\Delta U}_1} = \underline{a}^2 + \underline{a} \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z; \\ \underline{\delta}_C &= \frac{\underline{\Delta U}_C}{\underline{\Delta U}_1} = \underline{a} + \underline{a}^2 \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z, \end{aligned} \right\}$$

где $\underline{\Delta U}_A, \underline{\Delta U}_B, \underline{\Delta U}_C$ – комплексы фазных потерь напряжения на участке сети;

$\underline{\Delta U}_1$ – комплекс фазной потери напряжения прямой последовательности на участке сети;

$\underline{K}_{2i}, \underline{K}_{0i}$ – комплексные коэффициенты обратной и нулевой последовательности токов:

$$\underline{K}_{2i} = \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} ; \quad \underline{K}_{0i} = \frac{\underline{I}_0}{\underline{I}_1} ;$$

$\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ – комплексы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей;

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \text{ – комплексный множитель поворота вектора на } 120^\circ.$$

Метод симметричных составляющих имеет ограниченное применение для несимметричных электрических сетей, что связано со значительным усложнением схем замещения при росте числа несимметрий в электроэнергетической системе. Сложным становится применение метода симметричных составляющих для специальных трансформаторов, например, фазоповоротных, применяемых в управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП повышенной пропускной способности. [6]

Использование математических пакетов специализированных программ позволяет

детализировать задачу и достичь приемлемой точности расчетов. В настоящее время существует множество программ позволяющих моделировать электрические сети. Все они обладают теми или иными преимуществами. Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных

блоков SimPowerSystems, а систему управления – с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. [7]

Реальная работа электроэнергетической системы сопряжена с вероятностным характером подключения нагрузки [8, 9]. В этой связи можно отметить то, что моделирование электроэнергетических систем с помощью пакетов MatLAB позволяет использовать численные методы расчета электрических цепей и одновременно подключать к расчетам элементы прогнозирования с использованием логики нейронных сетей.

Для построения функциональной блок-схемы моделируемых электроэнергетических систем Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов. Simulink позволяет создавать блок-схемы электроэнергетической системы, то есть S-модель. Это позволяет решать сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (S-модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением виртуальной электроэнергетической системы.

Получившаяся в результате «виртуальная схема» позволит проводить все этапы исследования присущие экспериментальному или опытному образцу, а именно:

- проводить планирование модельных экспериментов;
- реализовать план эксперимента;
- производить анализ и интерпретация результатов моделирования.

Достоинствами моделирования являются:

- автоматический учет всех связей и соотношений между элементами схемы;
- получение результатов моделирования в форме аналогичной результатам при испытаниях реальных схем (в виде осциллограмм, временных процессов и т.д.), что упрощает анализ и привязку результатов моделирования к реальным электротехническим устройствам;
- возможность исследования работы отдельных элементов электрической машины или схемы, которые недоступны в реальной конструкции расходомера, например, возможно отслеживать величину электромагнитного момента машины и т.д.;
- возможность исследования поведения схемы в условиях труднодостижимых на экспериментальных стендах, например, при повышенных температурах или в аварийных режимах;
- возможность исследовать электротехнические устройства и схемы в динамике, например, исследуя реакцию электродвигателя на быстрые изменения нагрузки, что на реальных установках выполнить сложно;
- возможность исследования работы схем в условиях действия различных мешающих факторов, помех [10].

Пример моделирования распределительной электрической сети 10/0,4 кВ (рис. 2), принципиальная электрическая схема, которой построена с использованием пакета SimPowerSystems в математической программе MatLAB 7.0.

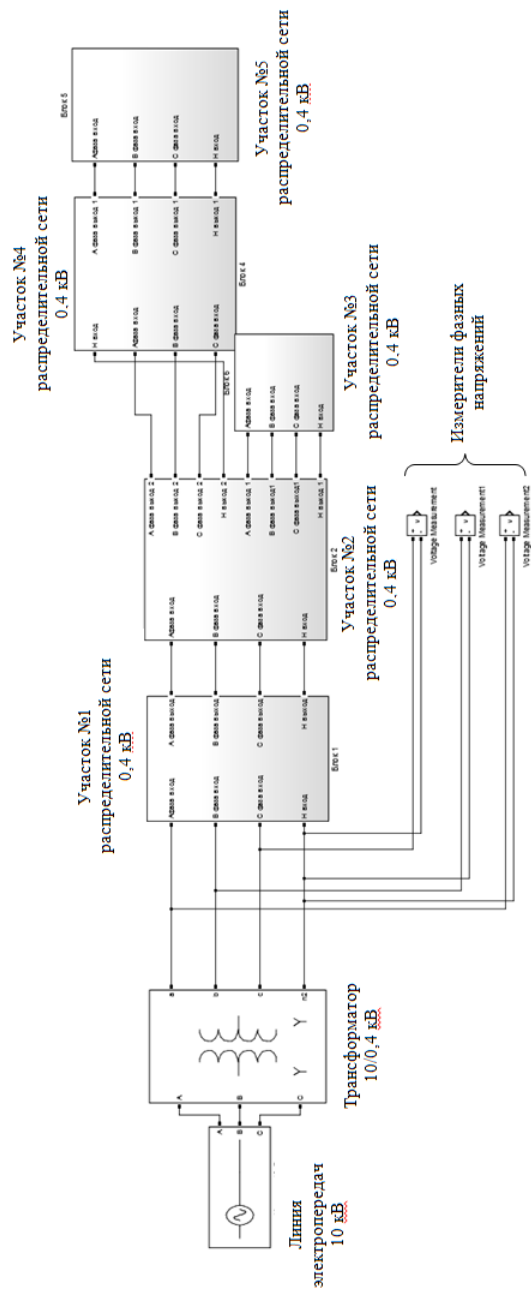


Рисунок 2. Модель распределительной электрической сети 10/0,4 кВ

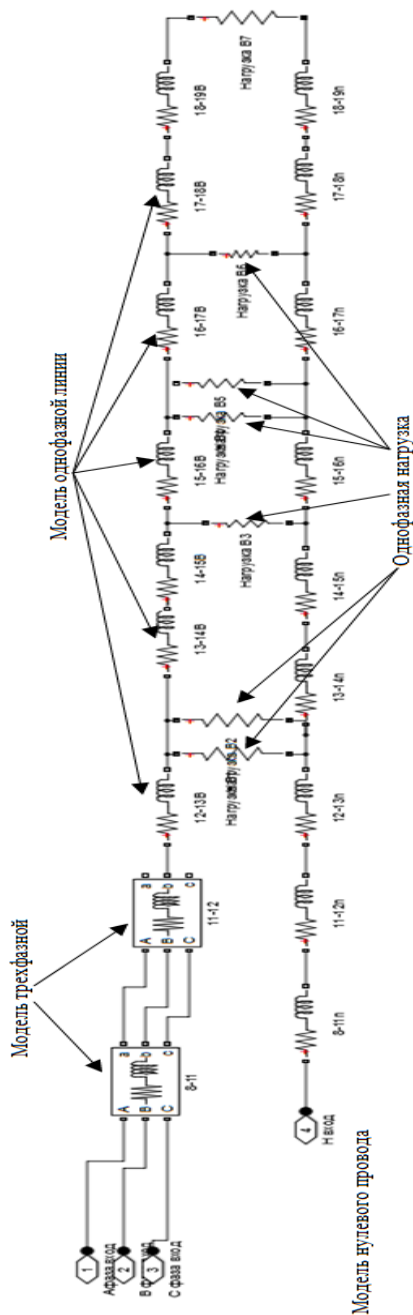
Характерной особенностью этой схемы является модульность построения. Каждый модуль (участок) содержит элементы схемы замещения линии электропередач и нагрузки. Пример подобного модуля имеет вид – рис. 3.

Использование подобного модульного механизма представления распределительной электрической сети позволяет исследовать электрическую схему любой сложности. Точность полученных данных зависит от правильности построения схемы замещения.

Литература

1. Горюнов И.Т., Мозгалёв В.С., Богданов В.А. Проблемы обеспечения качества электрической энергии // Электрические станции. 2001. № 1.
2. Антипов К.М. Задачи предприятий и организаций Минэнерго СССР по снижению расхода электроэнергии на её передачу по электрическим сетям // Энергетик. 1979. № 6.
3. Свергун Ю.Ф., Мирошник А.А. Моделирование несимметричного режима сельской воздушной электрической сети 0,38/0,22 кВ. // Problemele energeticii regionale. 2010. № 3.
4. Косоухов Ф.Д. Расчет падений напряжений и потерь мощностей в сельских распределительных сетях при несимметрии токов. Л., 1982.
5. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экс-

Рисунок 3. Модель (модуль) распределительной электрической сети 0,4кВ с однофазной нагрузкой



- периментах и упражнениях: практикум на Electronic Workbench: В 2 т. Т. 1: Электротехника. М., 1999.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Крюков Е.А. Моделирование пре-дельных режимов электроэнергетических систем с учетом продольной и поперечной несимметрии. Иркутск, 2006.
7. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М., СПб., 2008.
8. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А. Актуальные вопросы моделирования развития электроэнергетических систем // Fractal simulation. 2011. №2.
9. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А. Нейронные сети и фрактальное моделирование электроэнергетических систем. // Fractal simulation. 2012. №1.
10. Лурье М.С., Лурье О.М. Электротехника. Имитационное моделирование в лабораторном практикуме, курсовом и дипломном проектировании. 2 часть. Красноярск, 2006.