

## МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Статья посвящена разработке имитационной модели электротехнической системы с распределенной генерацией на примере электроснабжения жилых зданий. Существующие модели подобных систем обладают рядом недостатков: не представлены основные виды электроприемников, схемы замещения отдельных электроприемников некорректны, не приведен расчет параметров схем замещения электроприемников и других элементов электросистем, не описана методика измерения основных параметров электросистемы. В этой связи существует необходимость обобщения полученных ранее результатов и создания имитационной модели системы электроснабжения жилых зданий с распределенной генерацией, учитывающей вышеперечисленные недостатки. Целью данной работы является разработка имитационной модели системы электроснабжения жилых зданий с распределенной генерацией, включающей основные виды электроприемников, описание расчетов параметров схем замещения электроприемников и других элементов электросистемы, рассмотрение методики измерения основных параметров электросистемы. Результатом работы является создание имитационной модели системы электроснабжения шести жилых зданий в программном пакете Simscape PowerSystems (Matlab). Модель учитывает основные виды электроприемников жилого здания. В работе описан расчет параметров схем замещения электроприемников, линий электропередачи и силового трансформатора. Рассмотрена методика измерения основных параметров системы при помощи блоков *U, I, P Measurement* и *Powergui*. Приведены результаты измерений основных параметров системы.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, имитационная модель, схема замещения электроприемника, линия электропередачи, силовой трансформатор, действующее значение напряжения и тока, активная и реактивная мощность, суммарный коэффициент гармонических составляющих.

**Введение.** Стремительное развитие технологий альтернативных источников энергии [1] создает возможность децентрализации электроснабжения при существовании экономического эффекта с ценологической точки зрения. Особенно эффективно внедрение распределенной генерации [2] в системы электроснабжения жилых зданий, так как тепловые потери генерирующих установок можно использовать для отопления, значительно увеличивая коэффициент полезного действия при использовании энергетических ресурсов [3]. Для организации системы электроснабжения с распределенной генерацией требуется предварительная оценка режимов и качества электроснабжения проектируемой системы. Одним из наиболее удобных инструментов оценки проектируемой системы является ее имитационное моделирование [4]. Анализ литературы показывает, что создано значительное количество имитационных моделей систем электроснабжения жилых зданий с распределенной генерацией.

Децентрализация электроснабжения рассмотрена в работе [5] на примере имитационного моделирования ЭТС с РГ в современном программном

пакете SympowerSystems (MatLab). Имитационная модель включает МикроГЭС и частный многоквартирный дом. В данной работе рассмотрена устойчивость режимов работы ГЭС при изменяющейся с течением суток нагрузке. Схемы замещения отдельных видов электроприемников не рассмотрены, электроприемники представлены в виде активно-индуктивных нагрузок, расчет параметров схем замещения электроприемников и других элементов системы электроснабжения не приведен, не рассмотрена возможность оценки качества электроэнергии.

В работе [6] моделирование электросистемы выполнено в программном пакете MATLAB. Рассмотрен график нагрузок характерных электроприемников офиса.

Расчет параметров схем замещения электроприемников и других элементов системы электроснабжения не приведен.

Влияние нелинейных нагрузок на показатели качества электроэнергии трехфазной системы подробно рассмотрено в работе [7]. Приведены имитационные S-модели. Однако электросистема, рас-

смагиваемая в работе, не включает основные виды бытовых электроприемников.

Децентрализация системы электроснабжения рассмотрена в работе [8] на примере электротехнической системы индивидуального жилищного строительства (ИЖС). Имитационное моделирование системы ИЖС выполнено в программном пакете SymPowerSystems (MatLab). Рассмотрены основные бытовые электроприборы (телевизор, компьютер, драйверы энергосберегающих ламп, холодильник, стиральная машина и т.п.). Показана возможность оценки качества электроэнергии в виде расчета суммарных коэффициентов гармонических искажений напряжения и тока. Однако представляется недостаточно проработанным вопрос моделирования электропривода бытовых приборов, в структуру которого, как правило, входит частотный преобразователь. Базовым элементом частотного преобразователя является полупроводниковый электронный ключ (тиристор, транзистор), обладающий нелинейной вольт-амперной характеристикой. Известно, что нелинейная нагрузка является причиной гармонических искажений. Поэтому при моделировании системы электроснабжения с распределенной генерацией с целью оценки основных параметров, в частности, качества электроэнергии, необходимо включать в имитационную модель частотно регулируемый электропривод. Также следует отметить, что в работе не приведен расчет параметров схем замещения электроприемников и других элементов системы электроснабжения.

Таким образом, разработанные модели электроснабжения жилых зданий с распределенной генерацией обладают рядом недостатков: не представлены основные виды электроприемников, схемы замещения отдельных электроприемников некорректны, не приведен расчет параметров схем замещения электроприемников и других элементов электросистем, не рассмотрена методика измерения основных параметров системы. В этой связи существует необходимость обобщения полученных ранее результатов и создания имитационной модели системы электроснабжения жилых зданий с распределенной генерацией, учитывающей вышеперечисленные недостатки. Поэтому целью данной

работы является разработка имитационной модели системы электроснабжения жилых зданий с распределенной генерацией, учитывающей основные виды электроприемников, описание расчетов схем замещения электроприемников и других элементов электросистемы, рассмотрение методики измерения основных параметров системы.

**Имитационная модель системы ЭТС с РГ.** Имитационная модель представляет собой автономную систему электроснабжения шести частных домов (рис. 1).

В качестве генерирующей установки системы выбран идеальный источник трехфазного напряжения бесконечной мощности (например, в установке используются схемотехнические решения источников бесперебойного питания с двойным преобразованием MAKELSAN BX 3360).

В модели источник сформирован соединением трех однофазных источников AC Voltage Source по схеме «звезда», у которых заданы следующие параметры: peak amplitude (максимальная амплитуда)  $6000 \cdot \sqrt{2}$ , frequency (частота) 50, phase (смещение фазы) 0, 120 и  $-120$  — соответственно для каждого источника.

Блок 2 (Three-Phase VI Measurement) измеряет межфазные (phase-to-phase) или фазные (phase-to-ground) напряжения и токи, осциллограммы которых снимают осциллографы 5 (Scope).

Распределительные линии системы выполнены воздушными линиями электропередач (блок 3 — Three-Phase Series RLC Branch, блок 6 — Series RLC Branch, branch type — RL).

Оценка токовой нагрузки проводов линии выполнена по формуле [9]:

$$I_{\phi} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\lambda}}$$

где  $I_{\phi}$  — фазный ток,  $S$  — полная мощность силового трансформатора,  $U_{\lambda}$  — линейное напряжение.

Значения активного и реактивного сопротивления  $R$  и Inductance  $L$  соответственно рассчитываются по формулам:

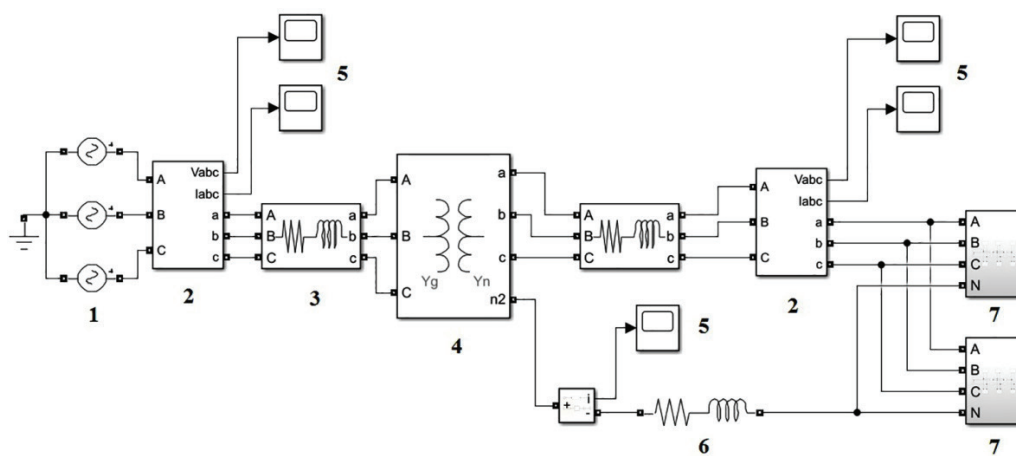


Рис. 1. Имитационная модель ЭТС с РГ:

- 1 — трехфазный источник питания;
- 2 — блок измерения напряжения и тока;
- 3 — трехфазная линия электропередачи;
- 4 — трехфазный трансформатор с глухозаземленной нейтралью;
- 5 — осциллографы измерения тока и напряжения;
- 6 — однофазная линия электропередачи;
- 7 — блок из трех жилых зданий

Расчетные параметры s-модели трансформатора

Расчетные параметры	Формулы для расчета	Результаты расчета
Номинальная мощность фазы трансформатора, ВА	$S_{\text{нф}} = \frac{S_{\text{н}}}{3}$	21000
Номинальное фазное напряжение первичной обмотки, В	$U_{\text{1нф}} = \frac{U_{\text{1н}}}{\sqrt{3}}$	3464
Номинальный фазный ток первичной обмотки, А	$I_{\text{1нф}} = \frac{S_{\text{нф}}}{U_{\text{1нф}}}$	6,06
Фазный ток холостого хода, А	$I_{\text{ф.х.х}} = \frac{I_{\text{1нф}} \cdot I_{\text{х.х}}}{100}$	0,15
Полное сопротивление ветви намагничивания, Ом	$Z_{\text{х.х}} = \frac{U_{\text{1нф}}}{I_{\text{ф.х.х}}}$	22860
Мощность потерь холостого хода на фазу, Вт	$P_{\text{ф.х.х}} = \frac{P_{\text{х.х}}}{3}$	66,67
Коэффициент мощности холостого хода	$\cos \varphi_{\text{х.х}} = \frac{P_{\text{ф.х.х}}}{U_{\text{1нф}} \cdot I_{\text{ф.х.х}}}$	0,13
Активное сопротивление ветви намагничивания, Ом	$R_{\text{М}} = Z_{\text{х.х}} \cdot \cos \varphi_{\text{х.х}}$	2902
Реактивное сопротивление ветви намагничивания, Ом	$X_{\text{М}} = Z_{\text{х.х}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{х.х}}}$	22670
Фазное напряжение короткого замыкания, В	$I_{\text{ф.к.з}} = \frac{U_{\text{1нф}} \cdot U_{\text{к.з}}}{100}$	155,89
Полное сопротивление короткого замыкания, Ом	$Z_{\text{к.з}} = \frac{U_{\text{ф.к.з}}}{I_{\text{1нф}}}$	25,71
Мощность потерь короткого замыкания на фазу, Вт	$P_{\text{ф.к.з}} = \frac{P_{\text{к.з}}}{3}$	433,33
Коэффициент мощности короткого замыкания	$\cos \varphi_{\text{к.з}} = \frac{P_{\text{ф.к.з}}}{U_{\text{ф.к.з}} \cdot I_{\text{1нф}}}$	0,46
Активное сопротивление короткого замыкания, Ом	$R_{\text{к.з}} = Z_{\text{к.з}} \cdot \cos \varphi_{\text{к.з}}$	11,79
Реактивное сопротивление короткого замыкания, Ом	$X_{\text{к.з}} = Z_{\text{к.з}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{к.з}}}$	22,85
Расчет параметров в относительных единицах (о.е.)		
Базисное сопротивление, Ом	$Z_{\text{б}} = \frac{U_{\text{1нф}}}{I_{\text{1нф}}}$	571,43
Активное сопротивление ветви намагничивания, о.е.	$R_{\text{М(о.е)}} = \frac{R_{\text{М}}}{Z_{\text{б}}}$	5,08
Реактивное сопротивление ветви намагничивания, о.е.	$X_{\text{М(о.е)}} = \frac{X_{\text{М}}}{Z_{\text{б}}}$	39,68
Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток, о.е.	$R_{\text{1(о.е)}} = R_{\text{2(о.е)}} = \frac{R_{\text{к.з}}}{2Z_{\text{б}}}$	0,01
Индуктивное сопротивление первичной и вторичной обмоток, о.е.	$X_{\text{1(о.е)}} = X_{\text{2(о.е)}} = \frac{X_{\text{к.з}}}{2Z_{\text{б}}}$	0,02

$$R = R_{yg} \cdot L,$$

$$X = X_{yg} \cdot L,$$

где  $R_{yg}$ ,  $X_{yg}$  — удельные активные и реактивные сопротивления проводов линии соответственно,  $L$  — длина линии.

Для части системы со стороны высокого напряжения выбрана марка провода СИП-3 1×16 с  $R_{yg} = 1,91$  Ом,  $X_{yg} = 0,299$  Ом, допустимая токовая нагрузка 100 А. Для части системы со стороны низкого напряжения выбрана марка провода СИП-2 1×50 с  $R_{yg} = 0,822$  Ом,  $X_{yg} = 0,0794$  Ом, допустимая токовая нагрузка 195 А.

Блок 7 состоит из трех жилых зданий, равномерно распределенных по фазам.

В качестве силового трансформатора системы выбран трехфазный трансформатор с глухо заземленной нейтралью (блок 4 — Three-Phase Transformer со схемой соединения первичной и вторичной обмоток Winding 1 connection Y, Winding 2 connection Yn соответственно).

Исходя из предполагаемой пиковой мощности потребления проектируемой системы (59,9 ВА), расчет s-модели трансформатора выполнен по номинальным параметрам трансформатора ТМ-63/6/0,4.

Параметры s-модели трансформатора (табл. 1) рассчитаны по методике [10–13].

В состав s-модели жилого здания включены следующие бытовые электроприборы: утюг 2 кВт; чайник 1,5 кВт; стиральная машина 0,37 кВт (без учета водонагревателя 1,5 кВт); насос 2,2 кВт; осветительная нагрузка (LED лампа 8 Вт) 0,12 кВт; телевизор 0,34 кВт; персональный компьютер (ПК) 0,2 кВт; ноутбук 0,2 кВт; холодильник 0,3 кВт.

Рассмотрим схемы замещения данных электроприборов и их расчет.

Схемой замещения утюга и чайника является активное сопротивление  $R$ , которое рассчитывается через активную мощность  $P$  и действующее значение напряжения  $U$  по следующей формуле:

$$R = \frac{U^2}{P}.$$

При  $U = 220$  В для утюга мощностью 2 кВт имеем  $R = 24,2$  Ом, а для чайника мощностью 1,5 кВт —  $R = 32,3$  Ом.

Схемы замещения осветительной нагрузки, телевизора, персонального компьютера (ПК), ноутбука и их расчет описаны в работе [14]. Подробно рассмотрим схемы замещения осветительной нагрузки и телевизора, которые представим в виде импульсных источников питания.

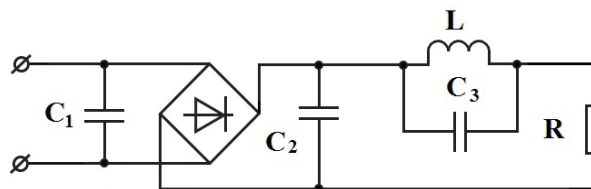


Рис. 2. Схема замещения импульсного источника питания

Схема замещения импульсного источника питания телевизора и осветительной нагрузки приведена на рис. 2.

На рисунке:

$C_1$  — конденсатор подавления ВЧ-помех;  $C_2$  — конденсатор, сглаживающий выходное напряжение мостовой схемы;  $R$  — эквивалент нагрузки электроприемника и ВЧ-преобразователя;  $L-C_3$  — контур, корректирующий коэффициент мощности электроприемника.

Эквивалент нагрузки электроприемника и ВЧ-преобразователя рассчитывается по формуле:

$$R_L = \frac{C \cdot U_{dc}^2}{P_n},$$

где  $U_{dc}$  — выходное напряжение мостовой схемы,  $P_n$  — активная мощность электроприемника,  $C$  — коэффициент сглаживания выпрямленного напряжения.

Значения элементов схемы замещения осветительной нагрузки, телевизора, ПК и ноутбука были выбраны из рекомендуемых диапазонов [15] и скорректированы при отладке s-моделей электроприемников в программе MatLab (табл. 2).

Обязательной частью бытовых электроприборов, таких как холодильник, насос, стиральная машина, является электродвигатель. Поэтому при создании s-моделей данных электроприемников необходим расчет параметров схемы замещения электродвигателя [16]. Одним из распространенных типов двигателя, использующихся в бытовых электроприборах, является асинхронный двигатель. S-модели бытовых электроприборов рассчитаны по номинальным параметрам следующих двигателей: АИРЕ90L4К2 (насос), АИРЕ56В2 (холодильник), АИР63А2 (стиральная машина). Расчетные параметры электродвигателей приведены в табл. 3.

В качестве схемы замещения холодильника (например, Nord с линейным компрессором) и насоса (например, Гном 16-16 с напором воды 16 м) выбран однофазный асинхронный конденсаторный двигатель. При моделировании использовалась s-модель

Таблица 2

Параметры бытовых электроприборов

Вид электроприемника	$P$ , Вт	$R$ , кОм	$C_1$ , мкФ	$C_2$ , мкФ	$C_3$ , мкФ	$L$ , мГн
Светодиодная лампа	8	8,5	0,55	3,2	—	—
Телевизор	300	0,31	0,15	607	0,83	35
ПК	250	0,37	0,62	3,2	0,9	30
Ноутбук	200	0,484	0,62	3,2	0,9	30

Расчетные параметры s-моделей электродвигателей

Расчетные параметры двигателя	Формулы для расчета	Результаты расчета		
		Насос	Холодильник	Стиральная машина
Номинальное фазное напряжение, В	$U_{\phi} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}}$	219,4	219,4	219,4
Синхронная скорость, об./мин	$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$	3000	3000	3000
Номинальное скольжение, о.е.	$s_H = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$	0,067	0,067	0,09
Критическое скольжение, о.е.	$s_{кр} = s_H \cdot (m_{макс} + \sqrt{m_{макс}^2 - 1})$	0,22	0,21	0,37
Синхронная скорость, рад/с	$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$	157,1	314,16	314,16
Номинальная скорость вращения вала, рад/с	$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{p}$	146,6	293,22	285,89
Номинальный момент, Н·м	$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$	15	0,61	1,29
Максимальный момент, Н·м	$M_{макс} = m_{макс} \cdot M_H$	27	1,04	2,86
Пусковой момент, Н·м	$M_{п} = m_{п} \cdot M_H$	25,51	0,31	2,85
Механические потери, Вт	$\Pi_{мех} = 0,03 \cdot P_H$	66	5,4	11,1
Коэффициент приведения	$C$	1,013	1,026	1,03
Приведенное активное сопротивление ротора, Ом	$R_p = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_H + \Pi_{мех}}{I_H^2 \cdot \frac{1 - s_H}{s_H}}$	0,28	1,72	13,08
Активное сопротивление статора, Ом	$R_c = \frac{U_{\phi} \cdot \cos\varphi \cdot (1 - \eta)}{I_H} - C^2 \cdot R_p - \frac{\Pi_{мех}}{3I_H^2}$	3,18	52,99	33,04
Приведенная индуктивность рассеяния статора (ротора), Гн	$L_{cp} = L_{pn} = \frac{U_{\phi}}{4\pi \cdot f_1 \cdot (1 + C^2) \cdot k_I \cdot I_H}$	0,002	0,028	0,03
Индуктивность статора, Гн	$L_c = \frac{U_{\phi}}{2\pi \cdot f_1 \cdot I_H \cdot \sqrt{1 - \cos\varphi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2\pi \cdot f_1 \cdot M_{макс} \cdot s_H}{p \cdot U_{\phi} \cdot s_{кр}}}$	0,16	1,12	1,22
Индуктивность цепи намагничивания, Гн	$L_M = L_c - L_{cp}$	0,16	1,09	1,19

Capacitor-start (для холодильника) и Capacitor-start-run (для насоса).

Также в число электроприемников жилого здания был включен электропривод стиральной машины. В состав электропривода входит преобразовательное устройство, электродвигатель, механическое передаточное устройство (в случае directdrive отсутствует), исполнительный орган (ба- рабан с бельем).

В современных стиральных машинах используется замкнутый электропривод с преобразовательным устройством в виде преобразователя частоты (рис. 3).

Рассмотрим алгоритм работы электропривода с преобразователем частоты. Переменное фазное напряжение преобразуется мостовым выпрямителем 1 (схема Гретца) в постоянное (пульсирующее). Звено постоянного тока 2 (LC-фильтр) сглаживает

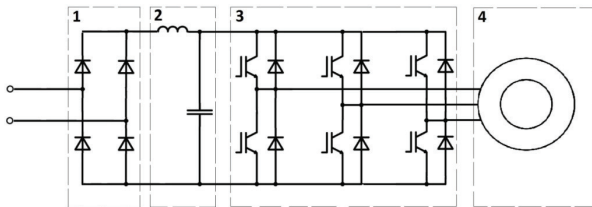


Рис. 3. Структурная схема преобразователя частоты:  
1 — мостовой выпрямитель; 2 — звено постоянного тока;  
3 — инверторный преобразователь; 4 — электродвигатель

пульсации напряжения и тока. Трехфазный инверторный преобразователь 3 выполняет широтно-импульсную модуляцию напряжения на обмотках статора согласно управляющему сигналу (скалярное или векторное управление), поступающему от микроконтроллера через драйвер на электронные ключи. В данном случае в преобразователе стиральной машины используются в ключевом режиме IGBT транзисторы. Датчик скорости, момента на валу и т.п. осуществляют обратную связь между нагрузкой двигателя 4 и алгоритмом управления инверторным преобразователем 3.

В качестве электродвигателя стиральной машины используют асинхронный трехфазный двигатель, коллекторный или бесколлекторный двигателя. В данной работе выбран трехфазный асинхронный двигатель АИР63А2.

При моделировании трехфазного асинхронного двигателя стиральной машины использовалась s-модель Asynchronous Machine.

Подсистема s-модели электропривода стиральной машины с частотным регулированием [17] представлена на рис. 4.

Структура подсистемы соответствует алгоритму работы электропривода стиральной машины, описанному выше. Следует отметить, что блок управления 5 организует аналоговую ШИМ, в которой

управляющий сигнал формируется путем сравнения компаратором пилообразного сигнала высокой частоты (2 кГц) с модулирующим синусоидальным сигналом.

Подсистема s-модели жилого здания представляет собой параллельное включение рассмотренных s-моделей бытовых электроприборов. Для удобства изменения при моделировании суммарной нагрузки жилого здания и ее характера подключение электроприборов к питающей фазе выполнено через блок Breaker (выключатель).

**Методика измерения основных параметров модели ЭТС с РГ.** Действующие значения фазных и линейных напряжений модели трехфазной системы измеряются при помощи последовательного соединения блоков Voltage Measurement, RMS, Display. Клеммы блока Voltage Measurement присоединяют соответственно к фазному и нулевому проводу или к фазным проводам. Действующие значения токов определяют при помощи последовательного соединения блоков Current Measurement, RMS, Display. Значения активной и реактивной мощностей определены соединением блоков Current, Voltage Measurement с соответствующими входными портами блока Power Measurement. Выходные порты Power Measurement соединяют с блоком Display.

Осциллограммы токов и напряжений измеряют при помощи последовательного соединения блоков Current или Voltage Measurement и Scope. Также осциллограммы токов и напряжений могут быть измерены последовательным соединением блоков Three-Phase V-I Measurement и Scope.

Для реализации гармонического анализа напряжений и токов системы используют блок Powergui. При этом необходимо перед иницированием расчета модели для каждого блока Scope выполнить последовательность команд: Scope parameters, History, Save data to workspace, Structure with time, ввести наименование переменной напряжения или тока. После завершения расчета модели выполняют сле-

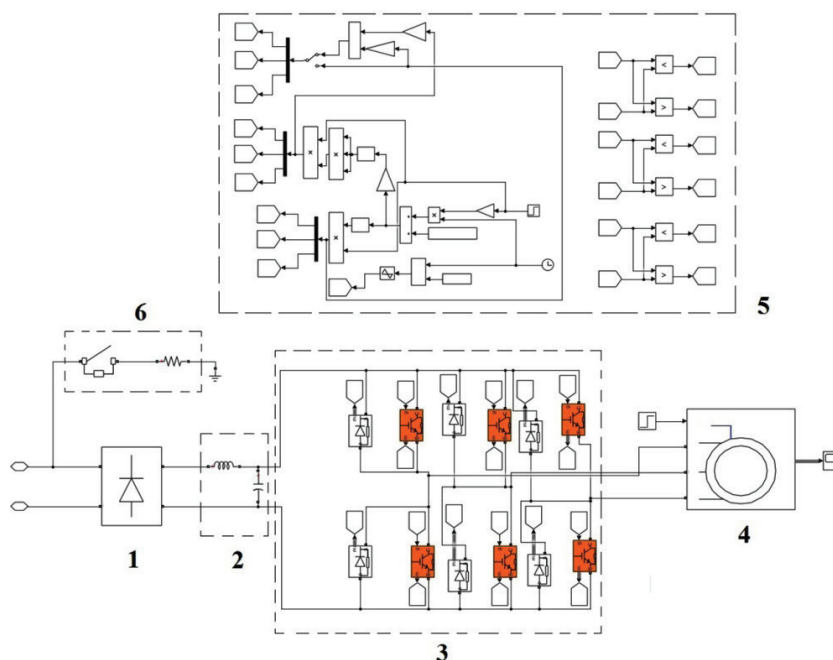


Рис. 4. Подсистема s-модели электропривода стиральной машины:  
1 — мостовой выпрямитель; 2 — звено постоянного тока;  
3 — инверторный преобразователь; 4 — трехфазный асинхронный двигатель;  
5 — блок управления; 6 — водонагреватель

Действующие значения напряжений и токов, активной и реактивной мощности s-модели ЭТС с РГ

$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$U_{ab}$ , В	$U_{bc}$ , В	$U_{ac}$ , В	$I_a$ , А	$I_b$ , А
216,5	216,9	220,2	377,1	377,9	377,3	58,6	59,3
$I_a$ , А	$I_b$ , А	$P_a$ , Вт	$P_b$ , Вт	$P_c$ , Вт	$Q_a$ , Вар	$Q_b$ , Вар	$Q_c$ , Вар
36,3	28,3	11293,2	11368,1	6418,4	5557,5	5773,9	4539,5

дующую последовательность команд: Powergui, FFT Analysis, выбор переменной. Основные функции, которые доступны в окне FFT Analysis блока Powergui: построение гистограммы гармонических составляющих выбранной переменной (вкладка Var), вывод спектра гармонических составляющих выбранной переменной (вкладка List).

Результаты измерений действующих значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности s-модели ЭТС с РГ (четырёхпроводная трехфазная система) со стороны низкого напряжения приведены в табл. 4.

Здесь:  $U_a, U_b, U_c$  — фазные напряжения;  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ac}$  — межфазные напряжения;  $I_a, I_b, I_c$  — фазные (линейные) токи;  $I_n$  — ток в нулевом проводе системы;  $P_a, P_b, P_c$  и  $Q_a, Q_b, Q_c$  — активные и реактивные мощности, измеренные на шинах силового трансформатора.

Спектр гармонических составляющих фазного напряжения модели представлен 3 (7,31 %), 5 (1,58 %), 7 (3,16 %) и 9 (0,39 %) гармониками. THD (Total Harmonic Distortion) — суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения [18] равен 8,88 %.

**Выводы.** Разработана имитационная модель системы электроснабжения шести жилых зданий в программном пакете Simscape Power Systems (Matlab). Модель учитывает основные виды электроприемников жилого здания.

В работе описан расчет параметров схем замещения электроприемников, линий электропередач и силового трансформатора. Рассмотрена методика измерения основных параметров системы при помощи блоков  $U, I, P$  Measurement и Powergui. Приведены результаты измерений основных параметров системы.

#### Библиографический список

1. Зиновьев Е. В., Мумладзе Д. Г., Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В. Возможность применения альтернативных источников энергии в Омском регионе // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 1 (67). С. 70–73. DOI: 10.23670/IRJ.2018.67.104.
2. Pehnt M., Cames M., Fisher C. [et al.]. Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems. Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 346 p. ISBN 978-3-540-25582-6.
3. Slingerland S. Energy conservation and electricity sector liberalization in the Netherlands and UK: case studies on the development of cogeneration of heat and power, wind energy and demand-side management as energy conservation options // International Journal of Global Energy Issues. 2003. Vol. 19, № 1. С. 95–114. DOI: 10.1504/IJGEI.2003.002384.
4. Асиев А. Т. Автономные системы электроснабжения в отдаленных районах: обоснование целесообразности использования и методы оценки показателей качества электроэнергетики на основе имитационного моделирования // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 3 (39). С. 80–94.
5. Бастрон А. В., Коровайкин Н. В., Костюченко Л. П. Моделирование автономной системы электроснабжения многоквартирного сельского дома от микроГЭС // Ползуновский вестник. 2012. № 4. С. 78–82.
6. Sandels C., Broden D., Widen J. [et al.]. Modeling office building consumer load with a combined physical and behavioral approach: Simulation and validation // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 472–485. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.141.
7. Tan R. H., Ramachandramurthy V. K. A comprehensive modeling and simulation of power quality disturbances using MATLAB/Simulink // Power quality issues in distributed generation. InTech, Rijeka. 2015. P. 83–107. DOI: 10.5772/61209.
8. Авербух М. А., Жилин Е. В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40–45.
9. Никитин К. И. Принципы построения, алгоритмы и модели токовых защит электроэнергетических систем: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 291 с.
10. Новаш И. В., Румянцев Ю. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12–24.
11. Дед А. В. Расчет параметров Simulink-модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 68–74.
12. Dommel H. W. Electromagnetic transients program reference manual (EMTP Theory Book). Prepared for Bonneville Power Administration. P.O. Box 3621. Portland, Ore., 97208, USA. 1986.
13. Dommel H. W. Techniques for analyzing electromagnetic transients // IEEE Computer Applications in Power. 1997. Vol. 10, no. 3. P. 18–21.
14. Цырук С. А., Янченко С. А., Рыжкова Е. Н. Моделирование основных источников несинусоидальности в бытовых электросетях // Вестник МЭИ. 2013. № 3. С. 67–71.
15. Цырук С. А., Янченко С. А. Моделирование гармонического состава входного тока светодиодных светильников // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. Орел, 2013. С. 103–106.
16. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab. SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
17. Лысенко О. А., Белодедов А. Е., Беляев П. В. Создание модели частотно-регулируемого электропривода с блоком суперконденсаторов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Омск, 2017. С. 269–271. ISBN 978-5-8149-2453-7.
18. Ded A. V., Maltsev V. N., Sikorski S. P. Comparative analysis of the specifications on the power quality of the European union and the Russian Federation // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Ser. Metrology, Standardization, Quality:



**КОСАРЕВ Борис Андреевич**, инженер по специальности «Промышленная электроника».

Адрес для переписки: BorisK\_88@mail.ru

**ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 2389-6978

#### Для цитирования

Косарев Б. А., Федоров В. К. Модель электротехнической системы с распределенной генерацией // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 64–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-64-71.

Статья поступила в редакцию 23.09.2019 г.

© Б. А. Косарев, В. К. Федоров