

Климаш С.В.¹, Климаш В.С.¹, Власьевский С.В.²¹ Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет² Дальневосточный государственный университет путей сообщения

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В СРЕДЕ MATLAB

В работе разработан и описан набор математических модулей, необходимых для оценки энергетических показателей при исследовании электротехнических систем и комплексов в среде MatLab. В электротехнической библиотеке SimPowerSystems программного средства MatLab отсутствуют измерительные модули энергетических показателей, характеризующих качество электроэнергии и энергетическую эффективность электротехнических устройств. Представленные модули предназначены для вычисления показателей качества электроэнергии (коэффициенты искажения тока и несинусоидальности напряжения) и показателей энергоэффективности (коэффициенты мощности и полезного действия). Изложены методы и принципы построения модулей. Приводятся развернутые схемы (модели) всех математических модулей. Для совместимости измерительных модулей с математическими моделями электротехнических систем и комплексов в среде MatLab их схемы построены на элементах библиотеки SimulinkLibrary. Приведены результаты опробования разработанных модулей и результаты их проверки на схемах, имеющих описание энергетических показателей аналитическими выражениями.

Ключевые слова: блочно-модульные математические модели, измерительные модули, полная мощность, активная и реактивная мощности, коэффициенты мощности и полезного действия, коэффициенты искажения тока и несинусоидальности напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества электроэнергии и энергосбережение является одним из приоритетных направлений в области электротехники, согласуется с Энергетической Стратегией России на период до 2030 года и рядом отраслевых программ.

Безусловно, в новых электротехнических проектах особое внимание уделяется актуальным результатам исследований – повышению качества тока в электрических сетях и напряжения у потребителей, изучению физических процессов энергообмена и направлению их на повышение коэффициентов мощности и полезного действия.

При исследовании и разработке электротехнических комплексов и систем, включающих электромагнитные и электромеханические устройства, компоненты силовой электроники и микроэлектроники, широкое распространение получил метод математического моделирования с применением программного средства MatLab.

В известных работах по математическому моделированию [4–6] рассмотрены блоки электротехнической библиотеки программного средства MatLab и примеры работы с этими блоками, в [3, 7] даны примеры моделирования силовых схем и систем управления устройств силовой электроники, электропривода, электроснабжения, показаны функциональные возможности отдельных блоков и модулей библиотеки Simulink в форме практикума с иллюстрациями результатов моделирования. Вместе с тем как в самом программном средстве MatLab, так и в литературе по моделированию в этой среде не только отсутствуют математические блоки вычислителей энергетических показателей электротехнических систем, но вообще нет постановки вопросов, связанных с расчетами показателей качества электроэнергии и энергоэффективности.

Выполнив обзор и анализ публикаций [7, 9, 10], в процессе проведения собственного исследования электротехнической системы [2] возникла потребность в разработке специализированных измерительных модулей на основе элементов SimulinkLibrary.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель работы: разработка измерительных модулей, предназначенных для исследования энергетических показателей электротехнических систем и комплексов в среде MatLab.

Для достижения поставленной цели в работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработать математические модели специализированных измерительных модулей и предложить некоторый их набор, позволяющий выполнять всесторонний анализ энергетических показателей электротехнических устройств.
2. Выполнить апробацию и проверку измерительных модулей применительно к простым, хорошо изученным электрическим схемам, имеющим аналитические выражения для энергетических показателей.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ АКТИВНОЙ, РЕАКТИВНОЙ И ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ

Имеющиеся в библиотеке MatLabSimPowerSystems/measurements модули активной и реактивной мощности [5, 6] производят вычисления только по первым гармоникам тока и напряжения и не предназначены для исследования электротехнических устройств с несинусоидальными величинами.

На **рис. 1, а** приведен специализированный измерительный модуль SPD, разработанный для определения численных значений полной S (ВА), активной P (Вт) и реактивной Q (вар) мощностей, используя для этого сигналы мгновенных значений с датчиков напряжения и тока. Схема вычислителя SPD приведена на **рис. 1, б**.

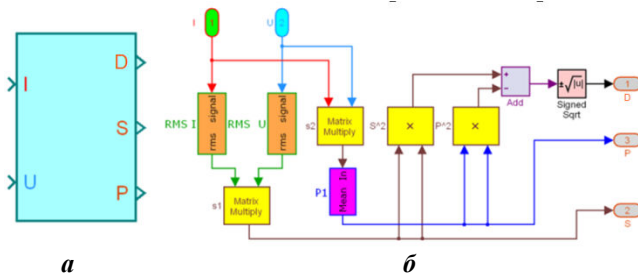


Рис. 1. Модуль активной, реактивной и полной мощности (а) и его развернутая схема (б)

В схеме (см. рис. 1, б) используются следующие блоки Simulink: RMS – блок вычисления среднеквадратичного значения, X – умножитель, ADD – вычитатель, MEAN-блок вычисления среднего значения, Matrix Multiply – блок для умножения мгновенных величин, Signed Sqrt – блок вычисления квадратного корня.

Среднеквадратичные (действующие) значения напряжения и тока, учитывающие их гармонический состав, определяются по формулам:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(\theta)^2 d\theta}; I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(\theta)^2 d\theta}, \quad (1)$$

где $u(\theta)$, $i(\theta)$ – мгновенные значения напряжения и тока, $\theta = \omega t$.

В модуле (рис. 1) численное значение полной мощности определяется через выражения (1), учитывающие искажения тока и несинусоидальность напряжения:

$$S = U \cdot I, \quad (2)$$

где U и I – действующие значения напряжения и тока.

Для определения полной мощности S был использован именно такой способ, потому что он позволяет просто и с минимальной погрешностью вычислить численное значение при любой форме тока и напряжения.

Для вычисления действующих значений тока и напряжения применен блок RMS. Этот блок вычисляет действующее значение сигнала независимо от его формы. Далее перемножение значений U и I выполняется блоком Matrix Multiply из библиотеки MatLab.

Значение активной мощности P получено вычислением средней (среднеарифметической) величины мгновенного значения полной мощности с помощью блока Mean.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T s(\theta) d\theta = \frac{1}{T} \int_0^T u(\theta) \cdot i(\theta) d\theta. \quad (3)$$

В соответствии с [1] составляющими полной мощности S являются активная P и реактивная D мощности, связанные соотношением $S^2 = P^2 + D^2$ [1].

Вычисление реактивной мощности D в измерительном модуле SPD реализовано по формуле

$$D = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (4)$$

Реактивную мощность D можно разложить в

MatLab SimPowerSystems на составляющие Q и T , которые связаны геометрической суммой $D^2 = Q^2 + T^2$. Здесь Q – составляющая реактивной мощности D , обусловленная фазой первой гармоники тока относительно первой гармоники напряжения, и T – реактивная мощность искажения.

Модель для испытания измерительного модуля SPD в среде MatLab приведена на рис. 2, а. Она состоит из источника напряжения AC Voltage Source, к которому через трансформатор Transformer подключен мостовой диодный выпрямитель Univesal Bridge с RL нагрузкой. В момент времени t , равном 0,1 с, ключ Breaker коммутирует электрическую цепь. Осциллограммы выходных сигналов модуля SPD приведены на рис. 2, б.

МОДУЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЧЕРЕЗ МОЩНОСТИ

Этот модуль приведен на рис. 3, а. Он создан для вычисления основных энергетических показателей, характеризующих эффективность потребления и использования электроэнергии. Это коэффициенты мощности K_m , полезного действия η (КПД) и их произведение, получившее название коэффициента энергоэффективности K_ε системы. Коэффициент энергетической эффективности характеризует эффективность и потребления, и использования электроэнергии. Для вычисления энергетических показателей используются сигналы мгновенных значений с датчиков тока и напряжения на входе (I_1 и U_1) и на выходе (I_2 и U_2) системы (устройства). На входы модуля могут подаваться как переменные напряжение и ток, так и постоянные. Схема модуля показана на рис. 3, б.

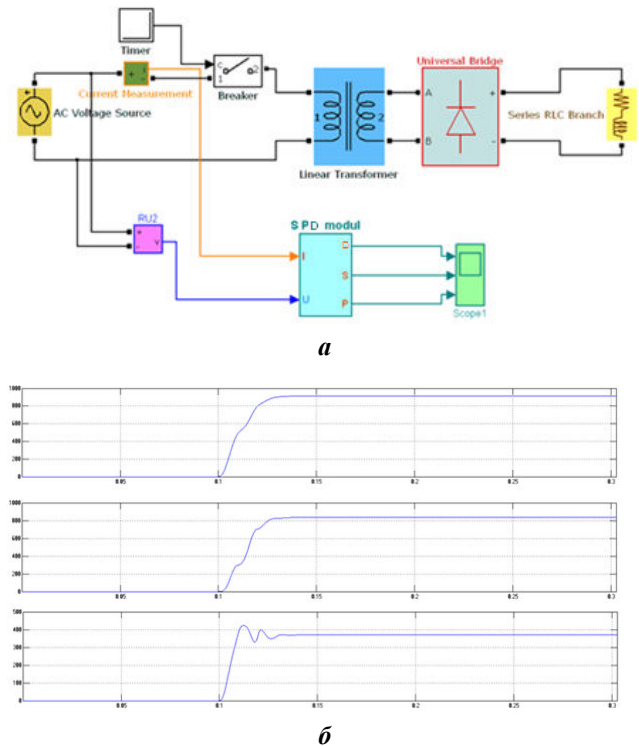


Рис. 2. Модель для испытания измерительного модуля SPD (а) и осциллограммы (б) реактивной (сверху), активной (снизу) и полной (в середине) мощностей

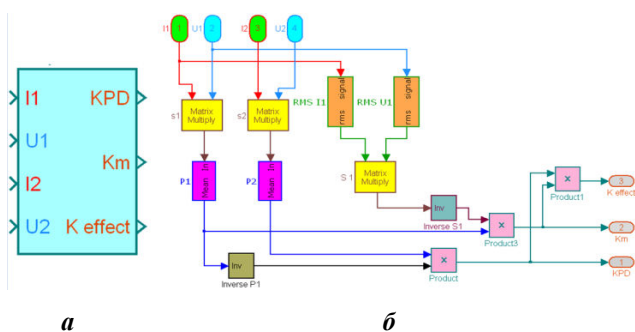


Рис. 3. Модуль для вычисления энергетических показателей через мощности (а) и его развернутая схема (б)

На рис. 3, б использованы следующие блоки Simulink: RMS – вычислитель среднеквадратичного значения, Inv x – блок вычисления обратной величины $1/x$, X – умножитель, MatrixMultiply – блок для умножения сигналов, MEAN – блок вычисления среднего значения.

Модель испытания измерительного модуля вычисления энергетических показателей приведена на рис. 4. Она состоит из однофазного источника напряжения AC Voltage Source, к которому через трансформатор подключен мостовой диодный выпрямитель с RL-нагрузкой.

Модуль (рис 3, а) хорошо подходит для вычисления энергетических показателей на отдельных участках энергосистемы. В его основу положен метод, учитывающий все параметры как входных, так и выходных токов и напряжений. К недостаткам данного модуля можно отнести наличие четырех входов, необходимых для вычисления КПД.

Вычисление КПД произведено по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (5)$$

Здесь P_1 и P_2 – значения активных мощностей на входе и выходе.

Вычисление Km выполнено по формуле

$$Km = \frac{P_1}{S_1}. \quad (6)$$

Данный метод вычисления Km учитывает несинусоидальность напряжения, фазовый сдвиг и искажения тока.

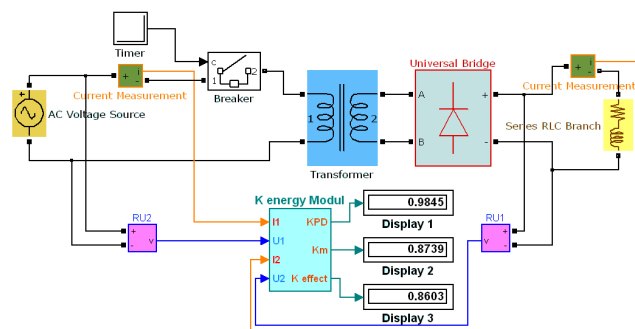


Рис. 4. Модель испытания модуля вычисления энергетических показателей

МОДУЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЧЕРЕЗ КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСКАЖЕНИЯ И СДВИГА ФАЗЫ МГНОВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА

Следует отметить, что входной коэффициент мощности системы может быть определен другим методом через форму и фазу тока сети. Данный метод реализован в модуле, приведенном на рис. 5, а. Схема измерительного модуля, составленного из элементов LibraryBrowser среды MatLab, представлена на рис. 5, б. Основным элементом здесь является блок, осуществляющий преобразование Фурье и выявляющий необходимую гармонику тока, ее амплитуду и фазу (Fourier). Данный блок в этой модели выполняет вычисление амплитуды и фазы первой гармоники тока.

На схеме (рис. 5, б) используются следующие блоки Simulink: RMS – вычислитель среднеквадратичного значения, X – умножитель, Fourier – вычислитель амплитуды и фазы первой гармоники, Inv x – блок вычисления обратной величины $1/x$, SinCos – блок вычисления синуса/косинуса.

Модуль (рис. 5, а) имеет всего один вход для сигнала мгновенного значения исследуемого тока. Такой принцип построения блока удобен при отсутствии несинусоидальности питающего напряжения или в пренебрежении искажениями формы напряжения ввиду их малости, что характерно для источников большой мощности.

Определение коэффициента мощности указанным методом (через сигнал мгновенного значения тока без контроля сигнала мгновенного значения напряжения) стало возможным благодаря тому, что расчет в среде MatLab начинается от нуля напряжения источника (в трехфазной схеме – от нуля напряжения фазы А). Этот метод имеет ограничения при несинусоидальной форме питающего напряжения.

Коэффициент искажения тока определяется по формуле (7) как отношение действующего значения первой гармоники тока, выявленной модулем Fourier, к действующему значению всего тока:

$$\nu = Ki = \frac{I_{(1)}}{I}. \quad (7)$$

Данный коэффициент характеризует процентный состав первой гармоники тока относительно всех гармоник тока и при улучшении гармонического состава стремится к единице.

Коэффициент фазы тока $\cos\phi$ вычислен с помощью блока SinCos из сигнала Angle модуля Fourier.

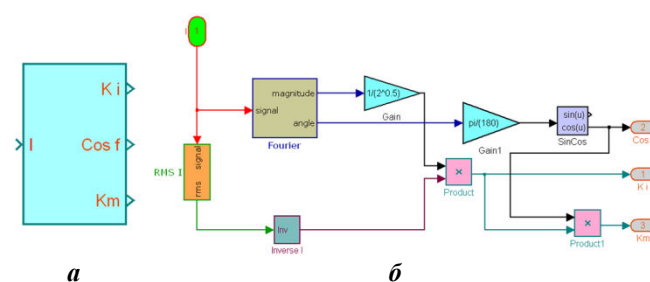


Рис. 5. Модуль для вычисления энергетических коэффициентов через ток (а) и его развернутая схема (б)

И наконец, коэффициент мощности определен по формуле

$$K_m = v \cdot \cos \varphi, \quad (8)$$

из которой можно выявить причины снижения K_m и направить мероприятия или на устранение искажений, или компенсацию реактивной составляющей тока (мощности).

Эта функциональная возможность вычислителя K_m через параметры тока (см. **рис. 5**) выгодно отличает его от вычислителя K_m через мощности (см. **рис. 3**).

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДВУМЯ МЕТОДАМИ

В данном опыте было произведено измерение коэффициента K_m двумя модулями, которые приведены на **рис. 3, а** и **рис. 5, а**. Модель с двумя измерительными модулями и результатами эксперимента на цифровых индикаторах приведена на **рис. 6, а**, осциллограммы исследуемой модели – на **рис. 6, б**.

Сравнительный анализ численного эксперимента по определению коэффициента мощности двумя методами при помощи разработанных вычислителей выполнен в виде определения относительной погрешности, график которой представлен на **рис. 7**.

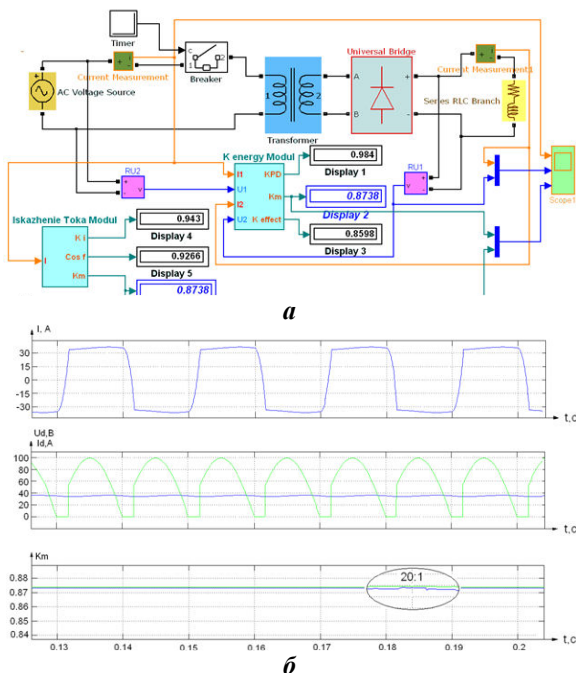


Рис. 6. Модель для сравнительного анализа измерения K_m двумя модулями (а) с осциллограммами (б) входного тока (сверху), постоянного тока и напряжения (в центре) и наложение двух осциллограмм с выходов двух вычислителей коэффициента мощности (снизу)

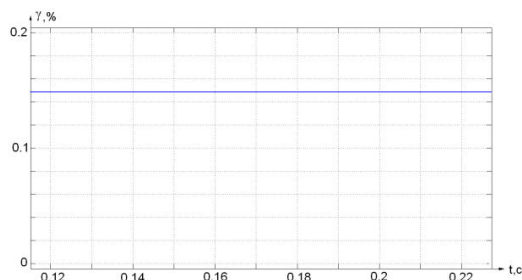


Рис. 7. Временная зависимость относительной погрешности при сравнении результатов измерений коэффициента мощности двумя модулями

Погрешность измерения (**рис. 7**) составляет всего 0,15%, что позволило убедиться в высокой точности вычисления разработанных блоков.

МОДУЛЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

В основу этого вычислителя-оценщика (**рис. 8, а**) положен метод, который без спектрального анализа исследуемого напряжения позволяет определить сумму всех высших гармоник и ее процент по отношению к первой. Сумма высших гармоник в процентном отношении к первой является показателем качества напряжения, характеризующим его несинусоидальность, и нормируется российским ГОСТ 13109-97 и международным IEEE 519-1992 стандартами.

Коэффициент несинусоидальности напряжения

$$K_u = \frac{U_{\Sigma}}{U_1} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Здесь $U_{\Sigma} = \sqrt{U^2 - U_1^2}$ – действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения, которое определяется через U и U_1 – действующие значения исследуемого напряжения и его первой гармоники.

Из выражения (9) видно, что при улучшении гармонического состава напряжения K_u стремится к нулю.

Развернутая схема блока для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения приведена на **рис. 8, б**. Проверка блока в действии выполнена в простейшей схеме, приведенной на **рис. 9, а**. В ней три источника напряжения с разными амплитудами и частотами соединены последовательно и подключены к нагрузке. Исследуемое напряжение иллюстрирует осциллограмма, приведенная на **рис. 9, б**.

На **рис. 8, б** приведены следующие блоки Simulink: X – умножитель, ADD – сумматор, Fourier – вычислитель амплитуды и фазы первой гармоники, RMS – блок вычисления среднеквадратичного значения, MEAN – блок вычисления среднего значения, Devide – блок деления, Matrix Multiply – блок для умножения сигналов, Sqrt – блок вычисления квадратного корня.

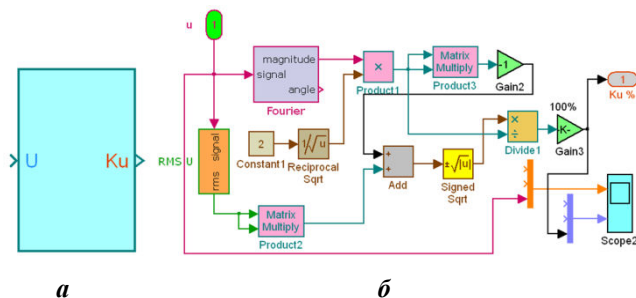


Рис. 8. Модуль для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения (а) и его развернутая схема (б)

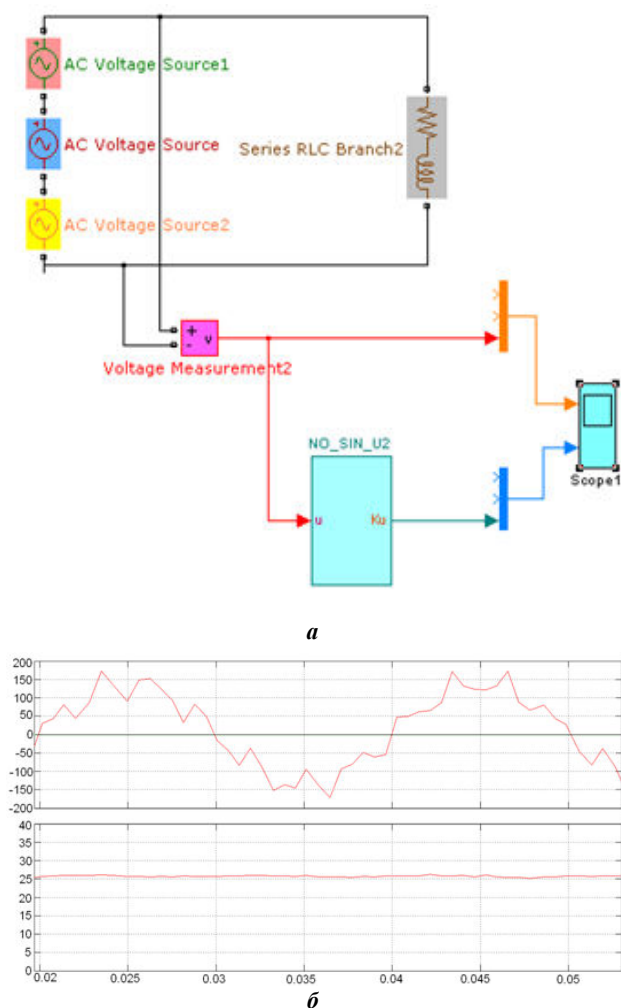


Рис. 9. Схема численного эксперимента по определению коэффициента несинусоидальности напряжения (а) и осциллограмма (б) исследуемого напряжения (сверху) и ее коэффициент несинусоидальности (снизу)

В результате численного эксперимента определено, что коэффициент несинусоидальности исследуемого напряжения со сложной несимметричной формой (процент высших гармоник в исследуемой форме напряжения по отношению к первой гармонике) равен $K_u = 25,2\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение в математических моделях электротехнических комплексов и систем в среде MatLab разработанных специализированных модулей для исследования энергетических показателей позволяет:

- 1) выявить основные причины снижения показателей качества электроэнергии, эффективности ее потребления (генерации) и использования;
- 2) создать измерительную базу с визуальным наблюдением по индикаторам и осциллографам за изменением энергетических показателей в процессе выполнения исследований и поиска новых технических решений;
- 3) разрабатывать на моделях новые способы, устройства, их модификации и осуществлять контроль эффективности их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солодухо Я.Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для ее компенсации. М.: Информэлектро, 1981. 88 с.
2. Свидетельство РФ №2016616629 на программу для ЭВМ. Программный комплекс в среде MatLab для исследования систем тягового и промышленного электроснабжения с применением устройств силовой электроники на трансформаторных подстанциях / С.В. Власевский, С.В. Климаш (Россия). Оpubл. 20.07.2016. Бюл. №7.
3. Климаш В.С. Регулировочные свойства, энергетические показатели и математическое моделирование в среде MatLab выпрямителей и регуляторов переменного напряжения: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО КнАГТУ, 2015. 114 с.
4. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. М.: Диалог МИФИ, 2003. 252с.
5. Черных И.В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. Режим доступа: Matlab.exponenta.ru – интернет ресурс.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
7. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. СПб.: Корона принт, 2001. 320 с.
8. Demchenko Yu. S Investigation of the energy characteristics of high frequency power factor correctors // Электроника та зв'язок. 2014. Т. 19. № 6 (83). С. 34–37.
9. Rodriguez J., Moran L., Pontt J., Osorio R., Kouro S. Modeling and analysis of common-mode voltages generated in medium voltage. IEEE Transactions on Power Electronics. 2003. Т. 18. № 3. С. 873.
10. Rogulina L.G., Sedinin V.I., Fedosov E.V. Measurement of higher harmonics of current for rectifying devices by simulation modeling and MatLab. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. APEIE 2012 – Proceedings 2012. С. 106–109.

Поступила в редакцию 11 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SPECIALIZED MODULES FOR CALCULATION OF ENERGY COEFFICIENTS OF ELECTRICAL ENGINEERING DEVICES IN MATLAB

Stepan V. Klimash

Postgraduate student, Far Eastern State Transport University (FESTU), Komsomolsk-on-Amur, Russia.

Vladimir S. Klimash

Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (KnASTU), Komsomolsk-on-Amur, Russia.

Stanislav V. Vlasayevsky

Professor, Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russia.

When designing electrical systems and systems with power electronics devices exceptionally great attention is paid to assessing the quality of electricity, the efficiency of its consumption and use. In many works in this direction of research conducted in MatLab using blocks and modules of the electrical section SimPowerSystems, which places without measuring modules of indicators characterizing the quality of current and voltage. Also there are no calculators for power factors and efficiency. To eliminate this gap, the authors developed modules for computing quality and efficiency of consumption and energy use in MatLab. There are specialized calculators of efficiency and power factor. They were developed as measuring modules for assessment of current distortion, non-sinusoidal voltage sensors and active, reactive and apparent power, deviations and voltage fluctuations. The methods of determining and principles of measurement as well as the deployed schemes of modules and the results of numerical experimentation in electrical circuits and the measuring accuracy are evaluated. All the computing modules are combined into a common information-measuring system, which controls all power indicators when performing numerical experiments in research.

Keywords: Block-modular mathematical models, measuring modules, total power and its active and reactive components, power and efficiency factors, current distortion and non-sinusoidal voltage coefficients.

REFERENCES

1. Soloduhov Y.Yu. *Sostoyaniye i perspektivy vnedreniya v elektroprihod staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti (obobshcheniye otechestvennogo i zarubezhnogo opyta). Reaktivnaya moshchnost v setyakh s nesinusoidalnymi tokami i staticheskiye ustroystva dlya yeye kompensatsii* [Status and prospects of introducing static reactive power compensators into electric drives (generalization of domestic and foreign experience). Reactive power in networks with nonsinusoidal currents and static devices for its compensation]. Moscow: Informelektro. 1981. 88 p. (In Russian)
2. Vlasayevsky S.V., Klimash S.V. *Programmnyy kompleks v srede MatLab dlya issledovaniya sistem tyagovogo i promyshlennogo elektrosnabzheniya s primeneniym ustroystv silovoy elektroniki na transformatornykh podstantsiyakh* [The certificate of the Russian Federation №2016616629 on the complex of computer programs. The software complex in the MatLab environment for the study of traction and industrial power supply systems with the use of power electronics devices at transformer sub-stations]. Publ. July 20, 2016. Bul. no. 7. (In Russian)
3. Klimash V.S. *Regulirovochnyye svoystva, energeticheskiye pokazateli i matematicheskoye modelirovaniye v srede MatLab vypryamiteley i regulyatorov peremennogo napryazheniya* [Regulating properties, energy indicators and mathematical modeling in the MatLab environment of rectifiers and variable voltage regulators]: Komsomolsk-on-Amur, KnAGTU, 2015. 114 p. (In Russian)
4. Chernykh I.V. *Simulink: Instrument modelirovaniya dinamicheskikh sistem* [Simulink: Instrument for modeling of dynamic systems]. Moscow: Dialogue of MPEPhI, 2003. 252 p. (In Russian)
5. Chernykh I.V. *SimPowerSystems: Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem v Simulink* [SimPowerSystems: Simulation of electro-technical devices and systems in Simulink]. Available at: Matlab.exponenta.ru
6. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystem and Simulink], Moscow: DMK Press, 2008. 288 p. (In Russian)
7. German-Galkin S.G. *Kompyuternoye modelirovaniye poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer simulation of semi-conductor systems in MATLAB 6.0]. S. Peterburg: Crown print, 2001. 320 p. (In Russian)
8. Demchenko Yu.S. *Investigation of energy characteristics of high energy factor correctors. Elektronika ta zvyazok* [Electronics and connectivity], 2014, vol. 19, no. 6(83), pp. 34–37.
9. Rodriguez J., Moran L., Pontt J., Osorio R., Kouro S. Modeling and analysis of common-mode voltages generated in medium voltage. IEEE Transactions on Power Electronics. 2003, vol. 18, no. 3, p. 873.
10. Rogulina L.G., Sedinin V.I., Fedosov E.V. Measurement of higher harmonics of current for rectifying devices by simulation modeling and MatLab. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. APEIE 2012 – Proceedings 2012, pp. 106–109.

Климаш С.В., Климаш В.С., Власьевский С.В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде Matlab // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 11–16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16)

Klimash S.V., Klimash V.S., Vlasayevsky S.V. Specialized Modules For Calculation Of Energy Coefficients Of Electrical Engineering Devices In Matlab. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 11–16. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16)