

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ТОКОВ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Сидоров С.А.¹, Рогинская Л.Э.¹

¹ФГБОУ ВПО «Уфимский Государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12), e-mail: office@ugatu.su

Рассмотрен режим работы трехфазной сети электроснабжения при питании от нее однофазной нагрузки. Предложено использование симметрирующего устройства с индуктивным накопителем энергии, построенным на управляемом энергообмене между сетью и дросселем с помощью трехфазного мостового преобразователя. Разработан источник реактивной мощности на базе индуктивного накопительного элемента, позволяющего вводить в систему электроснабжения реактивную мощность несимметрии с целью компенсации реактивной мощности обратной последовательности. Даны соотношения для токов обратной последовательности, получены расчетные выражения на основе токов нагрузки. Изложен способ вычисления токов обратной последовательности при реализации его на микроконтроллере. Приведена схема экспериментального стенда для исследования работы системы управления симметрирующим устройством и дано описание его работы. Представлены осциллограммы, показывающие форму управляющих сигналов микроконтроллера.

Ключевые слова: несимметрия токов, несимметрия напряжений, симметрирующее устройство, соотношение для токов

METHOD FOR OBTAINING CONTROL SIGNALS FOR BALANCING DEVICES BASED ON NEGATIVE SEQUENCE CURRENTS

Sidorov S.A.¹, Roginskaya L.E.¹

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia (450000, Republic Of Bashkortostan, Ufa, street K. Marx, building 12), e-mail: office@ugatu.su

Considered operation three-phase power supply with the powered of it single-phase loads. A usage of a balancing device with an inductive energy storage for a controlled power exchange between the network and the reactor using a three-phase bridge converter is proposed. Reactive power source is designed based on the inductive storage element to be introduced into the power system reactive power unbalance in order to compensate the reactive power of the reverse sequence. Relations for negative sequence currents, obtained on the basis of the calculated expression load currents are given. Method for calculating negative sequence currents in the implementation of microcontroller is set out. The scheme of the experimental stand for the study of the control system of balancing device and the description of their functioning are described. Waveforms showing the form of control signals microcontroller are presented.

Keywords: voltage unbalance, unbalance currents, balancing device, ratio of currents.

При включении в трехфазную сеть мощных однофазных нагрузок появляется несимметрия токов и напряжений. Типичным видом таких нагрузок в промышленности является сварочное оборудование, индукционные печи, тяговые подстанции железнодорожного транспорта, электрифицированного на переменном токе. При этом ухудшается качество электроэнергии и увеличиваются потери энергии [2]. Имеется ряд схем симметрирующих устройств, но накопительный элемент в них чаще всего емкостного типа. Однако современная элементная база позволяет использовать индуктивные накопители энергии. Любую несимметрично загруженную систему можно представить в виде трех систем, систем нулевой, прямой и обратной последовательности фаз [1]. Именно обратная

последовательность фаз характеризует степень несимметрии в системе и может быть использована в качестве задающего сигнала для симметрирующего устройства, нормализующего характеристики питающей сети.

По нашему мнению, информации о способах получения управляющих сигналов для симметрирующих устройств, в частности на основе токов обратной последовательности, крайне мало, и данная работа призвана несколько улучшить существующее положение дел.

Соотношения для токов обратной последовательности

Система обратной последовательности состоит из трех векторов \overline{A}_2 , \overline{B}_2 , \overline{C}_2 , равных по величине, угол сдвига между которыми составляет 120° . Причем вектор \overline{B}_2 опережает \overline{A}_2 на 120° .

$$\left. \begin{aligned} \overline{B}_2 &= a\overline{A}_2 \\ \overline{C}_2 &= a^2\overline{A}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$.

Для трехпроводной сети при заданных несимметричных токах нагрузки \overline{I}_A , \overline{I}_B , \overline{I}_C токи обратной последовательности фаз \overline{I}_{A2} , \overline{I}_{B2} , \overline{I}_{C2} равны:

$$\overline{I}_{A2} = \frac{\overline{I}_A + a^2\overline{I}_B + a\overline{I}_C}{3} \quad (1.2)$$

$$= \frac{a\overline{I}_A + \overline{I}_B + a^2\overline{I}_C}{3} \quad (1.3)$$

$$\overline{I}_{C2} = \frac{a^2\overline{I}_A + a\overline{I}_B + \overline{I}_C}{3} \quad (1.4)$$

В любой момент времени сумма токов в трехфазной системе равна нулю (справедливо как для прямой так и для обратной последовательности токов) или $\overline{I}_{A2} + \overline{I}_{B2} + \overline{I}_{C2} = 0$, следовательно, один из них равен сумме двух других не только векторно, но и по мгновенным значениям. Согласно этим соображениям можно получить 6 вариантов, которые иллюстрирует таблица 1. Границами вариантов являются переходы токов через нуль. Все варианты в таблице 1 расположены определенным образом: такое чередование знаков фаз характерно для обратной последовательности тока, считая, что при $t = 0$ ток \overline{I}_A переходит через нуль [3].

Таблица 1

Возможные случаи соотношения токов

	1	2	3	4	5	6
\overline{I}_{A2}	«+» (>0)	«+» (>0)	«+» (>0)	«-» (<0)	«-» (<0)	«-» (<0)
\overline{I}_{B2}	«+» (>0)	«-» (<0)	«-» (<0)	«-» (<0)	«+» (>0)	«+» (>0)
\overline{I}_{C2}	«-» (<0)	«-» (<0)	«+» (>0)	«+» (>0)	«+» (>0)	«-» (<0)

Способ получения управляющих сигналов для системы управления симметрирующим устройством на основе токов обратной последовательности

Рассмотрим способ получения управляющих сигналов соответствующих токам обратной последовательности I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} по соотношениям (1.2-1.4) при реализации его на микроконтроллере, работающем с частотой 12,6 кГц. В трехфазной сети без нулевого провода промышленной частоты за один период тока (при $f_n = 50$ Гц, $T_{\text{син}} = 20$ мс) измеряются мгновенные значения токов нагрузки I_A , I_B , I_C – 252 измерения за период. Для каждого из токов нагрузки создается одномерный массив размерностью 253 элемента. Измеренные токи нагрузки сохраняются в соответствующем ему одномерном массиве. Такие массивы данных можно рассматривать как циклический буфер, при переполнении массивов в них последовательно записываются новые мгновенные значения токов нагрузки I_A , I_B , I_C .

Далее для получения токов обратной последовательности I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} по соотношениям (1.2-1.4) из массива данных извлекаются значения токов нагрузки, соответствующие тому оператору трехфазной системы, на который в соотношении (1.2-1.4) умножается ток нагрузки. Например, чтобы получить выражение $a^2 I_B$ из соотношения 1.2, необходимо вектор I_B повернуть против часовой стрелки на угол 240° или по часовой стрелке на 120° . Если бы за период тока I_B проводилось 360 измерений, то выражение $a^2 I_B$ можно было бы получить, извлекая из циклического буфера измерение $N = n - 240$ тока нагрузки I_B , если в данный момент производится измерение $N = 240$ или последующее измерение тока I_B . На всех измерениях тока I_B до измерения $N = 240$ выражение $a^2 I_B$ можно было бы получить, извлекая из циклического буфера измерение $N = n + 120$ тока I_B . Здесь под измерением $N = n + 120$ понимается $N = 120$ измерение тока I_B в прошедшем периоде тока нагрузки I_B .

Но так как за период тока I_B проводится только 252 измерения, то оператор трехфазной системы a будет соответствовать извлечению из буфера данных измерения $N = n - 84$ в текущем периоде тока нагрузки. Оператору трехфазной системы a^2 соответствует извлечение из циклического буфера измерения $N = n - 168$ в текущем периоде тока нагрузки или измерения $N = n + 84$ в прошедшем периоде тока нагрузки.

Например, выражение $a^2 I_B$ из соотношения 1.2 получается извлечением из циклического буфера измерения $N = n - 168$, начиная с измерения $N = 168$ тока I_B , или извлечением из циклического буфера измерения $N = n + 84$ в остальных случаях.

Аналогично, для получения выражения $a I_C$ из соотношения 1.2 необходимо извлечь из циклического буфера измерение $N = n - 84$ тока I_C на измерениях $N = 84$ и последующих измерениях тока I_C . На всех измерениях до измерения $N = 84$ выражение $a I_C$ из

соотношения 1.2 получается извлечением из циклического буфера измерения $N = n + 168$ (измерение $N = 168$ предыдущего периода тока I_C).

Таким образом, токи обратной последовательности I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} вычисляются после каждого измерения токов нагрузки I_A , I_B , I_C – 252 измерения за 20 мс, т. е. частота измерений 12,6 кГц. Это дает возможность симметрирующему устройству мгновенно реагировать на изменение несимметричной нагрузки в ходе производственного процесса.

Практическая реализация способа получения управляющих сигналов

На рисунке 1 представлена электрическая схема блока переключения транзисторов, где на рисунке 1а QF1 – вводной трехфазный автоматический выключатель, R1 – резистор (однофазная нагрузка), ACS712 – датчик тока [6], LM358 – усилитель; на рисунке 1б LM7805 – регулятор положительного напряжения 12/5 В; на рисунке 1в X6 – выход программатора; на рисунке 1г VH 6,7,8 – светодиодные индикаторы; на рисунке 1г ATMEGA32A-TQFP44 – микроконтроллер [7]; на рисунке 1д DH1 – цифровой индикатор. К отходящим фазам А, С трехфазного вводного автомата QF1 подключен резистор R1, на котором датчиком ACS712 измеряется ток и далее через схему усиления LM358 передается микроконтроллеру ATMEGA32A-TQFP44. Мгновенное значение тока отображается на цифровом индикаторе DH1. Микроконтроллером в соответствии с управляющей программой на языке ANSI C [5] вычисляются токи обратной последовательности и вырабатываются управляющие воздействия на IGBT-транзисторы KEY1-6. На макетной плате сделаны выводы KEY1-6 для соответствующих транзисторов. Осциллограммы управляющих сигналов с выводов KEY1-6 приведены на рисунках 2а-б.

Из рисунка 2а-б видно, что в момент времени $t = 2 - 4$ мс длится вариант 1 из таблицы 1. Системой управления [4] формируется управляющий сигнал на включение транзистора №6 (рисунок 2е), переключение транзисторов № 1 (рисунок 2а) и № 2 (рисунок 2б) для потребления тока из фаз А и В и отдача в фазу С. Далее последовательно происходит формирование управляющих сигналов в соответствии с другими возможными соотношениями токов из таблицы 1.

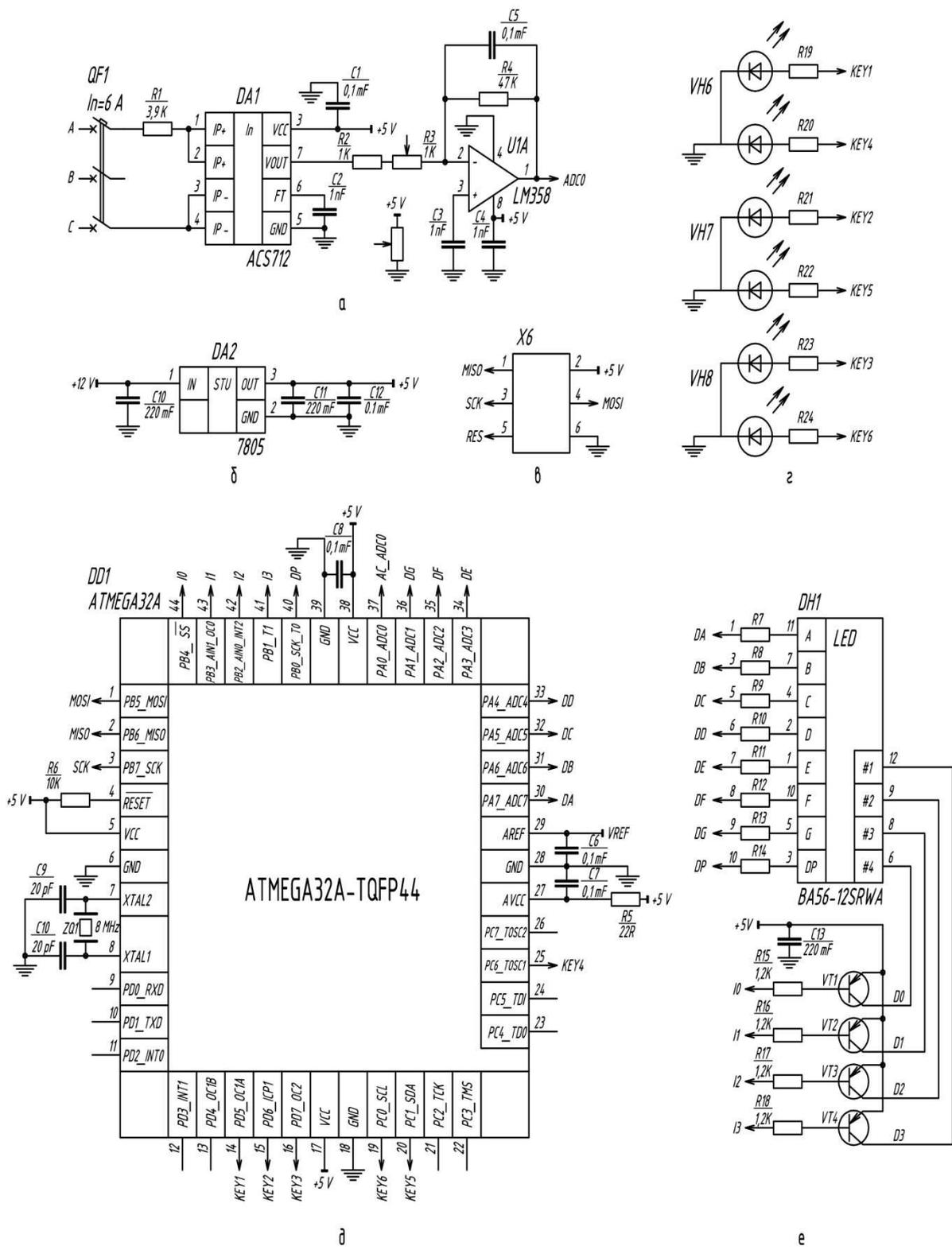


Рис. 1. Тестовая схема блока переключения транзисторов симметрирующего устройства

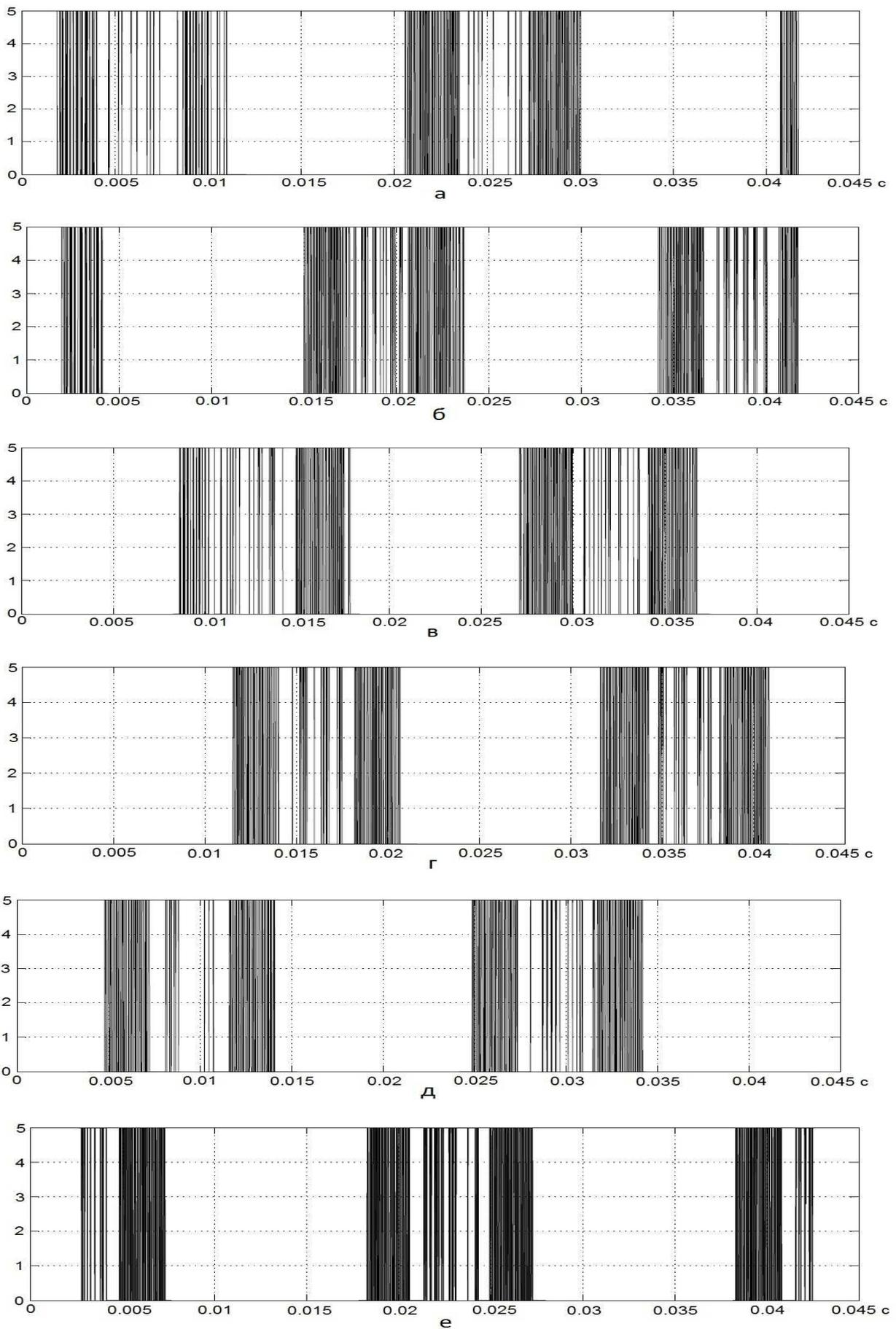


Рис. 2. Осциллограммы формы управляющих сигналов микроконтроллера за 0,045с («5» – включено, «0» – выключено) для КЕУ1-6 на рисунке 1 (а-1, б-2, в-3, г-4, д-5, е-6)

В ходе экспериментального исследования получены осциллограммы управляющих сигналов на основе вычисленных токов обратной последовательности. Данные управляющие сигналы далее поступают на драйверы IGBT-транзисторов, которые осуществляют управляемый энергообмен между сетью и дросселем. Изложенный выше способ получения управляющих сигналов подтвердил свою работоспособность и высокое быстродействие.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Гардарики, 2007. — 200 с.
2. Карташев И.И., Зуев Э.Н. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы ее контроля и обеспечения. — М.: Издательство МЭИ, 2000. — 46 с.
3. Сидоров С. А., Рогинская Л.Э., Караваяев А.А. Фазопреобразовательное устройство для несимметричных нагрузок: сб. науч. тр. / Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. — Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2013. С. 121–125.
4. Сидоров С. А., Рогинская Л.Э. Регулируемое симметрирующее устройство с индуктивным накопителем энергии: сб. науч. тр. / Вестник ЮУрГУ серия «Энергетика». — Челябинск: Южно-Уральск. гос. авиац. техн. ун-т, 2014. № 3, Т. 14, С. 33–40.
5. Сидоров С.А., Гайсин А.В. Система управления симметрирующим устройством // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015612477.
6. Паспорт ACS712: официальный сайт фирмы Allegro MicroSystems [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.allegromicro.com/media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.pdf (дата обращения: 17.05.15).
7. Паспорт ATMEL ATMEGA32: официальный сайт фирмы Atmel Corporation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.atmel.com/images/doc2503.pdf (дата обращения: 17.05.15).

Рецензенты:

Гизатуллин Ф.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры электромеханики, кафедра электромеханики ФГБОУ ВПО Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа;

Шапиро С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физики, кафедра физики ФГБОУ ВПО Уфимского государственного университета экономики и сервиса, г. Уфа.