

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

Роман Михайлович Панов  
Наталья Викторовна Прибылова  
Сергей Александрович Филонов

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенными потребителями электрической энергии на промышленных и агропромышленных предприятиях. В процессе эксплуатации часто возникает необходимость запитать трехфазный асинхронный электродвигатель от однофазной электрической сети, для чего авторами предлагается электронное устройство, осуществляющее оптимальное подключение трехфазного электродвигателя мощностью от 1 до 3 кВт в однофазную сеть. Это устройство дает возможность регулировать частоту вращения электродвигателя за счет использования дешевого и простого в применении частотного преобразователя напряжения. Диапазон регулирования частоты питающего напряжения составляет 40–100 Гц. В основу устройства положен инвертор, выполненный на современной элементной базе. Задающий генератор выполнен на таймере КР1006ВИ1. Регулирование эффективного значения подаваемого на обмотки двигателя напряжения осуществляется с помощью метода широтно-импульсной модуляции. Основными компонентами разработанной электронной схемы являются: делитель тактовой частоты; формирователь импульсов трехфазной последовательности; оптрон, осуществляющий гальваническую развязку «верхнего» и «нижнего» ключей; транзисторы, используемые в качестве силовых ключей, позволяющие коммутировать ток 37 А и выдерживающие напряжение до 1000 В; электронный трансформатор для питания устройства управления; диоды; интегральный стабилизатор напряжения; конденсаторы емкостью 560 мкФ×400 В. Охлаждение осуществляется тремя вентиляторами с напряжением питания 12 В. Разработана и изготовлена печатная плата устройства на двустороннем фольгированном стеклотекстолите. Разработанное устройство обеспечивает высокий уровень мощности на валу электродвигателя, выполнено на современной элементной базе, обладает высоким быстродействием, компактностью, надежностью, сравнительно невысокой стоимостью и не нуждается в наладке.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трехфазный асинхронный электродвигатель, питание от однофазной сети, частотный преобразователь напряжения, метод широтно-импульсной модуляции, регулирование частоты вращения.

## FREQUENCY CONVERTER USED FOR POWER SUPPLY OF THREE-PHASE AC INDUCTION MOTOR FROM SINGLE-PHASE NETWORK

Roman M. Panov  
Natalia V. Pribylova  
Sergey A. Filonov

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Three-phase AC induction motors with squirrel-cage rotor are the most common devices in industrial and agro-industrial enterprises consuming electrical energy. During operation, the necessity arises to energize three-phase AC induction motor from single-phase electrical network, and the authors for these reasons propose an electronic device providing optimal connection into single-phase network of three-phase AC induction motor with 1-3 kW of power per unit. This device makes it possible to adjust motor speed of rotation by incorporating cheap and easy-to-use frequency voltage converter. Frequency control band of the supply voltage is 40-100 Hz. The device is based on an inverter implemented on a modern element base. Master oscillator is based on КР1006ВИ1 timer. Regulation of the effective value of the voltage supplied to the motor winding is carried out using Pulse Width Modulation method. The main components of the developed electronic circuit are: time frequency divider, three-

phase sequence pulse shaper, optocoupler performing galvanic separation of the upper and lower keys, transistors used as force multipliers for switching current of 37 A and withstanding voltage up to 1000 V, electronic transformer for powering the control device, diodes, integral voltage stabilizer, capacitors with a capacity of  $560 \mu\text{f} \times 400 \text{ V}$ . Cooling is carried out by three fans with a supply voltage of 12 V. The PCB of the device was designed and manufactured on two-side foil-clad glass textolite. The developed device provides a high level of power output, implements modern element base, has a high speed of operation, compactability, reliability, relatively low cost and practically need no adjustment.

KEYWORDS: three-phase AC induction motor, single-phase electrical network, frequency voltage converter, Pulse Width Modulation method, speed frequency control.

**Н**аиболее распространенным электрическим двигателем, применяемым для привода различных механизмов, является трехфазный асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Широкое применение таких АД обусловлено простотой их конструкции и изготовления, высокой надежностью и невысокой стоимостью. Кроме того, они не имеют щеточно-коллекторного узла или узла контактных колец, что обеспечивает минимальные эксплуатационные расходы. Благодаря вышеперечисленным преимуществам такие машины не теряют работоспособность по истечении срока службы и при отработке всего моторесурса, отпущенного промышленным станкам и механизмам. Часто, после списания их с производства, такие АД попадают в частные руки и могут использоваться в домашних мастерских, на садовых участках и т. п. При этом трехфазный АД, при определенных условиях, может вполне выполнять свои функции и при питании от однофазной сети.

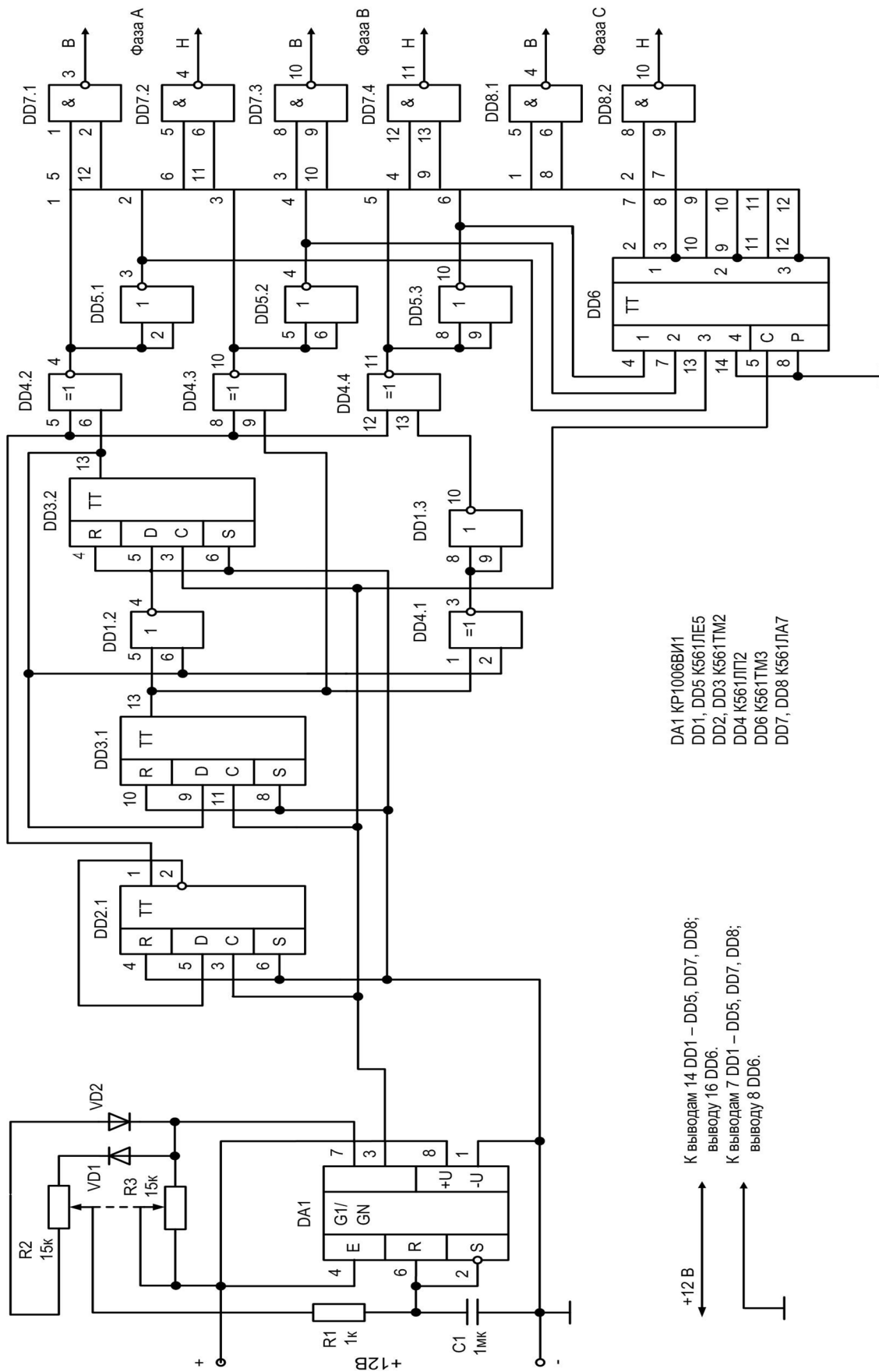
В данной статье представлены авторские предложения по оптимальному подключению асинхронных трехфазных двигателей в однофазную сеть за счет использования энергоэффективного [4], дешевого и простого в применении частотного преобразователя напряжения [5]. Существуют другие методы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть, основанные на различных способах использования фазового сдвига токов в обмотках с применением емкостных элементов, которые в настоящей статье не рассматриваются, так как при этом частично теряется мощность асинхронной машины и отсутствует возможность регулирования ее частоты вращения [3, 9]. Предложенное преобразовательное устройство может применяться как для питания стандартных электрических машин, так и для асинхронных электродвигателей специальных конструкций [1].

Преобразователь частоты служит для питания трехфазного АД от однофазной сети с возможностью регулировки частоты вращения. Электрическая схема преобразователя частоты приведена на рисунке 1. В основу положен инвертор для питания трехфазного двигателя [7], выполненный на современной элементной базе.

В бытовой технике наиболее широко распространены электродвигатели мощностью от 1 до 3 кВт с частотой трехфазной сети  $50 \div 400$  Гц. Именно для таких электродвигателей и был разработан преобразователь частоты. Задающий генератор выполнен на таймере DD1 NE555 [10].

Главная трудность, возникающая при разработке частотного регулятора, состоит в необходимости изменять вместе с частотой и эффективное значение подаваемого на обмотки двигателя напряжения [2].

При снижении частоты переменного тока уменьшается индуктивное сопротивление обмотки, что приводит к недопустимому возрастанию тока. Чтобы избежать перегрева обмотки, необходимо снижать напряжение питания двигателя методом широтно-импульсной модуляции. Частота следования импульсов регулируется резистором R3, а длительность импульсов – резистором R2. Поскольку они связаны механически, то при уменьшении частоты одновременно уменьшается длительность импульса. Таким образом, тактовые импульсы поступают на формирователь импульсов трехфазной последовательности.



- DA1 KP1006BI1
- DD1, DD5 K561PE5
- DD2, DD3 K561TM2
- DD4 K561ЛП2
- DD6 K561TM3
- DD7, DD8 K561ПА7

К выводам 14 DD1 – DD5, DD7, DD8;  
 Выводу 16 DD6.  
 К выводам 7 DD1 – DD5, DD7, DD8;  
 Выводу 8 DD6.

+12 В

Рис. 1. Схема преобразователя частоты

На D-триггере DD2.1 выполнен делитель тактовой частоты на 2. На D-триггере DD3.1, DD3.2 и логическом элементе DD1.2 выполнен делитель тактовой частоты на 3 со скважностью 3 (отношение периода к длительности импульса). На логических элементах DD4.1-DD4.4, DD1.3, DD5.1-DD5.3 выполнен формирователь импульсов трехфазной последовательности. Скважность этих импульсов равна 2. С помощью D-триггеров микросхемы DD6 получают трехфазную импульсную последовательность, задержанную относительно исходной. Это необходимо для образования пауз между импульсами, открывающими силовые транзисторы преобразователя. На тактовый вход микросхемы DD6 подаются тактовые импульсы с логического элемента DD1.1. Если на входе D микросхемы DD6 низкий уровень, то информация от входа D появится на выходе Q во время низкого уровня тактового импульса. Если на входе D высокий уровень, передача данных будет иметь место при высоком уровне на входе C. Таким образом, состояние триггеров микросхемы DD6 изменяется по спадам тактовых импульсов, а не фронтам, чем и достигается задержка, равная длительности тактового импульса. Из прямых и инверсных выходных сигналов всех триггеров устройства (логические элементы DD7.1-DD7.4, DD8.1, DD8.2) формируются импульсы управления «верхним» (В) и «нижним» (Н) силовыми ключами преобразователя.

Три одинаковых узла силовых ключей преобразователя построены по схеме, изображенной на рисунке 2.

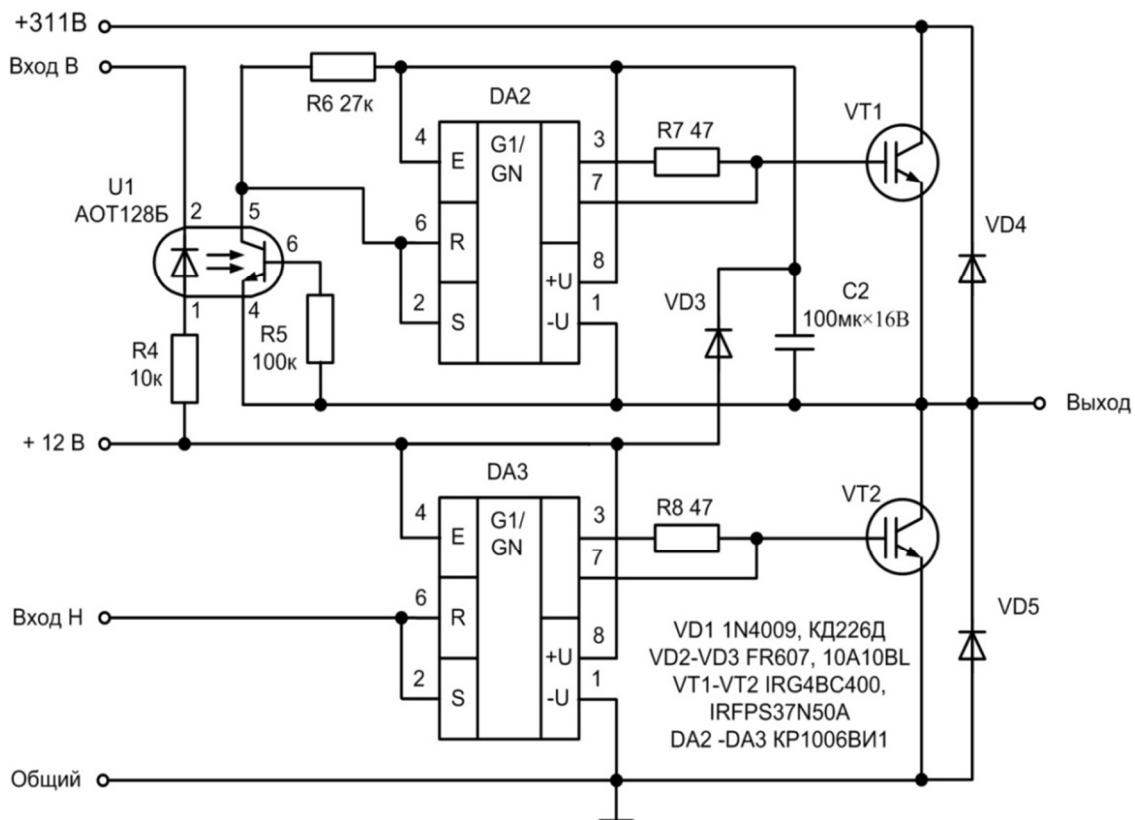


Рис. 2. Схема силовых ключей преобразователя

Для раскачки выходных полевых транзисторов VT1 и VT2 использованы таймеры NE555 DA2 и DA3, работающие в режиме инвертирующих триггеров Шмидта [8, 10]. Они позволяют получить импульсы тока затвора транзисторов амплитудой до 200mA, что гарантирует быстрое переключение. Микросхема DA2 питается с помощью «бустрепного» способа питания. Этот способ позволяет не использовать трансформатор питания с несколькими изолированными вторичными обмотками отдельных выпрямителей и стабилизаторов напряжения для питания аналогичных узлов в каждой из фаз [12, 13].

Гальваническую развязку «верхнего» и «нижнего» ключей осуществляет оптрон U1. Выходной сигнал оптрона инвертирован по отношению к входному сигналу. Когда открыт транзистор VT2, минусовой вывод конденсатора C1 фактически соединен с общим проводом. Через диод VD1 этот конденсатор заряжается до напряжения 12 В. При закрытом транзисторе VT2 закрыт диод VD1, но накопленный конденсатором C1 заряд остается достаточным для питания микросхемы DA2, пока транзистор вновь не будет открыт.

В качестве силовых ключей используют транзисторы IRFPS37N50A фирмы International Rectifier, позволяющие коммутировать ток 37А и выдерживающие напряжение  $U_{CU}$  до 1000В. Еще лучше использовать транзисторы типа IGBT. В IGBT совмещены два способа управления электрическим током, один из которых характерен для полевых транзисторов (управление электрическим полем), а второй – для биполярных (управление инжекцией носителей электричества) [6].

Для обозначения электродов IGBT принято использовать термины «эмиттер», «коллектор» и «затвор». У IGBT – маленькое напряжение в открытом состоянии, меньшее, чем в полевом транзисторе. Уменьшение напряжения приводит к пропорциональному снижению мощности, рассеиваемой транзистором. Нами использовались транзисторы фирмы International Rectifier IRG4BC40U, способные коммутировать ток 40 А, напряжение насыщения 1,7 В.

Для питания устройства управления использовался электронный трансформатор для питания галогенных ламп. Он выполнен в виде преобразователя напряжения сети в низковольтное напряжение 15 В с частотой 45 кГц [11]. Это напряжение выпрямляется диодами, способными работать на такой частоте, такими как КД226Д, КД213А и т. д. Выпрямленное напряжение стабилизируется интегральным стабилизатором напряжения на 12 В с изолированным корпусом, который прикручивают к шасси преобразователя. В качестве силового выпрямителя используется мост MB3510, способный выпрямить ток 35А напряжением 1000 В. Он также прикрепляется к шасси преобразователя винтом, при этом посадочное место моста должно быть предварительно смазано теплопроводящей пастой КПТ.

Выпрямленное мостом сетевое напряжение заряжает два конденсатора емкостью 560 мкФ  $\times$  400 В, включенных параллельно, а затем подается на силовые ключи. Чем больше мощность нагрузки, тем больше должна быть емкость конденсаторов. Силовые транзисторы установлены на общем радиаторе с помощью изолирующих прокладок (кремнеорганических). Радиатор обдувается потоком воздуха, создаваемого тремя вентиляторами. Питание вентиляторов осуществляется от выпрямителя блока управления (до стабилизатора напряжения). Напряжение питания вентиляторов составляет 12 В.

При эксплуатации преобразователя необходимо учесть, что ток в обмотках АД и вращающий момент на валу двигателя пропорциональны магнитному потоку в его статоре, который, в свою очередь, пропорционален отношению приложенного к обмоткам напряжения к частоте. С уменьшением частоты питающего напряжения, при его неизменном эффективном значении, ток в обмотках растет. Это ведет к перегреву двигателя и силовых ключей преобразователя частоты, то есть при уменьшении частоты необходимо уменьшать напряжение питания. Но, если взять нижнюю границу изменения частоты в 40 Гц, то напряжение можно не уменьшать. Верхнюю границу можно без опасения взять в 100 Гц.

Печатная плата изготовлена на двухстороннем фольгированном стеклотекстолите. Для более простого изготовления (методом лазерного принтера и утюга) эскиз платы был выполнен в программе Spring Layout v5.0.

### Выводы

Таким образом, разработано электронное устройство для питания трехфазного асинхронного электродвигателя от однофазной сети, которое обеспечивает высокий

уровень мощности на валу электродвигателя, позволяет осуществлять регулирование частоты вращения асинхронного электродвигателя как вниз, так и вверх от номинальной, не нуждается в наладке и начинает работу сразу после подачи на него напряжения питания.

### Библиографический список

1. Анненков А.Н. Моделирование и поиск рациональной конструкции асинхронного двигателя малой мощности с повышенным пусковым моментом / А.Н. Анненков, С.А. Филонов, А.И. Шиянов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – № 4. – С. 120–123.
2. Афоничев Д.Н. Математическая модель управляемого асинхронного электродвигателя / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, М.А. Степин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения : матер. междунар. науч.-практ. конф., посвященной 115-й годовщине со дня рождения профессора Харитончика Е.М. (г. Воронеж, 6 апреля 2017 г.) : в 2 ч. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – Ч. 2. – С. 10–15.
3. Афоничев Д.Н. Основы научных исследований в электроэнергетике / Д.Н. Афоничев. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – 204 с.
4. Груздев К.П. Применение частотно-регулируемого привода как способ повышения энергосбережения / К.П. Груздев, В.В. Панин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : матер. междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 6–7 июня 2018 г.) : в 2 ч. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – Ч. II. – С. 66–69.
5. Кутняхов Д.И. Применение преобразователя частоты для модернизации электропривода токарного станка / Д.И. Кутняхов, В.А. Черников, Н.В. Прибылова // Инновационные технологии и технические средства для АПК : матер. международной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – С. 100–104.
6. Лачин В.И. Электроника : учеб. пособие для студентов вузов / В.И. Лачин, Н.С. Савелов. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2004. – 572 с.
7. Мурадханян Э. Управляемый инвертор для питания трехфазного двигателя / Э. Мурадханян // Радио. – 2004. – № 12. – С. 37–38.
8. Техническое обслуживание измерительных трансформаторов. Трансформаторы тока и напряжения ; сост. Ф.Д. Кузнецов ; под ред. Б.А. Алексеева. – Москва : ЭНАС, 2017. – 96 с.
9. Устройство защиты электродвигателя от неполнофазных режимов работы и перегрузки / Д.Н. Афоничев и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4 (55). – С. 117–123.
10. Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы : справочник / В.Л. Шило. – 2-е изд., исправленное. – Москва : Радио и связь, 1989. – 352 с.
11. Шрайбер Г. 300 схем источников питания. Выпрямители. Импульсные источники питания. Линейные стабилизаторы и преобразователи (в помощь радиолюбителю) / Г. Шрайбер ; пер. с французского. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 224 с.
12. Brewster H.D. Digital Electronics / H.D. Brewster. – Jaipur (India) : Oxford Book Company, 2009. – 307 p.
13. Sinclair I.R. Practical Electronics Handbook / I.R. Sinclair, J. Dunton. – 6<sup>th</sup> edition. – Oxford-Boston : Newnes, 2007. – 590 p.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Роман Михайлович Панов – ведущий инженер кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: panov1982@yandex.ru.

Наталья Викторовна Прибылова – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: n.pribylova@mail.ru.

Сергей Александрович Филонов – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: filonovser@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 16.02.2019

Дата принятия к печати 12.03.2019

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Roman M. Panov, Leading Engineer, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: panov1982@yandex.ru.

Natalia V. Pribylova, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: n.pribylova@mail.ru.

Sergey A. Filonov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: filonovser@yandex.ru.

Received February 16, 2019

Accepted March 12, 2019