

## УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ОТ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ПЕРЕГРУЗКИ

Дмитрий Николаевич Афоничев  
Вячеслав Иванович Калашник  
Наталья Викторовна Прибылова  
Сергей Александрович Филонов

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Асинхронный электропривод является одним из наиболее распространенных устройств, потребляющих электроэнергию, которые используются как на промышленных, так и на сельскохозяйственных предприятиях. В процессе эксплуатации асинхронных электродвигателей часто возникают аварийные режимы, связанные с токовыми перегрузками, которые могут существенно снизить срок службы и вызвать повреждения электродвигателей. Используемые для их защиты предохранители, автоматические выключатели или тепловые реле обладают рядом недостатков. Предлагается электронное бесконтактное устройство, осуществляющее защиту электродвигателя от неполнофазных режимов работы и перегрузки по току. Принцип работы устройства защиты основан на том, что оно регистрирует ток в двух питающих фазах и сравнивает с установленным порогом срабатывания, что является необходимым и достаточным условием для защиты электродвигателя от аварийных режимов работы. Основными компонентами разработанной электронной схемы являются трансформаторы тока, выпрямители, стабилизатор тока, выполненный на транзисторе, стабилитрон. В качестве устройства сравнения используется микросхема интегрального стабилизатора, которая имеет внутренний источник опорного напряжения, усилитель рассогласования и мощный выходной ключ. RS-триггер выполнен на логических элементах. Для коммутации нагрузки, подключенной к сети переменного тока, используется электронный ключ с памятью на полевых транзисторах с оптической развязкой силовой цепи и цепи управления. Применение электронного ключа позволяет устранить такие недостатки, присущие электромагнитным реле, как значительная инерционность и невысокая надежность. Разработанное устройство выполнено на современной элементной базе и обладает высоким быстродействием, простотой, компактностью, надежностью и сравнительно невысокой стоимостью.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трехфазный асинхронный электродвигатель, защита электродвигателя, перегрузка по току, обрыв фазы, бесконтактная защита, электронный ключ с памятью.

## DEVICE FOR PROTECTING AN ELECTRIC MOTOR FROM OPEN-PHASE OPERATION MODES AND OVERLOADS

Dmitriy N. Afonichev  
Vyacheslav I. Kalashnik  
Natalia V. Pribylova  
Sergey A. Filonov

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Asynchronous electric drive is one of the most common devices that consume electricity and are used in both industrial and agricultural enterprises. The process of operation of asynchronous electric motors is often accompanied by emergency conditions associated with current overloads, which can significantly reduce the service life and cause damage to electric motors. The fuses, circuit breakers and thermal relays used for their protection have a number of disadvantages. The authors have proposed an electronic noncontact device that protects the motor from open-phase operation modes and current overloads. The operating principle of this protection device is based on the fact that it registers the current in two supply phases and compares it with the predefined trigger threshold, which is a necessary and sufficient condition for protecting the motor from emergency operation modes. The main components of the developed electronic circuit are current transformers, rectifiers, transistorized current stabilizer, and stabilizer diode. A comparison device is an integral stabilizer chip that has an inner reference voltage source, an error amplifier and a powerful output key. The RS flip-flop is designed on logic elements. To commutate the load connected to the AC network, an electronic key is used with memory on FETs with optocoupler of power supply circuit and control circuit. The use of an electronic key allows eliminating such disadvantages of electromagnetic relays as long response time

and low reliability. The developed device is made on a modern element base and is characterized by high speed, simplicity, compactness, reliability, and relatively low cost.

KEY WORDS: three-phase asynchronous electric motor, motor protection, current overload, phase failure, non-contact protection, electronic key with memory.

### **В**ведение

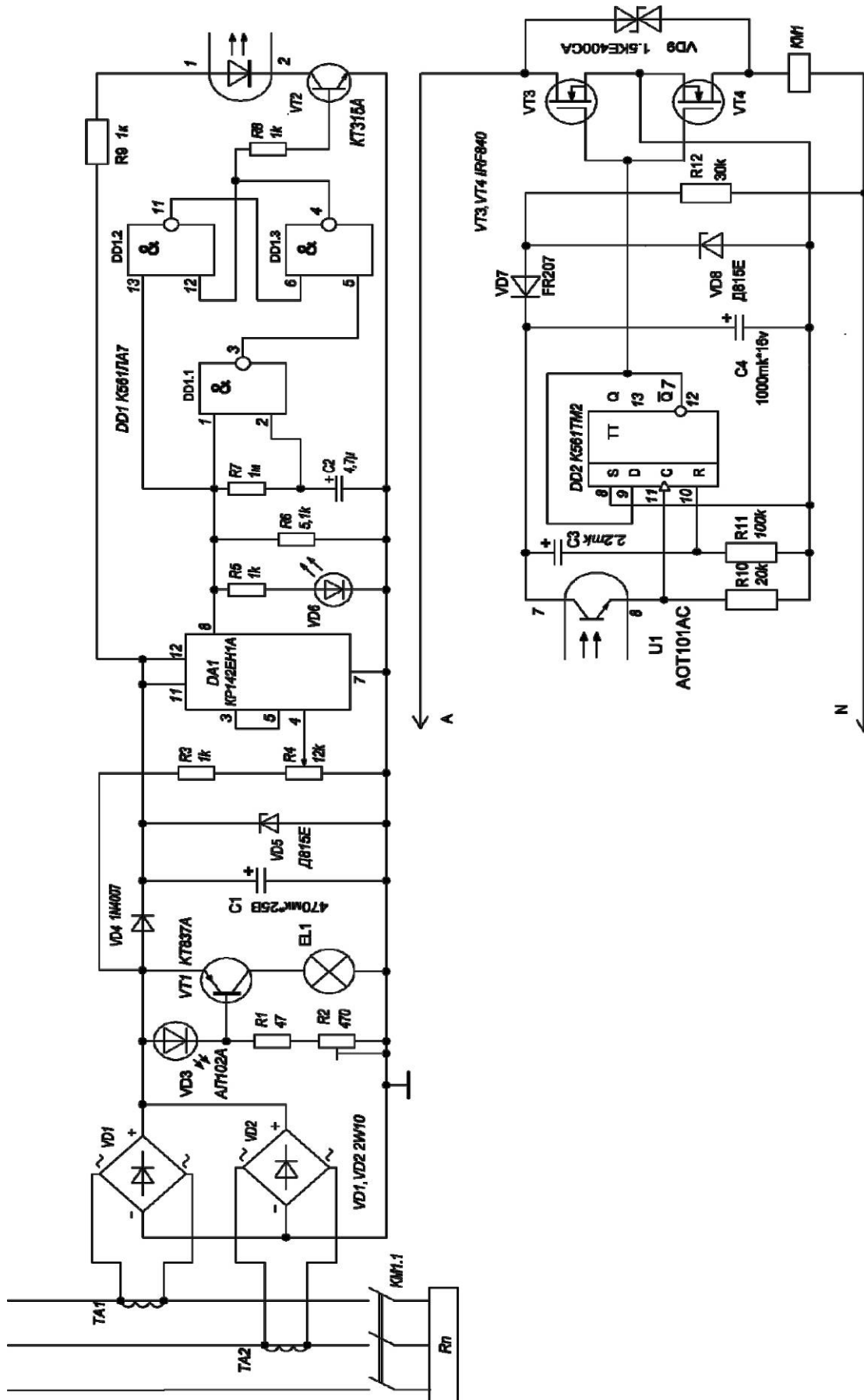
В сельском хозяйстве широко применяются электроприводы на основе трехфазных асинхронных электродвигателей. Во время эксплуатации возможны их повреждения как из-за обрыва фазы, так и из-за перегрузки, заклинивания механизмов. Для защиты электродвигателей от перегрузок обычно используют предохранители в сочетании с магнитным пускателем [6, 7]. Предохранители надежно защищают устройство от перегрузки по току, но нередко сами являются первопричиной другого вида повреждений – обрыва питающей фазы. Защиту от чрезмерно большого тока обеспечивают тепловые реле магнитных пускателей, которые включают в цепь питания электродвигателей [3, 5]. Однако такие реле требуют подстройки при изменении внешней температуры и подбора нагревательных элементов в соответствии с мощностью защищаемого электродвигателя. Нами предлагается устройство, позволяющее избежать этих недочетов.

Разработанное устройство осуществляет защиту электродвигателя как от однофазных режимов работы, так и от перегрузки по току. Данное устройство может применяться как для защиты стандартных асинхронных двигателей, так и для асинхронных электродвигателей специальных конструкций [1, 2]. Оно регистрирует ток в двух питающих фазах и сравнивает с установленным порогом срабатывания. Измерение тока в двух питающих фазах является необходимым и достаточным условием для защиты электродвигателя от аварийных режимов работы [8]. Действительно, обрыв фазы, в которой установлен трансформатор тока, приведет к увеличению тока в двух оставшихся фазах – превышению порога срабатывания и отключению электродвигателя, через заданный временной интервал. Аналогичный случай будет при обрыве фазы, в которой не установлен трансформатор тока.

### **Работа устройства**

Принципиальная электрическая схема устройства представлена на рисунке. Устройство содержит два трансформатора тока ТА1 и ТА2, первичные обмотки которых включены в фазные провода. Напряжение со вторичных обмоток выпрямляется двумя выпрямителями VD1 и VD2 и поступает на стабилизатор тока, который выполнен на транзисторе VT1 [10]. Величину тока можно установить с помощью подстроечного резистора R2. Стабилизатор тока позволяет нагрузить трансформаторы тока, поскольку электродвигатели могут быть разной мощности, а значит, будут использованы трансформаторы тока на различную величину первичного тока. Так как пусковые токи электродвигателей могут достигать значительных величин, то вторичные напряжения трансформаторов тока будут также большими. Использование диода VD4 и стабилитрона VD5 ограничивает напряжение, действующее на стабилизаторе тока, величиной напряжения стабилизации стабилитрона плюс 0,7 В (падение напряжения на диоде VD4). Стабилитрон VD5 ограничивает напряжение питания устройства уровнем в 12 В. Таким образом, устройство получает питание только тогда, когда работает электродвигатель – это продлевает ресурс работы устройства защиты.

Во время нормальной работы электродвигателя и при перегрузке питание двухфазное. Это позволяет использовать сглаживающий конденсатор С1 меньшей емкости и иметь хороший источник питания устройства при малых габаритах. При обрыве одной из фаз питание однофазное, но ток в этом случае в 4–10 раз превышает нормальную величину. Порог срабатывания защиты устанавливается с помощью потенциометра R4.



Принципиальная электрическая схема предлагаемого устройства защиты

В качестве устройства сравнения используется микросхема интегрального стабилизатора DA1 [5]. Она имеет внутренний источник опорного напряжения, усилитель рассогласования и мощный выходной ключ. Опорное напряжение с вывода 5 микросхемы DA1 поступает на один вход усилителя рассогласования (выв. 3), а информационный сигнал с движка потенциометра R4 – на второй вход усилителя рассогласования (выв. 4). Если информационный сигнал превышает опорный, то на выходе (выв. 8) появляется высокое напряжение. Начинает светиться светодиод VD6, и происходит заряд конденсатора C2 через резистор R7. Интегральная цепочка R7-C2 обеспечивает интегральный закон работы устройства. Она также делает временную селекцию, позволяющую отстроиться от случайных причин увеличения тока в цепи электродвигателя. При тех значениях величин резистора R7 и конденсатора C2, которые обозначены на схеме устройства, величина задержки на включение составляет 4 сек. Некоторые электродвигатели, приводящие в движение вентиляторы, молотилки, дробилки, долго раскручиваются – до 12 сек. В этом случае необходимо увеличить постоянную времени интегральной цепочки R7-C2 (скажем, поставить резистор R7 величиной 2 МОм, а конденсатор C2 – 10 мкф) [11, 12].

На логических элементах DD1.2, DD1.3 выполнен RS-триггер, который позволяет получить четкие (крутые фронты) без дребезга импульсы. Здесь используется свойство RS-триггера включаться от первого импульса и не реагировать на последующие входные импульсы. В исходном состоянии (в момент включения питания устройства) на выводе 8 микросхемы DA1 высокий уровень напряжения. В этом состоянии светит светодиод VD6, а на выводах 1 (DD1.1), 13 (DD1.2) присутствует высокий уровень. На выводе 2 (DD1.1) высокий уровень появится только тогда, когда на конденсаторе C2 напряжение превысит уровень  $0,6 U_{пит}$  (приблизительно через 4 с). Для логического элемента 2И-НЕ приоритетным сигналом является низкий уровень и поэтому на выводе 3 (DD1.1) в течение 4 с будет высокий уровень. Высокие уровни на обоих входах RS-триггера являются условием хранения предыдущей информации (на выводе 4 (DD1.3) низкий уровень, транзистор VT2 закрыт, светодиод оптрона U1 не светит).

Работает устройство следующим образом. При пуске двигателя возникает кратковременный бросок пускового тока. Сигнал с потенциометра R4 превышает величину опорного сигнала и поэтому светит светодиод VD6, информирующий о превышении тока. Если это не аварийный режим, то ток быстро вернется к нормальной величине и светодиод погаснет. На выводах 1, 2 (DD1.1), а также на выводе 13 (DD1.2) присутствует низкий уровень напряжения. Это приводит к появлению на входах RS-триггера сигналов, сохраняющих его исходное состояние (на выводе 4 (DD1.3) низкий уровень, транзистор VT2 закрыт, светодиод оптрона U1 не светит). В противном случае ток электродвигателя не изменится, и, если длительность пускового тока окажется больше длительности выдержки на выключение, то это приведет к перевороту RS-триггера. Выходной сигнал триггера подаст высокий уровень напряжения на транзистор VT2, и он включит светодиод оптрона U1. Электронный ключ разорвет цепь питания магнитного пускателя и двигатель остановится. Включить двигатель повторно можно будет только после проверки персоналом причины остановки.

В случае перегрузки электродвигателя светодиод VD6 будет иногда подмигивать. Если перегрузка увеличивается, то частота вспышек будет увеличиваться. Во время действия импульса происходит заряд конденсатора C2, а во время отсутствия импульса происходит разряд конденсатора через резисторы R6, R7. Если длительность импульса превышает длительность паузы, то электродвигатель будет выключен, но не через 4 секунды, а через гораздо большее время. Это время зависит от скважности импульсов. Таким образом обеспечивается интегральный закон защиты. Светодиод VD6 желательно поставить красного цвета.

В качестве трансформаторов тока были использованы трансформаторы фирмы TALEMA AC1050 [9]. Эти трансформаторы должны быть нагружены на сопротивление в 100 Ом. Настроить нагрузку трансформаторов можно резистором R2. Резисторы R2, R4 типа СПЗ-39А. Лампа EL1 служит нагрузкой стабилизатора тока и одновременно индикатором его работы.

Довольно часто требуется коммутировать нагрузку, подключенную к сети переменного тока. Как правило, в подобных устройствах используются электромагнитные реле или тиристоры. Реле требуют большую мощность управляющих сигналов и имеют низкое быстродействие. Тиристоры плохо работают с нагрузкой, потребляемый ток которых сравним с током удержания тиристора. Кроме этого, тиристоры создают помехи (если момент включения не совпадает с моментом перехода сетевого напряжения через нуль). Электронный ключ с памятью – это фактически аналог реле, которое имеет нормально открытые или нормально закрытые контакты. Такой электронный ключ позволяет нагрузке быть включенной или выключенной в момент подачи силового напряжения и быть в этом состоянии до подачи сигнала управления. По приходу сигнала управления состояние ключа изменяется на противоположное и остается в нем до прихода следующего сигнала управления [4].

На нижней части рисунка представлена принципиальная схема электронного ключа с памятью на полевых транзисторах с оптической развязкой цепей управления и силовой. Устройство работает следующим образом. Учтем, что защитные диоды полевых транзисторов включены катодом к стоку. В исходном состоянии каналы полевых транзисторов закрыты (нет питания). Пусть положительная полуволна сетевого напряжения присутствует на выводе N. Ток проходит через резистор R12, стабилитрон VD8, защитный диод полевого транзистора VT3, фазу A. На стабилитроне VD8 возникает падение напряжения в 12 В. Через диод VD7 заряжается конденсатор C4 и микросхемы DD2, U1 получают питание. При отрицательной полуволне сетевого напряжения на выводе N устройство не получает питания, так как защитный диод полевого транзистора VT3 закрыт.

В момент включения электронного ключа в сеть цепочка R11-C3 формирует положительный импульс сброса, устанавливающий D-триггер в начальное состояние (низкий уровень на прямом выходе и высокий уровень на инверсном выходе). Таким образом, на входе D (выв. 9) присутствует высокий уровень. Импульс управления (синхронизации) возникает на резисторе R10 в момент открытия транзистора оптрона U1 при подаче на светодиод оптрона напряжения управления. Данные со входа D (выв. 9) передаются на выход Q (выв. 13) только в том случае, когда на входе синхронизации (выв. 11) действует высокий уровень. Это происходит в момент возрастания напряжения импульса синхронизации. Выход Q до тех пор будет сохранять состояние, установленное данными со входа D на момент действия импульса синхронизации, пока не придет новый импульс синхронизации.

Пусть светодиод оптрона U1 не светит и тогда его транзистор будет закрыт. В результате на выводе 11 триггера DD2 будет присутствовать низкий уровень напряжения, а на выходе (выв. 12) высокий. Транзисторы VT3, VT4 открыты, и нагрузка под напряжением. Ток нагрузки проходит через открытый канал транзистора VT3, открытый канал транзистора VT4 и его защитный диод (для случая – на фазе A положительная полуволна сетевого напряжения). При отрицательной полуволне на фазе A ток нагрузки проходит через открытый канал транзистора VT3 и его защитный диод, открытый канал транзистора VT4 (защитный диод закрыт).

Рассмотрим, как получает питание устройство при открытых каналах транзисторов VT3, VT4. Пусть на фазе A действует положительная полуволна. Ток проходит че-

рез открытый канал транзистора VT3, стабилитрон VD8 (падение напряжения на нем 0,7 В), резистор R12, вывод N. На фазе А действует отрицательная полуволна. Ток проходит через открытый канал транзистора VT3 и его открытый защитный диод, стабилитрон VD8 (падение на нем 12 В), резистор R12, вывод N. Если светит светодиод оптрона U1, он открывает его транзистор. На выводе 11 триггера DD2 высокий уровень напряжения, а на выходе 12 низкий уровень напряжения, который закрывает полевые транзисторы VT3, VT4 и нагрузка обесточена.

При использовании устройства совместно с индуктивной нагрузкой, между стоками транзисторов VT3-VT4 необходимо установить диод 1,5KE400CA, защищающий их от всплесков напряжения, возникающих на индуктивной нагрузке при ее коммутации. Для того чтобы ключ был закрытым в исходном состоянии, необходимо выводы затворов полевых транзисторов подключить к прямому выходу (выв. 12) триггера DD2. При подаче управляющего сигнала ключ будет открываться. Печатная плата разработана для установки транзисторов VT3-VT4 без радиатора. Если ключ должен коммутировать большой ток, то необходимо транзисторы установить на радиаторы, исходя из 1 Вт рассеиваемой мощности на 10 см<sup>2</sup> поверхности радиатора. Если ключ должен коммутировать линейное 3-фазное напряжение в 380 В, то транзисторы должны выдерживать 600 В амплитудного напряжения (КП707В1). Печатная плата имеет размеры 100 × 56 мм. В корпусе микросхемы DD2 находятся два D-триггера, которые включены параллельно, что разрешено техническими условиями на эту микросхему. Это обстоятельство позволяет увеличить выходной ток триггера в два раза.

### **Выводы**

Разработанное электронное бесконтактное устройство для защиты электродвигателей от аварийных режимов работы лишено недостатков, свойственных электротепловым реле и автоматическим выключателям. Оно позволяет защитить электродвигатель от преждевременного износа, вызываемого токовыми перегрузками, продлить ресурс его работы и исключить дорогостоящий ремонт.

---

### **Библиографический список**

1. Анненков А.Н. Математическое моделирование и оптимизация асинхронного двигателя с двухслойным зубчатым ротором / А.Н. Анненков, С.Ю. Кобзистый, С.А. Филонов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – № 1. – С. 57–59.
2. Анненков А.Н. Совершенствование систем возбуждения бесконтактных двигателей / А.Н. Анненков, М.А. Иванов, Н.В. Прибылова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2011. – Вып. 4 (31). – С. 68–71.

3. Вариант схемы защиты электродвигателя при потере фазы питающей сети / Д.Н. Бабенко, Т.П. Гончарова, А.П. Мазуха, Н.А. Мазуха, Ю.И. Солдатов // Молодежный вектор развития аграрной науки : матер. 68-й студенческой науч. конф. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 107–111.
4. Калашник В.И. Регулятор мощности на основе электронного ключа / В.И. Калашник // Международный электротехнический журнал. – 2013. – № 10. – С. 50–51.
5. Ланин В. Оптимизация конструктивно-технологического исполнения интегральных стабилизаторов напряжения / В. Ланин, И. Рубцевич, А. Керенцев // Силовая Электроника. – Санкт-Петербург : ООО «Медиа КиТ», 2010. – № 28. – С. 100–103.
6. Мазуха А.П. Сохранение работоспособности двигателя при обрыве фазы питающей сети / А.П. Мазуха, Н.А. Мазуха // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – Т. 4, № 4 (18). – С. 45–47.
7. Мазуха Н.А. Защита реверсивного асинхронного двигателя с уменьшением «мертвой» зоны / Н.А. Мазуха, В.В. Картавцев, А.П. Мазуха // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1 (48). – С. 88–92.
8. Петько В.Г. Сравнительный анализ токовых защит асинхронных электродвигателей, выполненных на дискретных элементах электроники / В.Г. Петько, Д.Ю. Черяпкин // Совершенствование инженерно-технического обеспечения технологических процессов в АПК : матер. международной науч.-практ. конф. (г. Оренбург, 05-06 февраля 2016 г.). – Оренбург : Оренбургский ГАУ, 2017. – С. 61–65.
9. Техническое обслуживание измерительных трансформаторов тока и напряжения [Электронный ресурс]. – Москва : ЭНАС, 2008. – 96 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/38568> (дата обращения: 12.11.2017).
10. Шрайбер Г. 300 схем источников питания. Выпрямители. Импульсные источники питания. Линейные стабилизаторы и преобразователи [Электронный ресурс]. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 224 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/835> (дата обращения: 12.11.2017).
11. Sinclair I.R. Practical electronics handbook / I.R. Sinclair, J. Dunton. – Sixth edition. – Oxford : Linacre House, Jordan Hill, 2007. – 589 p.
12. Brewster H. Digital Electronics / H. Brewster. – Oxford : Oxford Book Company, 2009. – 307 p.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru).

Вячеслав Иванович Калашник – инженер кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: [kalaviv@mail.ru](mailto:kalaviv@mail.ru).

Наталья Викторовна Прибылова – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: [n.pribylova@mail.ru](mailto: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», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: [filonovser@yandex.ru](mailto:filonovser@yandex.ru).

Дата поступления в редакцию 14.11.2017

Дата принятия к печати 26.11.2017

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Dmitriy N. Afonichev – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39, E-mail: [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru).

Vyacheslav I. Kalashnik – Engineer, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39, E-mail: [kalaviv@mail.ru](mailto:kalaviv@mail.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, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39, E-mail: [n.pribylova@mail.ru](mailto: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, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 224-39-39, E-mail: [filonovser@yandex.ru](mailto:filonovser@yandex.ru).

Date of receipt 14.11.2017

Date of admittance 26.11.2017