

УДК 621.314

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-80-86

## Реализация защит от аварийных режимов в электроприводе вентиляторов малой мощности

М.С. Яковенко, А.С. Анучин, В.Н. Остриров, К.В. Мильский

Статья посвящена разработке инвертора для привода вентиляторов обдува тормозных резисторов и ребер радиатора мощного преобразователя тягового электропривода вагона метро. Поскольку данный привод маломощный, то принято решение о разработке инвертора с минимально возможной стоимостью. Для получения необходимых результатов решено исключить защиты от некоторых аварийных режимов, вероятность которых очень низкая. Предложено использовать дешевые микросхемы драйверов транзисторных ключей, а защиту от короткого замыкания реализовать при помощи трансформаторов тока. Трансформаторы тока имеют очень высокую полосу пропускания и в данном случае могут быть использованы не только для защиты двигателя, но и для защиты транзисторных ключей инвертора. Сигналы от трансформаторов тока выпрямляются маломощным выпрямителем, что позволяет исключить отдельную обработку положительной и отрицательной полуволн фазного тока. Затем выпрямленные сигналы поступают на вход схемы защиты, реализованной на операционных усилителях. Суммарное время отклика системы защиты от короткого замыкания на входной сигнал составляет около 1 мкс. При измерении выходных сигналов трансформаторов тока можно получить достаточное количество данных для организации защит от перегрузки, обрыва фазы, асимметрии нагрузки, а также тепловой защиты. Приведены алгоритмы определения аварийных режимов для их реализации в составе микропроцессорной системы управления электроприводом. Предложенные решения исследованы на математической модели и на макетном образце инвертора и доказали свою работоспособность.

*Ключевые слова:* защита инвертора, трансформатор тока, электропривод, защита от короткого замыкания.

*Для цитирования:* Яковенко М.С., Анучин А.С., Остриров В.Н., Мильский К.В. Реализация защит от аварийных режимов в электроприводе вентиляторов малой мощности // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 80—86. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-80-86.

## Implementation of Emergency Protections for the Electric Drive of Small-Capacity Fans

M.S. Yakovenko, A.S. Anuchin, V.N. Ostrirov, K.V. Milsky

The paper deals with the design of an inverter supplying power to the drive of fans cooling the subway car brake resistors and the traction electric drive power converter's heat sink fins. Since this fan drive is a low-capacity one, it was decided to make the inverter for it with the minimal possible cost. To achieve the desired objective, it was decided to exclude protections from certain very unlikely emergency modes. It was proposed to use cheap IC chips of transistor switch drivers and to implement short-circuit protection using current transformers. The current transformers have a very large bandwidth and can be used in the application in question not only to protect the motor, but also to protect the inverter transistor switches. The current transformer signals are rectified by a low-capacity rectifier, thus making it possible to eliminate separate processing of the phase current positive and negative half-waves. The rectified signals are fed to the input of the protection circuit implemented on operational amplifiers. The total time of short-circuit protection system response to the input signal is about 1  $\mu$ s. In measuring the current transformers' output signals, it is possible to obtain a sufficient amount of data for making overload protection, phase open-circuit fault protection, load imbalance protection, and thermal protection. Emergency modes detection algorithms for implementing them in the scope of the electric drive microprocessor control system are presented. The proposed solutions were investigated on a mathematical model and on the inverter mockup prototype, and the obtained results have demonstrated their efficiency.

*Key words:* inverter protection, current transformer, electric drive, short-circuit fault protection.

*For citation:* Yakovenko M.S., Anuchin A.S., Ostrirov V.N., Milsky K.V. Implementation of Emergency Protections for the Electric Drive of Small-Capacity Fans. Bulletin of MPEI. 2019;3:80—86. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-80-86.

### Введение

Автономные инверторы напряжения широко применяются в современных электроприводах. Это надежное и хорошо зарекомендовавшее себя решение как для бытовой техники, так и для промышленного применения. В состав инвертора входят транзисторные ключи (IGBT или MosFET), драйверы, внутренние источники питания, различные пассивные элементы, например, конденсаторы, фильтры и т. д. Стоимость инвертора складывается из стоимости отдельных ком-

плекующих и может быть снижена при использовании некоторых компромиссных решений.

Один из путей удешевления инвертора — применение бутстрепного питания драйверов верхних ключей [1 — 3]. Также можно отказаться от реализации некоторых защит, но при этом надежность изделия будет зависеть от вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Работа посвящена электроприводу вентиляторов обдува тормозных резисторов и ребер радиатора ох-

лаждения преобразователя тягового привода вагона метро. Инвертор привода установлен на раме под вагоном. Защита от короткого замыкания необходима из-за возможных ошибок монтажа или случайного повреждения изоляции кабеля от инвертора до электродвигателей в течении всего срока эксплуатации. Для электропривода вентиляторов достаточно разомкнутой скалярной системы управления, однако измерение фазных токов нужно для реализации защит от перегрузки и обрыва фазы электродвигателя.

При анализе условий эксплуатации электропривода выбраны следующие способы снижения стоимости инвертора:

- применение бутстрепного питания драйверов;
- использование дешевых драйверных микросхем без встроенных защит;
- реализация защиты от короткого замыкания на основании показаний датчиков тока.

В предлагаемом решении используются дешевые и надежные трансформаторы тока, пропускная способность которых достаточно высока для обеспечения защиты от короткого замыкания инвертора. Приведены схема преобразователя и экспериментальные результаты испытаний на короткое замыкание.

## Проектирование инвертора

### Драйверы

Отказ от аппаратных защит транзисторных ключей посредством драйверных микросхем обусловлен следующими факторами. Возможность сквозного тока стойки инвертора стремится к нулю, поскольку эта проблема должна быть решена на этапе разработки программного обеспечения. Если же сквозной ток все-таки возникнет по какой-либо причине [4], например, при отказе драйвера, инвертор однозначно выйдет из строя, но входные цепи будут защищены плавким предохранителем. Защита от снижения напряжения питания драйверов тоже не является обязательной, поскольку напряжение источника питания драйверов нижних ключей может контролироваться встроенным в микроконтроллер аналого-цифровым преобразователем (АЦП), но инвертор должен быть защищен от аварийных ситуаций со стороны электродвигателя, например, от нарушения изоляции, короткого замыкания или обрыва фазы. Данные защиты могут быть реализованы путем быстрого измерения фазных токов.

Замена драйверной микросхемы со встроенными защитами, такой как HCPL-316J [5] (стоимостью около 3,1\$ за шт.) на двоясную микросхему для управления верхним и нижним ключами стойки (HCPL314-J стоимостью около 1,9 \$ за шт. [6]) экономит более 12\$ на один трехфазный инвертор.

### Датчики тока и токовые защиты

Для измерения выходного тока инвертора и защиты электродвигателя необходимо как минимум два датчика тока. Это могут быть датчики на эффекте Холла

компенсационного типа или обычные датчики на эффекте Холла, но они относительно дорогие. Датчики тока в виде шунта с дельта-сигма модулятором требуют применения дорогостоящего микроконтроллера со специальными периферийными устройствами, используемыми для цифровой фильтрации модулированного битового потока. Прямое измерение падения напряжения на шунте в нижнем транзисторе стойки инвертора неприменимо для приводов с номинальной мощностью более 1 кВт и не может гарантированно защитить инвертор от короткого замыкания со стороны двигателя, поскольку ток двигателя не течет через шунт непрерывно [7].

Рассматриваемый в статье электропривод работает в разомкнутой скалярной системе управления, и измерять постоянную составляющую тока не требуется, следовательно, в качестве датчиков тока можно использовать трансформаторы тока. Рабочая частота электродвигателей вентиляторов не выходит из диапазона 15...50 Гц, что дает возможность использовать самые дешевые трансформаторы тока на рынке.

Еще одна особенность трансформаторов заключается в том, что они имеют очень высокую полосу пропускания и служат не только для защиты двигателя, но и для защиты инвертора. Защиту инвертора лучше реализовать с использованием аналогового компаратора. Чтобы уменьшить количество компараторов для положительных и отрицательных полувольт, сигнал каждого трансформатора тока нужно выпрямить маломощным диодным выпрямителем.

В случае возникновения короткого замыкания выпрямленный сигнал превысит некоторый опорный уровень и логический сигнал о перегрузке поступит на соответствующий вход микроконтроллера для блокировки сигналов управления ключами инвертора (сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ)). Схема предложенного инвертора и измерения токов с цепями защиты показана на рис. 1.

### Диагностика неисправностей

Существует несколько функций, которые должны быть реализованы для защиты электродвигателя и передачи информации системе верхнего уровня:

- измерение фазных токов;
- обнаружение перегрузки по току, обрыва фазы и асимметрии нагрузки.

### Измерение тока

Ток фазы двигателя можно измерить, отслеживая величины выпрямленного сигнала от трансформаторов тока в течение одного периода основной гармоники. В нормальном режиме работы данные с обоих каналов должны быть почти равны и их можно использовать для обеспечения тепловой защиты двигателя.

### Перегрузка по току

Программное определение перегрузки по току позволяет установить повышение скольжения электродвигате-

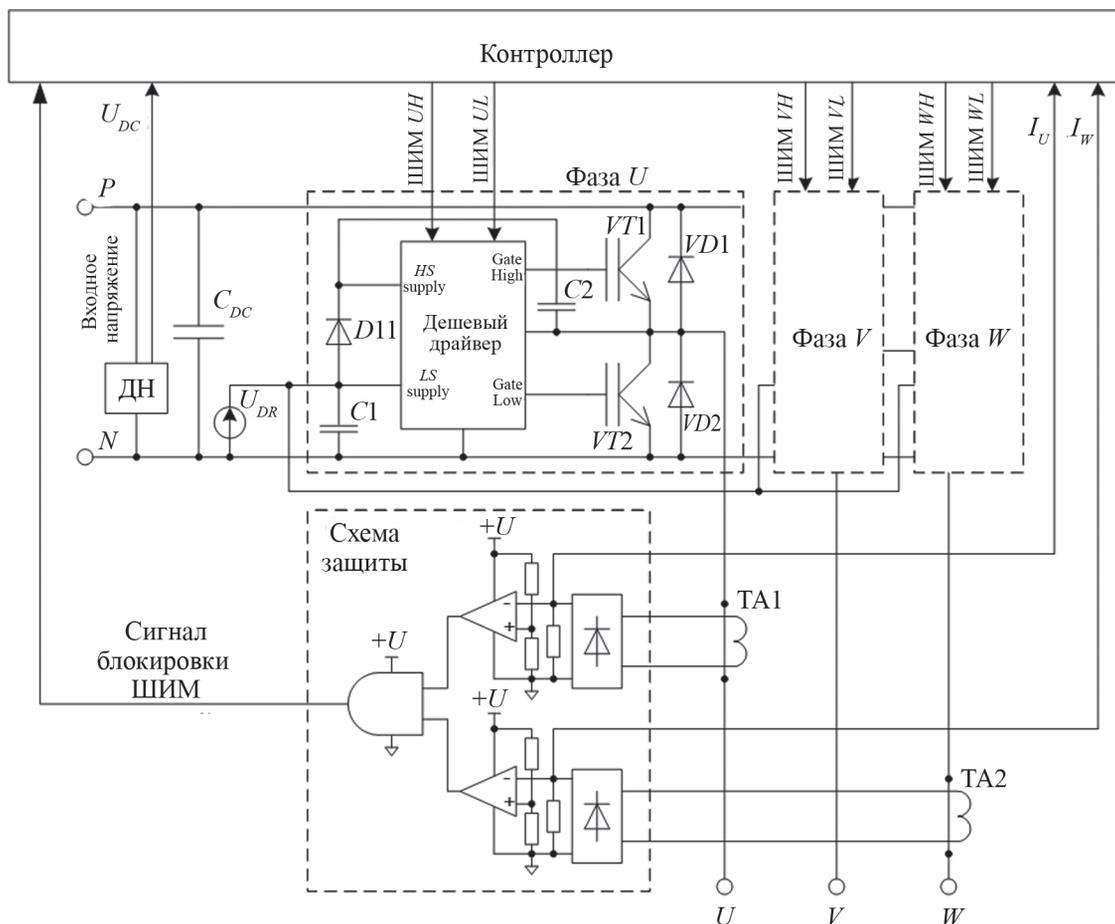


Рис. 1. Функциональная схема инвертора и цепей защиты от короткого замыкания в нагрузке

ля. Это должно быть сделано путем непрерывного анализа сигналов от трансформаторов тока. Если один из них превышает опорный уровень, то возникает перегрузка.

### Обрыв фазы

Возможны два различных варианта обрыва фазы электродвигателя. Это может случиться в одной из фаз, оснащенных трансформатором тока, или в третьей фазе без трансформатора тока. В первом случае один из выпрямленных сигналов трансформаторов тока станет равным нулю. Во втором случае оба сигнала от трансформаторов тока совпадут по фазе. В этом случае самый простой способ обнаружения обрыва фазы — выполнение дискретного преобразования Фурье для каждого сигнала и определение их коэффициентов при синусе и косинусе второй гармоники по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} I_{\sin} &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i[k] \sin\left(\frac{4\pi}{N} k\right); \\ I_{\cos} &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i[k] \cos\left(\frac{4\pi}{N} k\right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $N$  — количество измерений в течение одного периода осевой гармоники;  $i[k]$  — фазный ток в каждой точке.

Если эти компоненты равны, это означает, что обнаружен обрыв фазы.

### Асимметрия нагрузки

В случае, когда один инвертор питает два электродвигателя одновременно, обрыв фазы одного из них повлияет на текущую форму выходных токов инвертора и тоже может быть обнаружен. По сравнению с предыдущим случаем, подобная неисправность ведет к асимметричному распределению нагрузки между фазами. Она может быть обнаружена путем анализа угла между компонентами второй гармоники фазных токов, оцененных по (1):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_U &= \operatorname{atan} 2(I_{\sin U}, I_{\cos U}); \\ \varphi_V &= \operatorname{atan} 2(I_{\sin V}, I_{\cos V}). \end{aligned} \right\}$$

При нормальной работе и симметричной нагрузке угол между компонентами вторых гармоник фазных токов (разница между  $\varphi_U$  и  $\varphi_V$ ) составляет  $2\pi/3$ . В случае асимметрии нагрузки угол между ними изменится.

### Моделирование аварийных режимов

Возможность использования алгоритмов определения обрыва фазы и асимметрии нагрузки проверена с помощью модели Matlab, показанной на рис. 2.

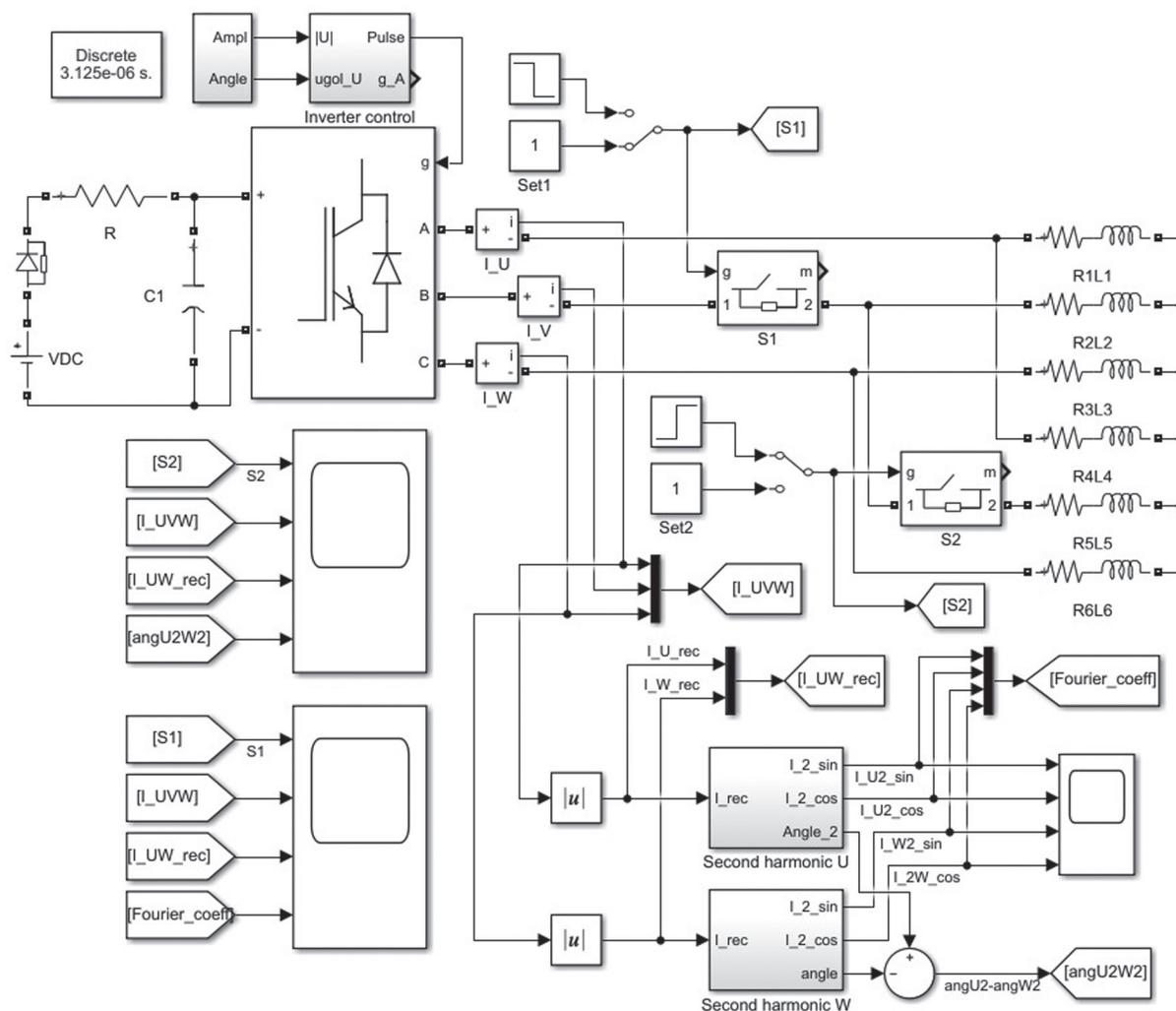


Рис. 2. Модель в Matlab Simulink для определения обрыва фазы и асимметрии нагрузки

Обрыв фазы осуществлялся при помощи ключа  $S1$ . Ток в этой фазе измерялся в модели, но не использовался системой обнаружения неисправностей. Переходные процессы при обрыве фазы представлены на рис. 3. Ключ  $S1$  размыкается (см. рис. 3, а) в момент времени, равный 0,04 с. После этого выпрямленные сигналы измеренных токов совпадут друг с другом (см. рис. 3, в). Компоненты второй гармоники тех токов, которые были разными при нормальной работе, становятся идентичными после одного периода основной частоты (см. рис. 3, г). Это может быть обнаружено системой управления.

Асимметрия нагрузки осуществляется изменением нагрузки в одной фазе путем переключения  $S2$  (см. рис. 2). Изменение нагрузки в одной фазе влияет на фазовый сдвиг выпрямленных измеренных токов. Нагрузка фазы  $V$  уменьшается в момент времени, равный 0,04 с (см. рис. 4, а). После этого величина тока в этой фазе снижается, а фазовый сдвиг между выпрямленными измеренными токами меняется (см. рис. 4, в). Это можно обнаружить преобразованием Фурье. Фа-

зовый сдвиг между выпрямленными сигналами трансформаторов тока изображен на рис. 4, г.

### Экспериментальное исследование защиты от короткого замыкания

Структурная схема экспериментальной установки для исследования защиты от короткого замыкания в нагрузке дана на рис. 5. Установка содержит источник напряжения постоянного тока, предложенный инвертор, плату управления, трехфазную нагрузку, схему защиты и ключ для создания короткого замыкания.

Инвертор рассчитан на номинальное напряжение 320 В постоянного тока. Плата управления реализована на микроконтроллере и управляет инвертором. Трехфазная нагрузка представляет собой  $RL$ -нагрузку мощностью 2 кВт и используется вместо асинхронного двигателя. В качестве ключа взято электромеханическое реле, выполняющее короткое замыкание между фазами инвертора.

Эксперимент проходит в следующей последовательности.

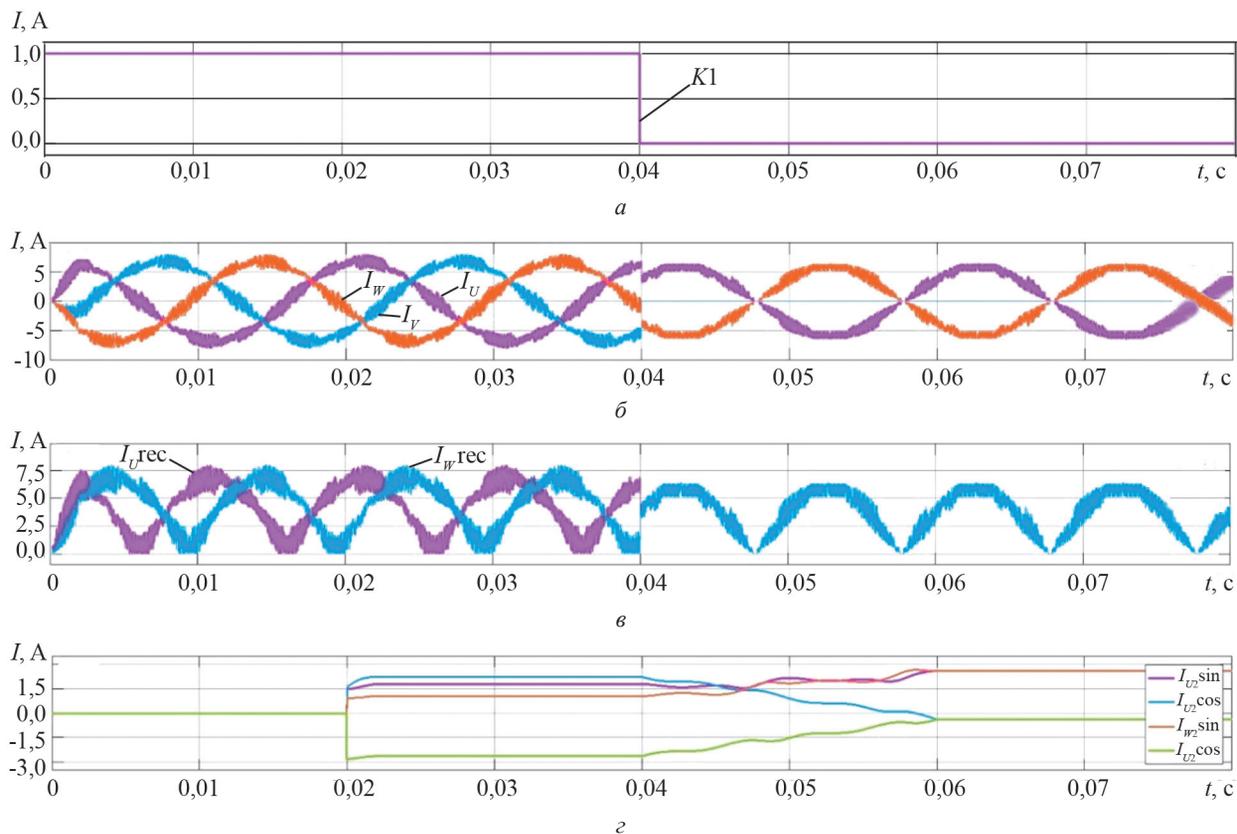


Рис. 3. Осциллограммы при моделировании обрыва фазы

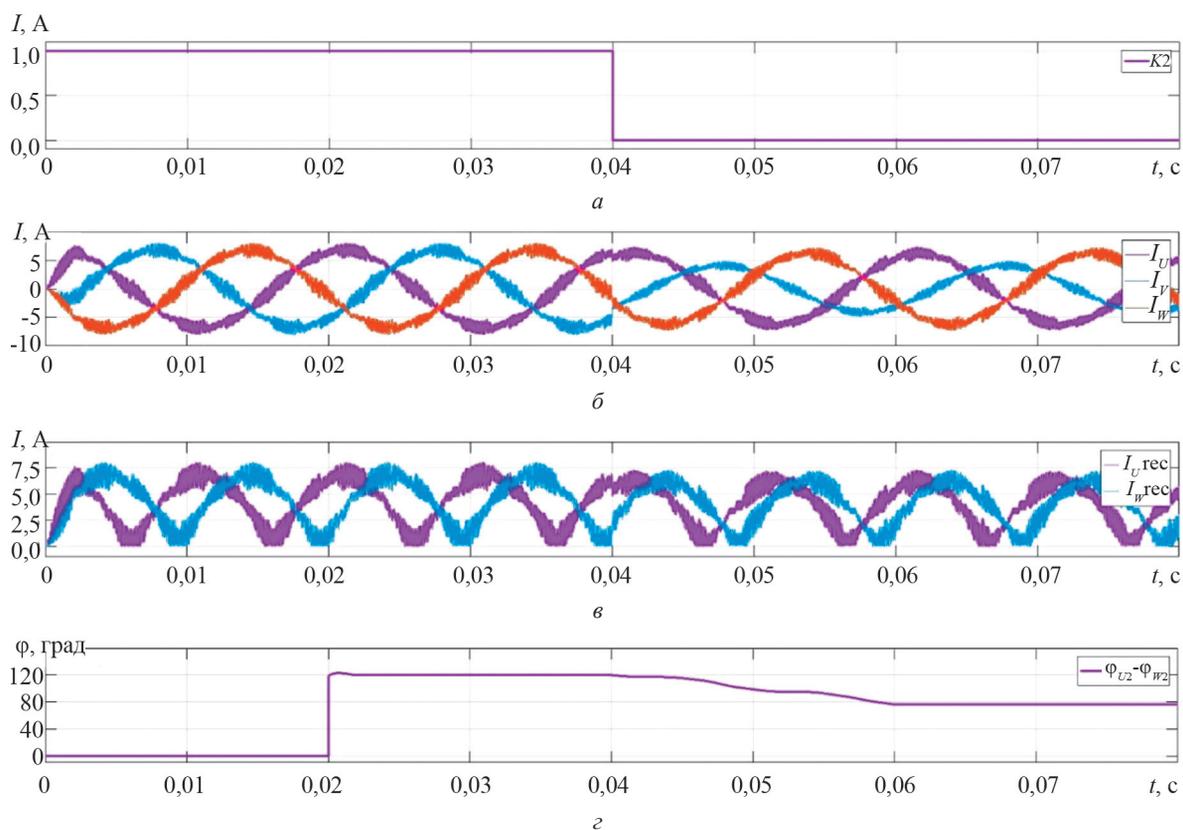


Рис. 4. Осциллограммы при моделировании асимметрии нагрузки

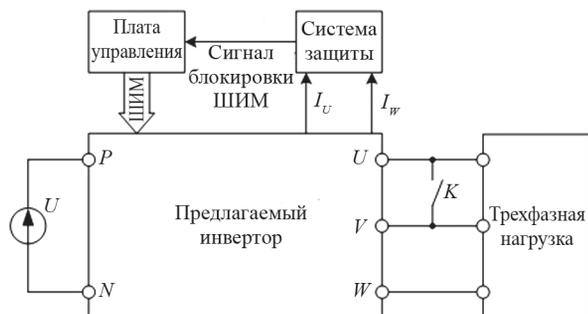


Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки для исследования защиты от короткого замыкания в нагрузке

Инвертор запускается в работу с номинальной частотой и номинальной нагрузкой. При этом ключ короткого замыкания разомкнут. Ключ короткого замыкания включается и записываются осциллограммы переходных процессов. Контролируются следующие сигналы: ток фазы, напряжение на измерительном резисторе трансформатора тока и сигнал блокировки управления инвертором.

В макете инвертора использован IGBT-модуль FS30R06W1E3 производства Infineon (рис. 6).

### Результаты экспериментов

Переходный процесс при коротком замыкании в нагрузке показан на рис. 7. При возникновении короткого замыкания фазовый ток растет, пока падение напряжения на измерительном резисторе трансформатора тока не достигает опорного уровня для защиты от перегрузки по току. Затем сигнал блокировки от системы защиты меняется с высокого уровня на низкий, что приводит к блокировке сигналов ШИМ, поступающих от микроконтроллера. Хотя защита уже активирована, ток продолжает расти. Это происходит из-за задержки распространения сигнала ШИМ в микросхемах драйвера. Примерно через 1 мкс фазный ток начинает снижаться, поскольку транзисторы инвертора переходят в выключенное состояние. Ток фазы достигает пикового значения 40 А и снижается до нуля через 2 мкс, что безопасно для силового модуля.

### Заключение

Предлагаемое решение обеспечивает надежную защиту от короткого замыкания для недорогих инвер-

### Литература

1. Wong K.F., Cheng K.W.E., Ho S.L. Low Cost High-side Gate Drive Power Supply for Switched Reluctance Machines. Proc. III Intern. Conf. Power Electronics Syst. and Appl. 2009:1—4.
2. Özkiliç M.C., Honsberg M., Radke T. A Novel Intelligent Power Module (IPM) in a Compact Transfer Mold Package with New High Voltage Integrated Circuit (HVIC) and Integrated Bootstrap Diodes. Proc. XIV Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. 2010:14—18.

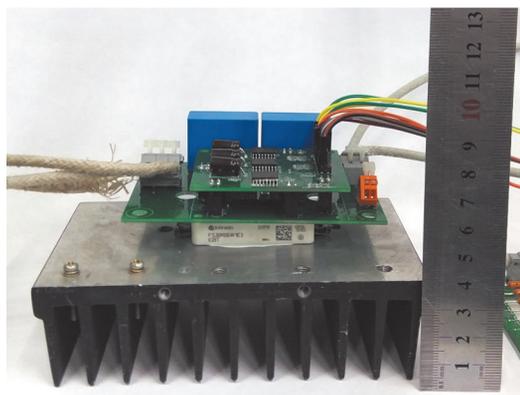


Рис. 6. Макет инвертора

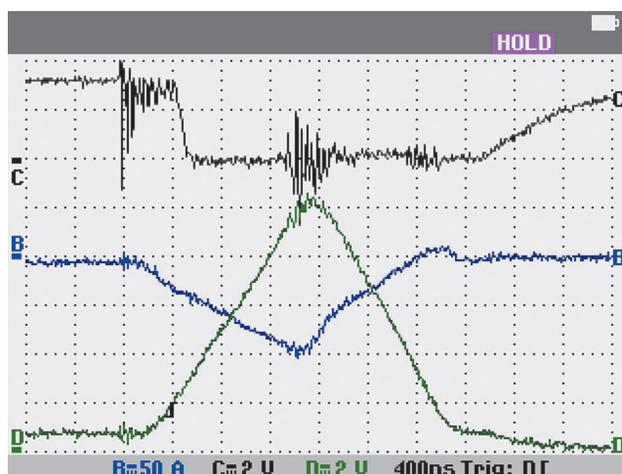


Рис. 7. Переходные процессы при коротком замыкании (400 нс в клетке):

канал B (синяя линия) — ток фазы (20 А в клетке); канал C (черная линия) — сигнал блокировки ШИМ от системы защиты на микроконтроллер (2 В в клетке); канал D (зеленая линия) — падение напряжения на измерительном резисторе трансформатора тока (2 В в клетке)

торов напряжения. С помощью программного обеспечения в системе управления могут быть реализованы защиты от обрыва фазы, асимметрии нагрузки, максимального тока и тепловая защита. Время реакции системы на короткое замыкание в нагрузке составляет 1 мкс, и этого вполне достаточно для безопасного отключения инвертора.

### References

1. Wong K.F., Cheng K.W.E., Ho S.L. Low Cost High-side Gate Drive Power Supply for Switched Reluctance Machines. Proc. III Intern. Conf. Power Electronics Syst. and Appl. 2009:1—4.
2. Özkiliç M.C., Honsberg M., Radke T. A Novel Intelligent Power Module (IPM) in a Compact Transfer Mold Package with New High Voltage Integrated Circuit (HVIC) and Integrated Bootstrap Diodes. Proc. XIV Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. 2010:14—18.

3. Wang Y., Tanaka T., Iwagami T. New Industrial Series Transfer Mold MINI-DIIPM with Integrated BSD and Temperature Measurement Function. Proc. Intern. Exhibition and Conf. for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. 2014:272—276.

4. Grbovic P.J., Arpilliere M. IGBT Cross Conduction Phenomenon — Origin and simple Protection Gate Driving Technique. Proc. XIII European Conf. Power Electronics and Applications. 2009:10.

5. **Broadcom Inc.** [Официальный сайт] <https://www.broadcom.com/products/optocouplers/industrial-plastic/isolated-gate-drive-optocouplers/highly-integrated-smart-gate-drives/hcpl-316j> (дата обращения 05.07.2018).

6. **Broadcom Inc.** [Официальный сайт] <https://www.broadcom.com/products/optocouplers/industrial-plastic/isolated-gate-drive-optocouplers/gate-drives/hcpl-314j> (дата обращения 05.07.2018).

7. Liang-Deng H., Chi S., Yu-Lin C., Zhi-Hua Z. Online Measuring Method of High-power IGBT Collector Current. Proc. XVII Intern. Conf. Electrical Machines and Syst. 2014:1945—1951.

3. Wang Y., Tanaka T., Iwagami T. New Industrial Series Transfer Mold MINI-DIIPM with Integrated BSD and Temperature Measurement Function. Proc. Intern. Exhibition and Conf. for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. 2014:272—276.

4. Grbovic P.J., Arpilliere M. IGBT Cross Conduction Phenomenon — Origin and simple Protection Gate Driving Technique. Proc. XIII European Conf. Power Electronics and Applications. 2009:10.

5. **Broadcom Inc.** [Официальный сайт] <https://www.broadcom.com/products/optocouplers/industrial-plastic/isolated-gate-drive-optocouplers/highly-integrated-smart-gate-drives/hcpl-316j> (Дата обращения 05.07.2018).

6. **Broadcom Inc.** [Официальный сайт] <https://www.broadcom.com/products/optocouplers/industrial-plastic/isolated-gate-drive-optocouplers/gate-drives/hcpl-314j> (Дата обращения 05.07.2018).

7. Liang-Deng H., Chi S., Yu-Lin C., Zhi-Hua Z. Online Measuring Method of High-power IGBT Collector Current. Proc. XVII Intern. Conf. Electrical Machines and Syst. 2014:1945—1951.

#### Сведения об авторах:

**Яковенко Максим Сергеевич** — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: maksim-13@yandex.ru

**Анучин Алексей Сергеевич** — доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: AnuchinAS@mpei.ru

**Остриров Вадим Николаевич** — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», e-mail: ostrirovvn@cycle-p.ru

**Мильский Константин Викторович** — начальник отдела научно-технического развития ООО НПП «Цикл Плюс», e-mail: kostyanmils@mail.ru

#### Information about authors:

**Yakovenko Maksim S.** — Ph.D.-student of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: maksim-13@yandex.ru

**Anuchin Aleksey S.** — Dr.Sci. (Techn.), Head of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: AnuchinAS@mpei.ru

**Ostrirov Vadim N.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Drives Dept., NRU MPEI, e-mail: ostrirovvn@cycle-p.ru

**Milsky Konstantin V.** — Head of Scientific and Technical Development Dept., R&D Company «Cycle Plus», e-mail: kostyanmils@mail.ru

**Работа выполнена при поддержке:** Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 8.8313.2017/BCh)  
**The work is executed at support:** The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grants No. 8.8313.2017/BCh)

**Конфликт интересов:** статья перепечатана с разрешения IEEE.

Yakovenko M., Anuchin A., Ostrirov V., Milskiy K. Implementation of a Protected Low-Cost Voltage-Source Inverter // Proc. X Intern. Conf. Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk. 2018. Pp. 1—4. DOI: 10.1109 / ICEPDS.2018.8571829.

**Conflict of interests:** paper is reprinted with permission from IEEE.

Yakovenko M., Anuchin A., Ostrirov V., Milskiy K. Implementation of a Protected Low-Cost Voltage-Source Inverter // Proc. X Intern. Conf. Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk. 2018. Pp. 1—4. DOI: 10.1109 / ICEPDS.2018.8571829.

**Статья поступила в редакцию:** 16.07.2018

**The article received to the editor:** 16.07.2018