

УДК 621.31

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Гузеев Б.В., Хакимьянов М.И.¹

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
e-mail: ¹joss22@rambler.ru

Аннотация. В статье представлены результаты анализа структур и конструктивных особенностей высоковольтных преобразователей частоты и другой силовой электроники на основе полупроводниковых ключей. Выполнен сравнительный анализ высоковольтных преобразователей частоты различных типов: выполненных по многоуровневой схеме и по схемам с использованием высоковольтных транзисторов. Рассматриваются схемы драйверов управления мощными полевыми MOSFET- и биполярными IGBT-транзисторами. Сделан анализ перспектив развития высоковольтных преобразователей частоты.

Ключевые слова: высоковольтный преобразователь частоты, высоковольтный частотно-регулируемый электропривод, драйвер, инвертор, многоуровневый преобразователь, силовая ячейка

Как показывает анализ технической литературы, посвященной частотно-регулируемому приводу [1, 2, 5-8, 10, 11], последнее время в наиболее ответственных высоковольтных электроприводах используются главным образом многоуровневые преобразователи частоты на базе низковольтных IGBT полупроводниковых модулей. В силовых ячейках многоуровневых преобразователях часто используется стандартный IGBT модуль – полумост 1700/200 А.

Широкая гамма силовых модулей на основе IGBT транзисторов выпускается заводом ОАО «Электровыпрямитель»: модули допускают токи до 3600 А и напряжение коллектор-эмиттер до 3500 В. Данные модули реализованы по схемам одиночных ключей, чопперов, полумостов и трехфазных инверторов.

На рис. 1 изображена структурная схема многоуровневого высоковольтного частотного преобразователя серии Perfect Harmony [14] на базе IGBT полупроводниковых элементов с воздушным или водяным охлаждением. В состав преобразователя входит сухой многообмоточный трансформатор. Главной особенностью данного преобразователя является схемное решение с низковольтными силовыми ячейками, со-единенными последовательно, что позволяет получить на выходе суммарное высокое напряжение. Такая схема позволяет обеспечить близкую к синусоидальной форму выходного напряжения, а также обладает повышенной надежностью за счет возможности шунтирования неисправных ячеек.

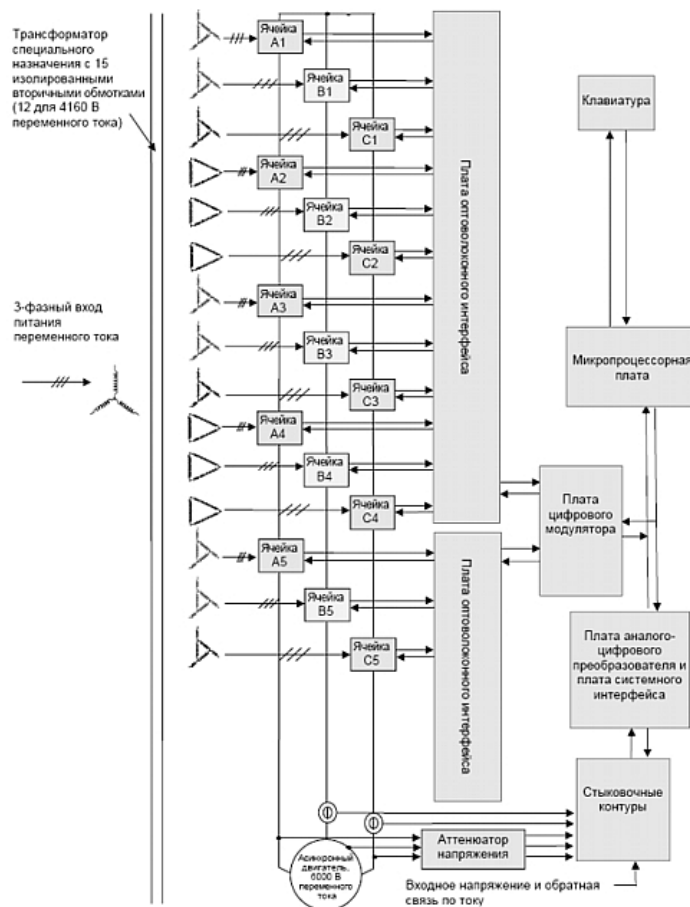


Рис. 1. Структурная схема преобразователя частоты серии Perfect Harmony

Во многих работах отмечается, что многоуровневые преобразователи частоты на низковольтных IGBT модулях для высоковольтных двигателей имеют ряд недостатков: высокую стоимость, существенные потери энергии в прямых транзисторных переходах (для напряжения сети 10 кВ необходимо 9 силовых ячеек, соединенных последовательно) и значительные габаритные размеры [10, 11]. Вместе с тем, в настоящее время промышленность освоила выпуск высоковольтных транзисторов с напряжением до 6500 В, применение которых позволяет упростить конструкцию преобразователей частоты, снизить их габаритные размеры и стоимость. В статье [1] приведена структурная схема преобразователя частоты с частотно-токовым управлением на высоковольтных транзисторах. Преобразователь частоты выполнен с высоковольтными выпрямительно-инверторными ячейками и содержит в фазе двигателя при напряжении сети 6 кВ две последовательно включенные ячейки, а при напряжении сети 10 кВ – всего четыре ячейки.

Система управления преобразователем частоты разработана специалистами ОАО «ВНИИР» и построена на принципе частотно-токового управления вектором тока статора. Эффективность применения преобразователя частоты с высоковольтными транзисторами обеспечивается их меньшими габаритными размерами по сравнению с многоуровневыми преобразователями частоты на низковольт-

ных транзисторах. Уменьшается количество выпрямительно-инверторных ячеек и снижаются общие потери энергии в транзисторах преобразователя частоты (ориентировочно на 20%). Облегчается система охлаждения, появляется возможность использования согласующего трансформатора меньшей мощности, а следовательно и меньшей стоимости.

В настоящее время известны две топологии многоуровневых преобразователей частоты: каскадные и преобразователи на базе многоуровневых автономных инверторов напряжения. Последние имеют существенно лучшие выходные характеристики, но и более сложны и, следовательно, дороже. В работе [4] рассматриваются принципы реализации гибридного многоуровневого преобразователя частоты на базе трехуровневого инвертора напряжения с двумя последовательно соединенными однофазными инверторами в выходных фазах, которые используются в режиме «реактивной» ячейки без источника. Соотношение напряжений инверторов 9:3:1.

Схема гибридного несимметричного многоуровневого преобразователя частоты с двумя однофазными автономными инверторами на выходах базового трехуровневого автономного инвертора напряжений показана на рис. 2.

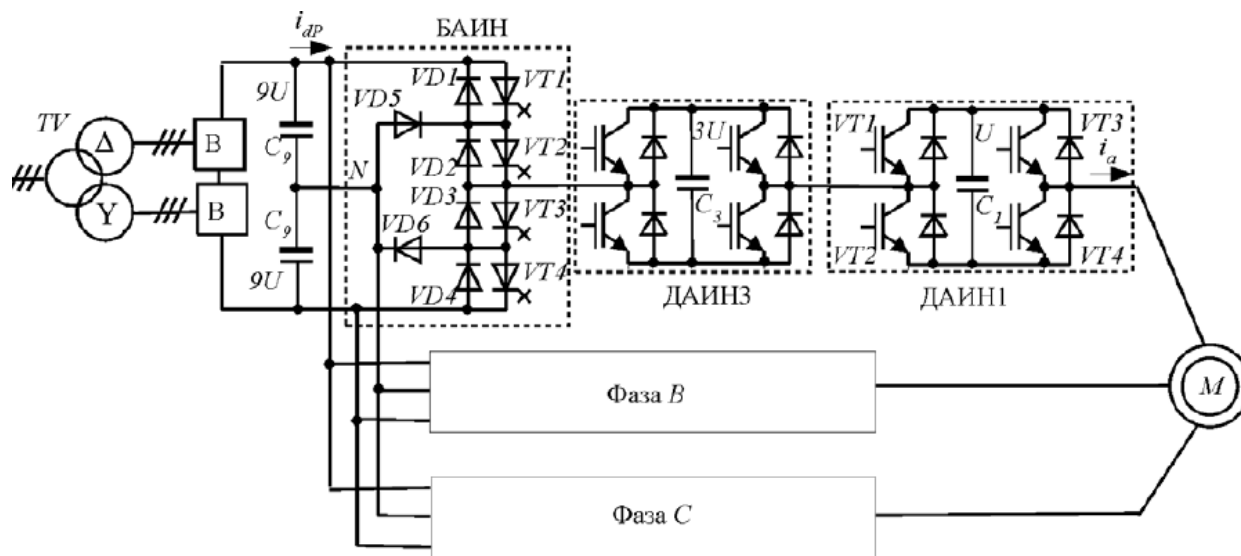


Рис. 2. Схема силовых цепей несимметричного гибридного многоуровневого преобразователя частоты

Надежность функционирования преобразователей частоты во многом определяется качеством силовых полупроводниковых элементов [5, 7-11, 13]. Мощные полевые MOSFET-транзисторы и биполярные IGBT-транзисторы являются базовыми элементами современной силовой электроники и используются в качестве элементов коммутации больших токов и напряжений. Однако для согласования низковольтных логических управляющих сигналов с уровнями управления затвора MOSFET- и IGBT-транзисторов требуются промежуточные устрой-

ства согласования – высоковольтные драйверы. Среди производителей драйверов можно выделить компании STMicroelectronics и International Rectifier, которые выпускают аналоговые и смешанные интегральные схемы, в том числе драйверы MOSFET- и IGBT-транзисторов. В статье [13] рассматриваются высоковольтные драйверы компании STM. Основное внимание уделяется современным сериям высоковольтных драйверов L638x и L639x.

Микросхема L6385E содержит два независимых драйвера верхнего (выход HVG) и нижнего плеча (выход LVG) (рис. 3). Основная особенность микросхем семейства L639x – наличие дополнительных встроенных элементов: операционного усилителя или компаратора. На рис. 4 показана структура и схема включения микросхемы L6390.

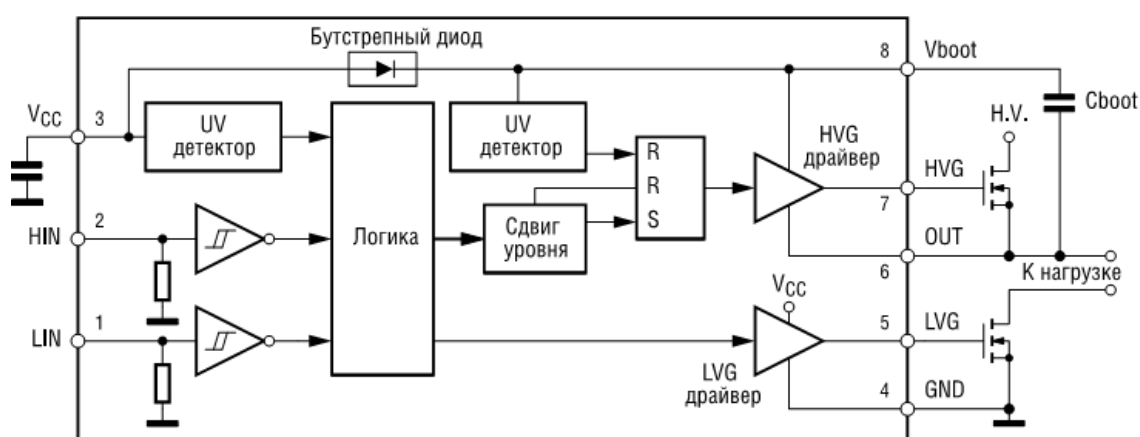


Рис. 3. Структура и схема включения высоковольтного драйвера L6385E

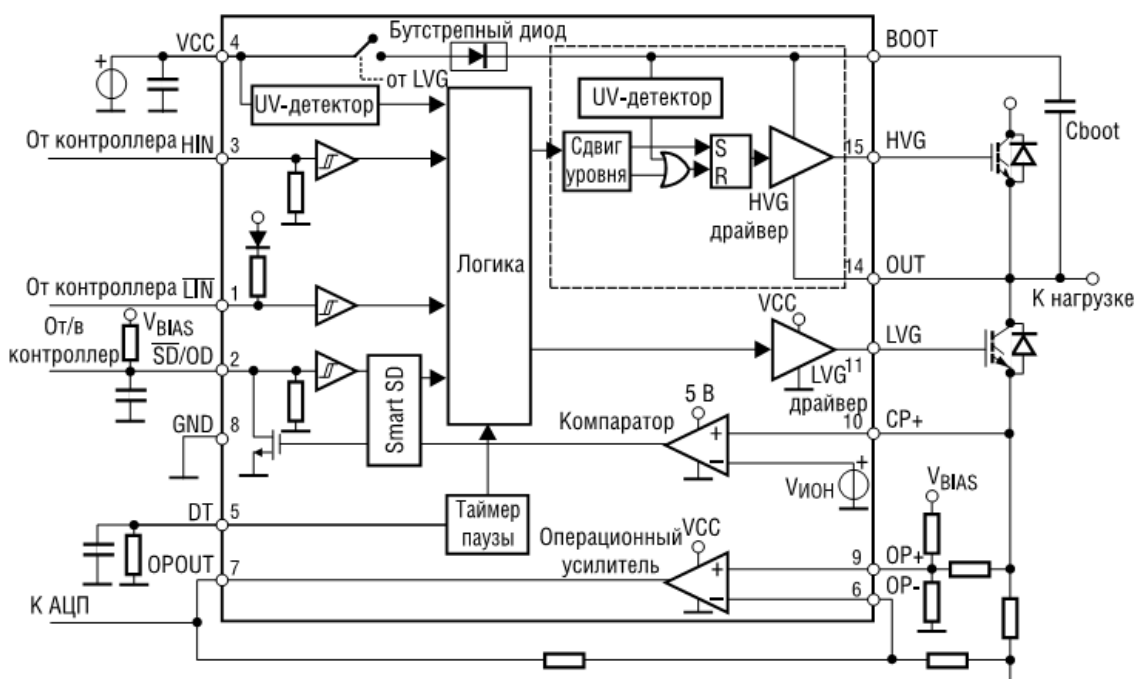


Рис. 4. Структура и схема включения высоковольтного драйвера L6390

Нужно отметить, что дополнительные встроенные элементы драйверов семейств L638x и L639x позволяют реализовать в одной микросхеме те функции, которые ранее реализовывались с использованием ряда дополнительных компонентов. Это позволяет уменьшить габариты и повысить надежность схемы.

Компания Infineon является одним из ведущих мировых производителей силовых полупроводниковых модулей [10]. Компания расширяет номенклатуру IGBT модулей семейства PrimePACK модулями на большие токи. Выпущен лучший на сегодняшний день в данном классе модуль в корпусе PrimePACK с рабочим током 1400 А и рабочим напряжением 1700 В. В модуле используются IGBT кристаллы, изготовленные по технологии IGBT4 с увеличенной максимальной рабочей температурой перехода +150 °С. Топология модуля – полумост с встроенным NTC терморезистором.

В работе [2] рассмотрены основные разработки ОАО «ВНИИР» в области высоковольтных электроприводов и полупроводниковых преобразователей, разработанные институтом. Основными изделиями являются:

- различного типа тиристорные устройства безударного пуска электродвигателей;
- электроприводы на основе транзисторных преобразователей;
- тиристорные устройства автоматического включения резерва в системах электроснабжения.

В тех случаях, когда не требуется регулировать скорость вращения двигателей, применяют устройства УБПВД-ВЦ для безударного пуска высоковольтных электродвигателей. В течение заданного времени пуска электродвигателя происходит плавное нарастание напряжения на обмотках статора от нуля до номинального значения. Пусковой ток увеличивается в соответствии с заданным токоограничением. При этом в двигателе не возникает знакопеременного момента, вызывающего вибрацию и отрицательно сказывающегося на двигателе и передаточных механизмах. На рис. 5 показана схема электроснабжения высоковольтных электродвигателей с устройством УБПВД-ВЦ. Наибольший эффект в эксплуатации обеспечивает система безударного пуска, в состав которой входят разработанные в ОАО «ВНИИР» шкафы ШРВУ с пусковыми дистанционно управляемыми разъединителями РВУ-10/1000 (патент ОАО «ВНИИР»). Шкафы ШРВУ и ШКА содержат необходимое количество коммутационных аппаратов.

Тиристорное устройство автоматического ввода резерва (рис. 6) предназначено для ускорения работы АВР секций шин распределительного устройства 6 - 10 кВ с нагрузкой в виде высоковольтных синхронных и асинхронных двигателей. Тиристорное устройство подключается параллельно секционному выключателю, имеющему относительно низкое быстродействие (до 0,2 с) и позволяет сократить время ввода резерва до 20 мс, не вызывая отключения нагрузок обесточенной секции, и тем самым не допуская прерывания технологического процесса механизмов, обслуживаемых секцией.

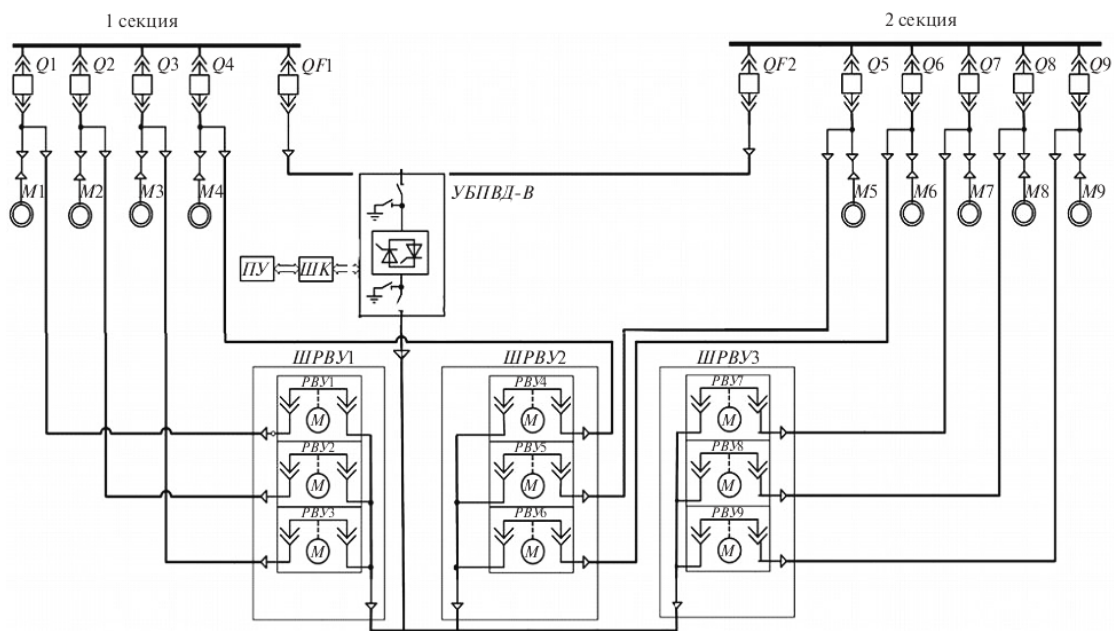


Рис. 5. Схема электроснабжения высоковольтных электродвигателей с устройством УБПВД-В

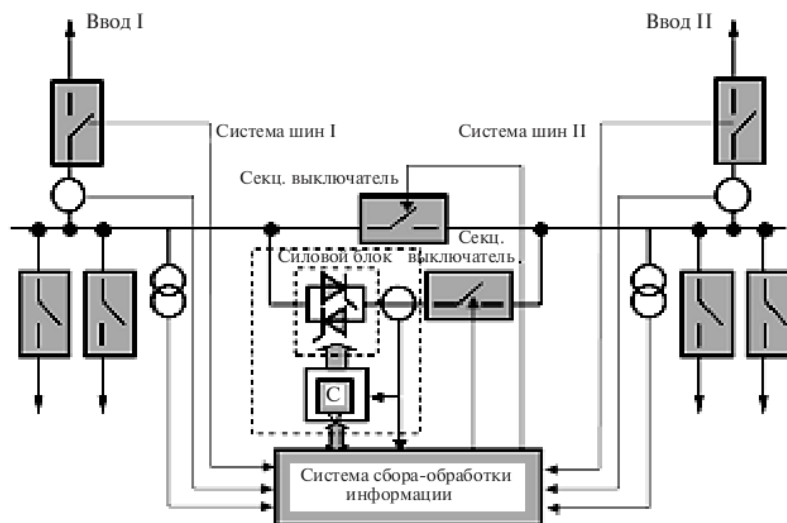


Рис. 6. Функциональная схема устройства автоматического ввода резерва

Недостатком описанного выше устройства является ограниченное быстродействие при потере питания на подстанциях с частотным регулированием скорости вращения высоковольтных синхронных электродвигателей, что увеличивает время простоя технологических агрегатов и может привести к значительному технологическому ущербу у ответственных потребителей.

Обусловлен этот недостаток следующим. В режимах потери питания синхронные двигатели, потерявшие питание, переходят в генераторный режим. Одна-

ко синхронные двигатели, которые подключены к питающим шинам через преобразователь частоты, вследствие односторонней проводимости преобразователя частоты, не создают напряжения на шинах, потерявших питание. При этом пусковые реле частоты защиты от потери питания могут отказывать.

В связи с этим становится очевидно, что подключение высоковольтных СД и АД через ПЧ требует внесения изменений в схемы и алгоритмы работы РЗ и А, в частности в работу защиты от потери питания. Однако вопросы алгоритмов работы защит при наличии в схемах высоковольтного частотно-регулируемого привода в настоящее время в литературе исследованы в недостаточной степени.

Таким образом, на основании проведенного обзора могут быть сделаны следующие выводы:

1. Наиболее совершенными по своим характеристикам являются высоковольтные многоуровневые преобразователи частоты на основе многообмоточных трехфазных трансформаторов и соединенных последовательно низковольтных силовых ячеек. Такая схема позволяет обеспечивать высокое качество выходного напряжения и повышенную надежность за счет шунтирования неисправных ячеек.

2. В настоящее время промышленность освоила выпуск высоковольтных транзисторов с напряжением до 6500 В, применение которых позволяет упростить конструкцию преобразователей частоты, снизить их габаритные размеры и стоимость по сравнению с многоуровневыми преобразователями.

3. Некоторые производители выпускают гибридные многоуровневые преобразователи частоты на базе трехуровневого инвертора напряжения с двумя последовательно соединенными однофазными инверторами в выходных фазах, которые используются в режиме «реактивной» ячейки без источника. Такие устройства сочетают в себе преимущества каскадных и многоуровневых преобразователей.

4. На базе силовой элементной базы помимо ПЧ происходит разработка и внедрение устройств плавного пуска высоковольтных двигателей и автоматического ввода резерва.

5. Подключение высоковольтных СД и АД через ПЧ требует внесения изменений в схемы и алгоритмы работы РЗ и А, в частности в работу защиты от потери питания. Однако вопросы алгоритмов работы защит при наличии в схемах высоковольтного частотно-регулируемого привода в настоящее время в литературе исследованы в недостаточной степени.

При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по комплексному проекту «Разработка и организация серийного производства мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводов (ВЧРП)» (договор №13.G25.31.0060).

Литература

1. Шепелин В.Ф., Донской Н.В., Матисон В.А., Селивестров Н.В., Визгина Е.И. Многоуровневый преобразователь частоты на высоковольтных транзисторах с частотно-токовым управлением // Электротехника. 2011. № 7. С. 2 - 7.
2. Кальсин В.Н., Матисон А.Г., Шепелин В.Ф., Ушаков И.И., Донской Н.В., Иванов А.Г., Матисон В.А. Работы ОАО «ВНИИР» компании «АБ Электро» в области высоковольтного электропривода и силовой электроники // Электротехника. 2011. № 1. С. 1 - 7.
3. Черненко И.И., Булчаев Г.Н., Кислов Н.Н., Забабурин Д.В., Солодкий А.И. Применение систем частотного преобразователя с 24-пульсным конвертером на Ванкорском месторождении // Территория Нефтегаз, 2011. № 4. С. 20 - 23.
4. Шавелкин А.А. Гибридный многоуровневый преобразователь частоты с двумя «реактивными» ячейками на фазу // Электротехника. 2010. № 7. С. 28 - 36.
5. Некрасов М. Модули преобразователей DC/DC и AC/DC компании GAIA Converter для высоконадежных и промышленных применений // Силовая электроника. 2011. № 2. С. 62 - 64.
6. Тимс А., Колпаков А. WINDSTACK – новая концепция преобразователей большой мощности // Силовая электроника. 2011. № 3. С. 43 - 38.
7. Лангенбуер А., Стаудт И. Трехуровневые инверторы: специализированные модули и тепловой расчет // Компоненты и технологии, 2011. № 5. С. 123 - 126.
8. Герцер Р., Россберг М., Воглер Б. Технологии интегральных драйверов IGBT для применений низкой и средней мощности // Компоненты и технологии. 2011. № 2. С. 102 - 107.
9. Колпаков А., Карташов Е. Контроль тепловых режимов силовых модулей // Компоненты и технологии. 2010. № 4. С. 83 - 86.
10. Мартыненко В.А., Мускатиньев В.Г., Чибиркин В.В. Новые конструкции IGBT модулей для высоковольтных применений // HiT: Разработки в электронике. 2004. № 4. С. 1 - 4.
11. Мускатиньев В., Мартыненко В., Чибиркин В., Бормотов А. ОАО «Электровыпрямитель» расширяет производство IGBT силовых модулей // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 32 - 34.
12. Шрайбер Д., Колпаков А. Преобразователи большой мощности для возобновляемых источников энергии // Силовая электроника, 2010. № 5. С. 90 - 94.
13. Никитин А. Современные высоковольтные драйверы MOSFET и IGBT – транзисторов // Новости электроники, 2010. № 6. С. 32 - 36.
14. Официальный сайт ОАО "Завод ЭЛЕКТРОПУЛЬТ" // URL: <http://www.electropult.ru> (дата обращения 21.12.2011).

STRUCTURAL PATTERNS OF MODERN HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONVERTERS

B.V. Guzeev, M.I. Hakimyanov¹

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
e-mail: ¹joss22@rambler.ru

Abstract. *This article presents some results of analysis of structures and design features of high-voltage frequency converters and other power electronics based on semiconductor switches. The comparative analysis of high-voltage frequency converters is presented: multilevel and based on high-voltage transistors. Authors consider the power MOSFET and IGBT transistors driver circuit design. The analysis of the prospects of high-voltage frequency converters is made.*

Keywords: *high-voltage frequency converter, high-voltage variable speed drive, driver, inverter, multilevel converter, power cell*

References

1. Shepelin V.F., Donskoi N.V., Matison V.A., Selivestrov N.V., Vizgina E.I. Mnogourovnevyi preobrazovatel' chastoty na vysokovol'tnykh tranzistorakh s chastotno-tokovym upravleniem (Multilevel high-voltage transistor frequency converter with frequency-controlled current), *Elektrotehnika*, 2011, Issue 7, pp. 2 - 7.
2. Kal'sin V.N., Matison A.G., Shepelin V.F., Ushakov I.I., Donskoi N.V., Ivanov A.G., Matison V.A. Raboty OAO "VNIIR" kompanii "AB Elektro" v oblasti vysokovol'tnogo elektroprivoda i silovoi elektroniki (The main works of JSC "VNIIR" ("AB Elektro" company) in the field of high voltage electric drives and the power electronics), *Elektrotehnika*, 2011, Issue 1, pp. 1 - 7.
3. Chernenko I.I., Bulchaev G.N., Kislov N.N., Zababurin D.V., Solodkii A.I. Primenenie sistem chastotnogo preobrazovatelya s 24-pul'snym konverterom na Vankorskom mestorozhdenii (Application of the frequency converter systems with 24-pulse converter on the Vankorsky field), *Territoriya Neftegaz*, 2011, Issue 4, pp. 20 - 23.
4. Shavelkin A.A. Gibridnyi mnogourovnevyi preobrazovatel' chastoty s dvumya «reaktivnymi» yacheikami na fazu (Hybrid multilevel converter of frequency with two series connected single-phase inverters in output phases), *Elektrotehnika*, 2010, Issue 7, pp. 28 - 36.
5. Nekrasov M. Moduli preobrazovatelya DC/DC i AC/DC kompanii GAIA Converter dlya vysokonadezhnykh i promyshlennykh primenenii (GAIA Converter's DC/DC and AC/DC converters for the highly reliable and industrial applications), *Silovaya elektronika*, 2011, Issue 2, pp. 62 - 64.
6. Tims A., Kolpakov A. WINDSTACK – novaya kontseptsiya preobrazovatelya bol'shoi moshchnosti (WINDSTACK – a new concept of high power converters), *Silovaya elektronika*, 2011, Issue 3, pp. 43 - 38.

7. Langenbucher A., Staudt I. Trekhurovnevye inventory: spetsializirovannye mo-duli i teplovoi raschet (3-level inverters: specialized modules and thermal design), *Komponenty i tekhnologii*, 2011, Issue 5, pp. 123 - 126.
8. Herzer R., Rossberg M., Vogler B., Tekhnologii integral'nykh draiverov IGBT dlya primeneniya nizkoi i srednei moshchnosti (Integrated IGBT driver technology for low and medium power), *Komponenty i tekhnologii*, 2011, Issue 2, pp. 102 - 107.
9. Kolpakov A., Kartashov E. Kontrol' teplovykh rezhimov silovykh modulei (Thermal regimes control of power modules), *Komponenty i tekhnologii*, 2010, Issue 4, pp. 83 - 86.
10. Martynenko V.A., Muskatin'ev V.G., Chibirkin V.V. Novye konstruktssii IGBT modulei dlya vysokovol'tnykh primeneniya (New IGBT modules design for high-voltage applications), *HiT: Razrabotki v elektronike*, 2004, Issue 4, pp. 1 - 4.
11. Muskatin'ev V., Martynenko V., Chibirkin V., Bormotov A. OAO «Elektrovypryamitel'» rasshryaet proizvodstvo IGBT silovykh modulei (JSC "Electro-vipryamitel" expands production of IGBT power modules), *Silovaya elektronika*, 2008, Issue 3. pp. 32 - 34.
12. Shraiber D., Kolpakov A. Preobrazovateli bol'shoi moshchnosti dlya vozobnovlyaemykh istochnikov energii (High power converters for renewable energy sources), *Silovaya elektronika*, 2010, Issue 5, pp. 90 - 94.
13. Nikitin A. Sovremennye vysokovol'tnye draivery MOSFET i IGBT – tranzistorov (Modern high-voltage MOSFET and IGBT drivers), *Novosti elektroniki*, 2010, Issue 6, pp. 32 - 36.
14. JSC «ELECTROPULT plant». <http://www.electropult.ru/eng/>