

УДК 621.314

UDC 621.314

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**СИНТЕЗ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ****SYNTHESIS OF MODULAR UNINTERRUPTED POWER SUPPLY SYSTEMS WITH INCREASED RELIABILITY**

Григораш Олег Владимирович  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
grigorasch61@mail.ru  
SPIN-код: 4729-2767

Grigorash Oleg Vladimirovich  
Doctor of engineering sciences, professor, head of the  
chair, grigorasch61@mail.ru  
SPIN-code: 4729-2767

Денисенко Евгений Александрович  
к.т.н., старший преподаватель  
denisenko\_88@mail.ru  
SPIN-код: 4263-0056

Denisenko Evgeniy Alexandrovich  
Candidate of engineering sciences, senior lecturer  
denisenko\_88@mail.ru  
SPIN-code: 4263-0056

Чумак Максим Сергеевич  
студент  
denisenko\_88@mail.ru  
*Кубанский государственный аграрный университет,  
Краснодар, Россия*

Chumak Maxim Sergeevich  
student  
denisenko\_88@mail.ru  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Уровень развития технического прогресса сегодня требует создания высокоэффективных, в том числе надёжных систем бесперебойного электроснабжения. Раскрыты современные требования и особенности проектирования современных систем бесперебойного электроснабжения, которые должны строиться по модульному принципу. Показано, что задача синтеза систем по модульному принципу включает в себя решение трёх вопросов: разработка структуры системы с учетом требований потребителей к качеству электроэнергии и допустимому времени перерыва в электроснабжении; определение необходимого уровня резервирования основных функциональных узлов (блоков, элементов) с учетом обеспечения требуемой надежности работы системы; – обеспечение наиболее эффективных взаимосвязей модулей, в том числе электромагнитной совместимости, и рациональное их использование при нормальной и аварийной работе системы. Предложены новые структурные решения основных функциональных узлов и систем бесперебойного электроснабжения в модульном исполнении. Для уменьшения уровня электромагнитных помех и повышения КПД бесперебойных систем электроснабжения в конструкции статических преобразователей необходимо применять трансформаторы с вращающимся магнитным полем. Кроме того, перспективным в настоящее время является направление использования в качестве одного из источников возобновляемых источников энергии. Ещё одним из перспективных направлений является применение непосредственных преобразователей частоты в качестве стабилизаторов напряжения и частоты тока

The level of technical development today requires the creation of highly effective, including reliable, uninterrupted power supply systems. We have shown modern requirements and design features of modern systems of uninterruptible power supply, which should be built on a modular principle. It is shown that the problem of synthesis of systems in a modular approach is addressing three issues: development of the structure of the system subject to the requirements of consumers to quality of power and the allowable time of power outage; determining the required level redundancy of major functional units (blocks, elements) to ensure the required reliability of the system; – ensuring the most effective interconnection of modules, including electromagnetic compatibility, and the rational use during normal and emergency operation of the system. We have proposed new structural solution of the main functional units and uninterrupted power supply systems in modular design. To reduce EMI and improve efficiency uninterruptible power supply systems in the design of static converters we need to use a transformer with a rotating magnetic field. In addition, the prospective current is to be used as a source of renewable energy. Another promising approach is the use of direct frequency converters as voltage stabilizers and frequency of the current

Ключевые слова: СИСТЕМА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МОДУЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Keywords: UPS, STANDALONE POWER SOURCE, UNIVERSAL UNIT CONVERTER

Уровень развития технического прогресса сегодня требует создания высокоэффективных, в том числе надёжных систем бесперебойного электроснабжения (СБЭ). И в первую очередь это диктуется большими экономическими потерями при потере электроснабжения и нарушении нормальных режимов работы производственных комплексов, центров коммуникации и связи, медицинского оборудования, банков и т. п. Поэтому как никогда в настоящее время актуальным является вопрос разработки модульных СБЭ. Модульный принцип построения СБЭ наряду является перспективным, поскольку позволяет обеспечить высокую надёжность работы системы электроснабжения, за счет резервирования основных функциональных узлов (блоков, элементов). При необходимости он позволяет достаточно просто увеличивать установленную мощность источников, преобразователей и накопителей электроэнергии путем включения работающих модулей на параллельную работу с аналогичными функциональными модулями. Кроме того, модульные системы сократят время их проектирования, изготовления оборудования, упростят задачу по изменению структуры СБЭ в зависимости от требований потребителей. Значительный технико-экономический эффект достигается при эксплуатации модульных СБЭ за счет сокращения времени на техническое обслуживание и на устранение неисправностей, поскольку неисправные модульные блоки заменяются на рабочие, в том числе этот процесс может осуществляться автоматически [1, 2].

При проектировании СБЭ необходимо учитывать, что на структуру системы и соответственно на основные ее характеристики оказывают влияние в основном два фактора, определяемые потребителями

электроэнергии: допустимое время перерыва в электроснабжении; показатели качества электроэнергии [1].

Если потребители электроэнергии ответственные (первой категории) и практически необходимо, чтобы отсутствовал перерыв в электроснабжении, в этом случае увеличивается количество резервных источников и преобразователей электроэнергии поскольку в качестве источников могут применяться не только источники напряжения переменного тока, но и источники постоянного тока, к примеру солнечные фотоэлектрические станции. Кроме того, как известно, чем выше требования к качеству электроэнергии, тем соответственно усложняется конструкция стабилизаторов и преобразователей электроэнергии, последние осуществляют функцию согласования параметров источников с параметрами потребителей электроэнергии.

В общем случае задача синтеза структуры модульной СБЭ в себя включает [3, 4]:

- разработка структуры системы электроснабжения с учетом требований потребителей к качеству электроэнергии и допустимому времени перерыва в электроснабжении;

- определение необходимого уровня резервирования основных функциональных узлов (блоков, элементов) с учетом обеспечения требуемой надежности работы системы;

- обеспечение наиболее эффективных взаимосвязей модулей, в том числе электромагнитной совместимости, и рациональное их использование при нормальной и аварийной работе системы.

Для решения первой задачи необходимо решить вопрос разделения СБЭ на модули. В общем случае функциональный модуль СБЭ должен представлять собой устройство выполняющее функции источника, преобразователя, накопителя электроэнергии, коммутационных и распределительных устройств, устройств управления и защиты.

Создание единого по структуре функционального модуля автономного источника электроэнергии (АИЭ) является нецелесообразным, поскольку источники в СБЭ должны генерировать не только переменный ток промышленной частоты, а иногда целесообразно, чтобы они генерировали напряжение постоянного тока или напряжение переменного тока повышенной частоты, что позволило бы улучшить основные критерии эффективности системы (КПД, экономические показатели, показатели надёжности, массогабаритные показатели или показатели качества электроэнергии). Таким образом, функциональные модули источников электроэнергии должны быть, как минимум, трёх типов: переменного тока промышленной частоты, переменного тока повышенной частоты и постоянного тока [2].

Создание единого, по структуре универсального модульного преобразователя (УМП) является перспективным направлением в развитии СБЭ [5, 6]. УМП представляет собой комплектное устройство, содержащее модульные блоки управляемых полупроводниковых ключей, соответственно и их систему управления, коммутационные аппараты, систему защиты и других элементов, обеспечивающих его работу (автотрансформаторы, фильтры и т. д.). Особенностью работы системы управления УМП является то, что в зависимости от поставленной задачи она способна управлять его работой по нескольким алгоритмам таким образом, что преобразователь может работать в режимах выпрямителя, инвертора, конвертора или преобразователя частоты.

Применение УМП в составе СБЭ повысит их эффективность за счет оптимизации режимов работы, как при нормальной, так и при аварийной работе, сохранения её работоспособность для всех запланированных ненормальных режимов путем адаптивного изменения структуры цепей и постепенного отключения групп потребителей, согласно заданного приоритета (иерархии).

Для повышения эффективности работы СБЭ стабилизацию параметров электроэнергии должны осуществлять локальные системы управления УМП, а установку их режимов работы центральная система управления (ЦСУ) СБЭ.

Для обеспечения требуемой надежности работы системы должна быть решена вторая задача синтеза структуры СБЭ, которая предполагает определение необходимого уровня резервирования функциональных модулей. При этом должно обеспечиваться полное или частичное резервирование основных функциональных узлов (ФУ).

При полном резервировании максимальная мощность потребителя не превышает максимально допустимой мощности одного ФУ (источника или преобразователя электроэнергии), т.е. один ФУ находится в работе, а второй и, может быть, последующие – в резерве. В этом случае вопросы обеспечения параллельной работы и наращивания установленной мощности ФУ исключаются. Основное достоинство данного принципа – высокая надежность, а недостаток – относительно большая масса и габариты системы в целом.

При частичном резервировании допустимая мощность одного ФУ меньше максимальной мощности потребителя. При необходимости наращивания мощности в работу включается один из резервных ФУ. Частичное резервирование предполагает построение трехфазных преобразователей на основе однофазных модулей. Главное достоинство данного принципа – улучшенные массогабаритные характеристики системы. Если при полном резервировании в случае выхода из строя трехфазного модульного в работу включается аналогичный, то в случае частного резервирования при неисправности одного из однофазных модулей трехфазного устройства вместо него включается резервный однофазный модуль.

Решение третьей задачи предусматривает, прежде всего, необходимость обеспечения электрической, конструктивной, электромагнитной

совместимости функциональных модулей СБЭ, а также их рациональное распределение, обеспечивая наиболее эффективные взаимосвязи.

Под электрической совместимостью модулей понимается возможность их совместного использования по следующим параметрам: мощности, входному и выходному напряжению. Известно, что под конструктивной совместимостью понимается взаимосопрягаемый набор несущих конструкций и разъемных соединений модулей, позволяющий осуществлять рациональную компоновку аппаратуры. Под электромагнитной совместимостью модулей понимается возможность их совместного функционирования в составе модульной системы в условиях взаимно создаваемых ими электромагнитного поля и помех.

Модульное построение СБЭ предусматривает также необходимость информационной и программной совместимости системы управления (СУ), контроля и регулирования параметров входной и выходной электроэнергии модулей. Под информационной совместимостью понимается единство информационных сигналов по их виду, количеству, системе кодирования и т.д. Под программной совместимостью понимается унификация системы команд и программно-аппаратная организация системы управления. Использование модулей накопителей электроэнергии, как правило, аккумуляторных батарей с однотипными значениями напряжения и ёмкости позволит, при необходимости, изменять их схему подключения (последовательно или параллельно), тем самым увеличивать напряжение или мощность системы, согласуя эти величины с соответствующим режимом работы системы.

Распределительные устройства СБЭ также должны быть выполнены на типовых модульных блоках, причем на базе бесконтактных полностью управляемых полупроводниковых приборах или комбинированных электрических аппаратах. Модульные блоки распределительных устройств должны содержать шины, к которым через управляе-

мые коммутационные аппараты осуществляется подключение нагрузки через распределительное устройство к соответствующему источнику или преобразователю. На рисунке 1 показан один из вариантов модульного блока распределительного устройства, где обозначено: ШИ – шина источника;  $MK1 \div MK4$  – модульные блоки коммутационных устройств;  $K1 \div K5$  – полупроводниковые ключи; ШН1  $\div$  ШН4 – шины нагрузки;  $i_{y1} \div i_{y5}$  – управляющие сигналы ЦСУ.

Один из вариантов структурной схемы модульной СБЭ приведен на рисунке 2, где обозначено: НЭ – накопители электроэнергии; АИЭ – автономные источники электроэнергии; СУ<sub>И</sub> – система управления автономным источником; УМП1  $\div$  УМП<sub>п</sub> – унифицированные модульные преобразователи; СУ1  $\div$  СУ<sub>п</sub> – системы управления преобразователями; РУ1  $\div$  РУ<sub>п</sub> – распределительные устройства; ЦСУ – центральная система управления.

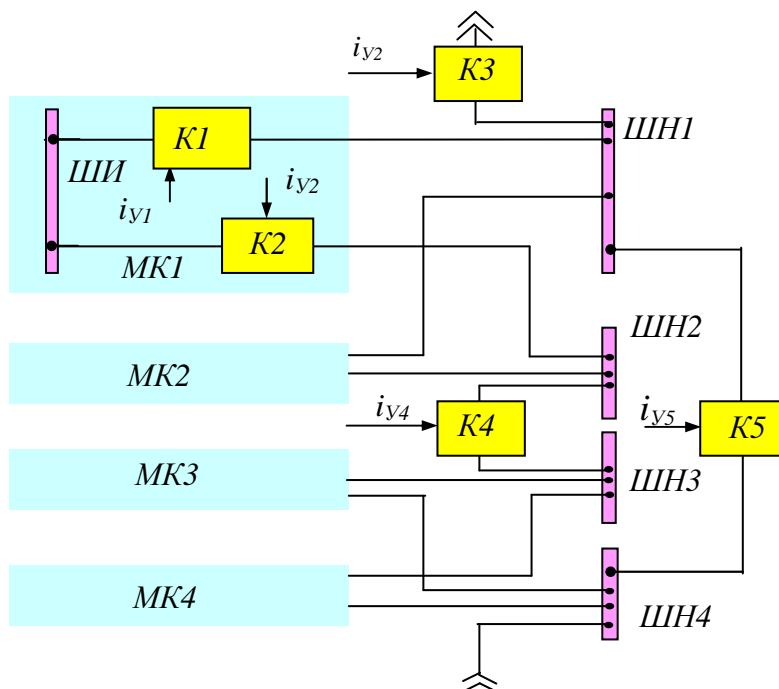


Рисунок 1 – Структурная схема модульного блока распределительного устройства  
ЦСУ выполняет функции контроля параметров электроэнергии и осуществляет коммутационные операции через распределительные устрой-

ства изменения структуру системы и режимы работы. Функции стабилизации и регулирования параметров электроэнергии осуществляют локальные системы управления автономными источниками и преобразователями. ЦСУ не связана, по каналам обработки информации, с локальными системами управления, а по каналам контроля информации они имеют общие связи. Такое взаимодействие позволит повысить быстродействие и надежность работы всей СБЭ в комплексе.

Таким образом, построение СБЭ по модульному принципу с использованием функциональных модулей источников, преобразователей, накопителей электроэнергии и модулей распределительных устройств, а также с возможностью СБЭ с помощью ЦСУ изменять свою структуру обеспечивает несколько положительных ее свойств одновременно:

1) высокую надежность, вследствие того, что при отказе любого из модуля включается в работу резервный модуль или изменяется структура системы, обеспечивая бесперебойное электроснабжение;

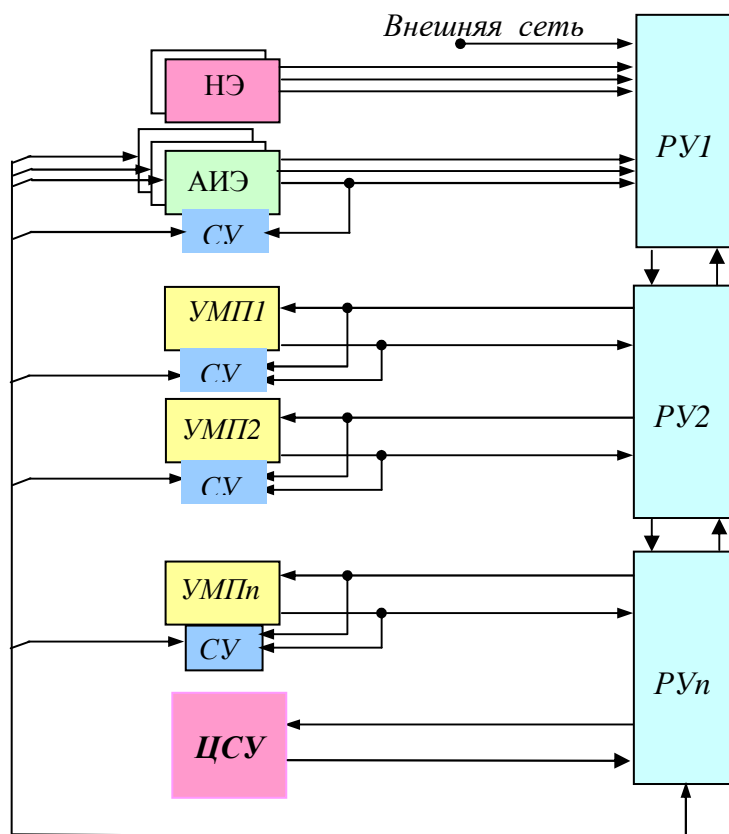


Рисунок 2 – Структурная схема модульной системы бесперебойного электроснабжения



2) регулирование мощностью генерируемой автономными источниками и распределение согласно заданному приоритету (иерархии) нагрузок, позволяет увеличить ресурс её работы;

3) техническое обслуживание или замена неисправных модулей может осуществляться без перерыва в электроснабжении потребителей.

На рисунке 3 приведен ещё один из вариантов структурной схемы модульной СБЭ, выполненной на статических преобразователях электроэнергии. Каждый из ФУ схемы выполнены по модульному принципу. Особенностью работы схемы является то, что в её составе применяются модульные блоки преобразовательных устройств  $МБ1 \div МБ_n$ , которые подключены параллельно к шине гарантированного питания ШГП.

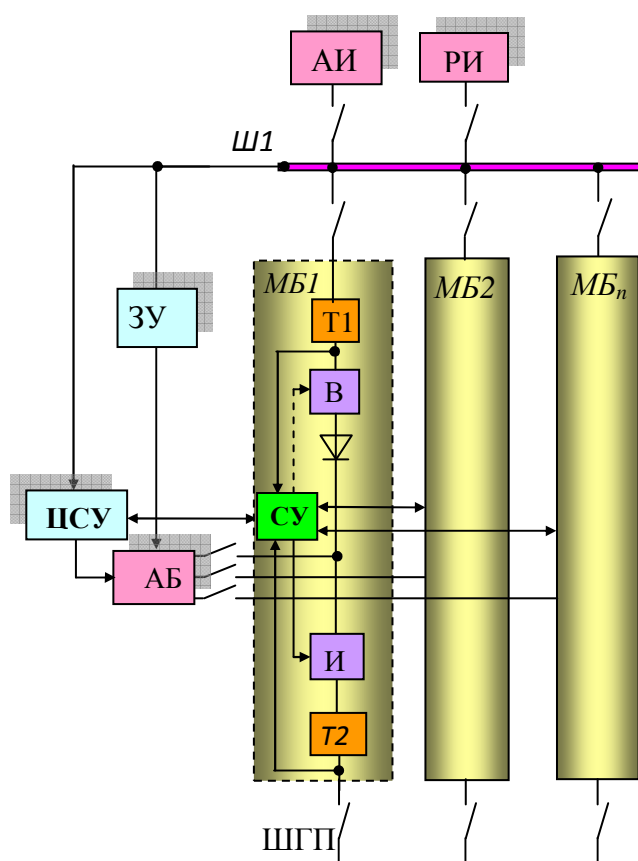


Рисунок 3 – Структурная схема модульной СБЭ на статических преобразователях: *АИ* – автономный источник; *РИ* – резервный источник; *ЗУ* – зарядное устройство; *ЦСУ* – центральная система управления; *АБ* – аккумуляторные батареи; *МБ1 ÷ МБ<sub>n</sub>* – модульные блоки; *Т1 ÷ Т2* – трансформаторы; *В* – выпрямитель; *И* – инвертор; *СУ* – система управления модульными блоками

установленную мощность. Таким образом, количество модульных блоков определяется требованиями потребителей по обеспечению бесперебойного электроснабжения и экономичной работы СБЭ.

Работа СБЭ. В нормальном режиме работы на шину *III* поступает питание от внешних источников электроэнергии по одному из вводов. В зависимости от величины потребляемой мощности работает соответствующее количество модульных блоков *МБ*. Центральная система управления *ЦСУ* обеспечивает контроль параметров электроэнергии, через системы управления *СУ* модульных блоков *МБ*, защиту СБЭ и коммутацию силовых цепей в соответствии с основными режимами функционирования системы.

На рисунке 4 представлен один из вариантов структурной схемы УМП. Модульный блок локальной системы управления  $SU_{УМП}$ , осуществляет управление блоком коммутационных аппаратов БКА, а также формирует управляющие сигналы для силовых полупроводниковых приборов блоков ПБ1 и ПБ2. Питание системы управления УМП и ее связь с центральной *СУ* осуществляется через распределительное устройство РУ. На рисунке 4 также показаны: входной и выходной фильтры  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$ , трансформатор Т, контакты коммутационных аппаратов К1 – К5, силовые выходы 1 и 2, выходы  $SU_{УМП}$  3 – 5.

Система управления УМП, выполнена на микропроцессорной технике и содержит несколько программ, обеспечивающих работу по преобразованию и стабилизации напряжения в режиме выпрямителя и инвертора. При этом она выполняет функции стабилизации напряжения, контроля параметров электроэнергии, защиты и оперативных переключений внутри преобразователя, к примеру, для замены блока ПБ1 на ПБ2, через блок коммутационных аппаратов БКА. Выбор режима работы УМП, контроль параметров электроэнергии и подключение УМП в работу в составе СБЭ осуществляет центральная *СУ*.

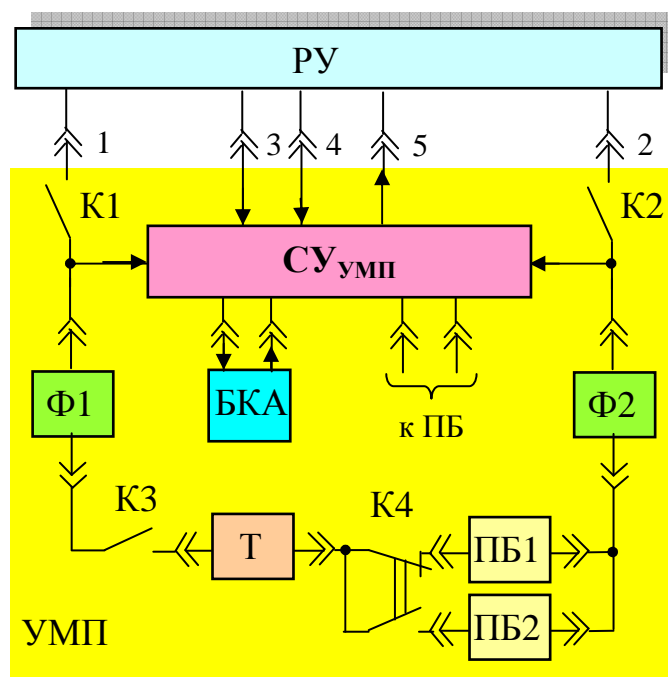


Рисунок 4 – Структурная схема универсального модульного преобразователя

УМП позволяют выполнять функции четырех типов ПЭ: выпрямителей, инверторов, преобразователей частоты и конверторов (для работы в режиме преобразователя частоты и конвертора, необходимо два УМП, включенных между собой последовательно, при этом, только один трансформатор включается в конструкцию).

Иногда выгодно с точки зрения улучшения эксплуатационно-технических характеристик, чтобы СБЭ содержала только несколько УМП. На рисунке 5 представлен вариант такой структурной схемы СБЭ, выполненной с использованием высокочастотных источников электроэнергии ВЧИ1 и ВЧИ2, трансформаторно-выпрямительных блоков ТВБ1 и ТВБ2, модульных преобразователей электроэнергии УМП1 и УМП2. На рисунке 5 показаны также блок накопителей электроэнергии БНЭ, шина переменного тока промышленной частоты Ш1, шина переменного тока повышенной частоты Ш3, шина напряжения постоянного тока Ш2 и выходы для подключения нагрузки 1 – 7.

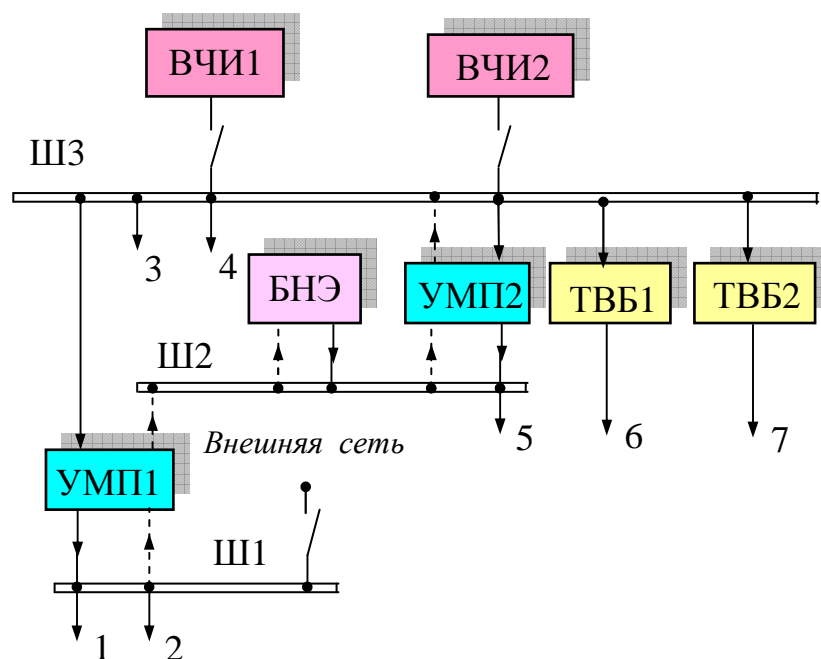


Рисунок 5 – Структурная схема системы бесперебойного электроснабжения на универсальных модульных преобразователях

При питании потребителей электрической энергии от внешней сети УМП1 работает в режиме выпрямителя, а УМП2 – в режиме инвертора, блок накопителей БНЭ находится в режиме подзаряда (на рисунке 5 показано пунктирной линией направления передачи электроэнергии от УМП). Когда электроснабжение потребителей осуществляют высокочастотные источники электроэнергии ВЧИ1 или ВЧИ2, блок БНЭ продолжает работать в режиме подзаряда, а преобразователи УМП1 и УМП2 переходят работать в режим преобразователя частоты и выпрямителя соответственно. В случае, когда же основным источником электроэнергии является БНЭ, тогда УМП1 продолжает работать в режиме преобразователя частоты, а УМП2 снова переходит работать в режим инвертора.

Для уменьшения уровня электромагнитных помех и повышения КПД СБЭ в конструкции статических преобразователей необходимо применять трансформаторы с вращающимся магнитным полем [7, 8]. Кроме того, перспективным в настоящее время является направление использования в качестве одного из источников возобновляемых источников энергии [9,

10]. Ещё одним из перспективных направлений является применение непосредственных преобразователей частоты в качестве стабилизаторов напряжения и частоты тока [11].

#### Список литературы

1. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения. Краснодар. 2005. С. 306.
2. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы. Краснодар. 2012. С.174.
3. Богатырев Н.И., Григораш О.В., Курзин Н.Н. и др. Преобразователи электрической энергии: основы теории, расчета и проектирования. Краснодар. 2002. С.358.
4. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Шхалахов Р.С. Статические преобразователи электроэнергии. Краснодар. 2006. С.264.
5. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения. Краснодар. 2011. С.188.
6. Григораш О.В., Дацко А.В., Мелехов С.В. К вопросу электромагнитной совместимости узлов САЭ. Промышленная энергетика. 2001. № 2. С.44-47.
7. Григораш О.В. Преобразователи электрической энергии на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем для систем автономного электроснабжения. Промышленная энергетика. 1997. № 7. С.21-25.
8. Григораш О.В., Кабанков Ю.А. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии. Электротехника. 2002. № 3. С.22-26.
9. Григораш О.В., Степура Ю.П., Сулейманов Р.А. и др. Возобновляемые источники электроэнергии. Краснодар. 2012. С. 272.
10. Амерханов Р.А., Цыганков Б.К., Бегдай С.Н. и др. Перспективы использования возобновляемых источников энергии. Труды КубГАУ. Краснодар. 2013. № 42. С. 185 – 189.
11. Григораш О.В., Божко С.В., Нефедовский В.А., Столбчатый Д.А. Непосредственные преобразователи частоты. Краснодар. 2008. С.148.

#### References

1. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Normov D.A. i dr. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelektrosnabzhenija. Krasnodar. 2005. S. 306.
2. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr. Avtonomnye istochniki jelektrojenergii: sostojanie i perspektivy. Krasnodar. 2012. S.174.
3. Bogatyrev N.I., Grigorash O.V., Kurzin N.N. i dr. Preobrazovateli jelektri-cheskoj jenergii: osnovy teorii, rascheta i proektirovanija. Krasnodar. 2002. S.358.
4. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Hamula A.A., Shhalahov R.S. Staticheskie preobrazovateli jelektrojenergii. Krasnodar. 2006. S.264.
5. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E. Staticheskie preobrazovateli i stabilizatory avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija. Krasnodar. 2011. S.188.
6. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovmestimosti uzlov SAJe. Promyshlennaja jenergetika. 2001. № 2. S.44-47.

7. Grigorash O.V. Preobrazovateli jelektricheskoy jenerгии na baze transforma-torov s vrashhajushhimsja magnitnym polem dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Promyshlennaja jenergetika. 1997. № 7. S.21-25.

8. Grigorash O.V., Kabankov Ju.A. K voprosu primeneniya transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem v sostave preobrazovatelej jelektrojenerгии. Jelektrotehnika. 2002. № 3. S.22-26.

9. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Sulejmanov R.A. i dr. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenerгии. Krasnodar. 2012. S. 272.

10. Amerhanov R.A., Cygankov B.K., Begdaj S.N. i dr. Perspektivy ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии. Trudy KubGAU. Krasnodar. 2013. № 42. S. 185 – 189.

11. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Nefedovskij V.A., Stolbchatyj D.A. Neposredstvennye preobrazovateli chastoty. Krasnodar. 2008. S.148..