

УДК 621.314

UDC 621.314

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**THE CONCEPT OF UNINTERRUPTED POWER SUPPLY SYSTEMS**

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
RSCI SPIN-code: 4729-2767

Чумак Максим Сергеевич
студент

Чумак Максим Сергеевич
студент

Кривошей Александр Александрович
студент
*Кубанский государственный аграрный универси-
тет, Краснодар, Россия*

Кривошей Александр Александрович
студент
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Раскрыты основные причины перерывов в электро-снабжении потребителей электроэнергии. Для повышения надёжности и эффективности энергоснабжения ответственных потребителей предложено осуществлять разработку энергоэффективных энергосберегающих комбинированных систем бесперебойного энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. Предложены основные принципы разработки таких систем, обоснована необходимость построения обобщённой схемы, содержащей возможные виды источников и преобразователей электроэнергии, раскрыты современные требования к системам бесперебойного энергоснабжения. Для улучшения эксплуатационно-технических характеристик систем бесперебойного энергоснабжения предложена новая элементная база, включающая бесконтактные генераторы электроэнергии, непосредственные преобразователи частоты, применяемые для стабилизации напряжения и частоты тока генераторов ветроустановок, статические преобразователи, выполненные с использованием однофазно-трёхфазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем, универсальные статические преобразователи, способных работать в режимах известных типов преобразователей. Раскрыты особенности модульного построения систем бесперебойного энергоснабжения и оптимизации их структурных решений по основным критериям эффективности. Предложен алгоритм синтеза структурно-схемного решения комбинированных систем бесперебойного энергоснабжения. Важным этапом дальнейших исследований с целью совершенствования эксплуатационно-технических характеристик комбинированной систем бесперебойного электроснабжения является математическое моделирование физических процессов в силовых цепях системы в нормальном и аварийном режимах работы

We have revealed the main reasons for interruptions in power supply to consumers of electricity. To improve the reliability and the efficiency of power supply for responsible consumers, we have proposed to develop energy efficient combined energy-saving systems for uninterrupted power supply with use of renewable energy sources. The article lists major principles of the development of such systems; it shows the necessity of constructing a generalized schema that contains the possible types and the sources of electric power converters. It also reveals the modern requirements to systems of uninterrupted energy supply. To improve the operational and technical characteristics of the uninterruptible power supply, it has been proposed to use a new circuitry that includes a contactless power generators, the direct frequency converters used to stabilize the voltage and frequency of the current generators of wind turbines, static converters made with the use of single-phase transformers with rotating magnetic field, universal static converters that can operate in the regimes of known types of converters. The article presents features of the modular construction of systems of uninterrupted energy supply and optimization of their structural decisions on key performance criteria. It shows the algorithm of synthesis of structural designs of combined systems of uninterrupted power supply. An important step for further research with the aim of improving operational and technical characteristics of the combination of uninterrupted power supply systems is the mathematical modeling of physical processes in power circuits of the system in both normal and emergency modes of operation

Ключевые слова: СИСТЕМА БЕСПЕРЕБОЙНОГО

Keywords: UNINTERRUPTED POWER SUPPLY

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, СТАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

SYSTEM, INDEPENDENT POWER SUPPLY SYSTEM, RENEWABLE ENERGY, INDEPENDENT POWER SOURCE, ELECTRIC POWER STATIC CONVERTER

Большая часть территории Российской Федерации – это зоны децентрализованного энергоснабжения с высокими ценами и тарифами на топливо и энергию. Кроме того, более 50 % регионов страны энергодефицитны из-за импорта электрической энергии. Важно, что подключение к электрическим сетям высокотехнологического оборудования, чувствительного к ухудшению качества электроэнергии, в том числе требующего непрерывного электроснабжения (производственные комплексы, автоматические системы управления технологическими процессами, телекоммуникационная аппаратура, медицинское оборудование и т. п.), может быть связано с большими экономическими потерями при нарушении нормальных режимов работы потребителей электрической энергии [1, 2].

На рисунке 1 приведены диаграммы, показывающие отношение основных причин перерывов в электроснабжении. Как видно из рисунка 1, основными являются две – несоответствие параметров электроэнергии требованиям потребителей (величины напряжения, частоты тока), на долю которых приходится 45 %, а также стихийные бедствия – 37 %. Далее 8 % причин – это ошибка средств управления (программного обеспечения, ложное срабатывание систем защиты и т. п.), 5 % – аварийные отключения (короткие замыкания, обрыв линий электропередачи и т. п.) и 5 % – другие причины.

Таким образом, уровень развития технического прогресса сегодня требует создания энергоэффективных и надёжных систем бесперебойного электроснабжения (СБЭ). Поскольку основными недостатками традиционных источников энергии являются ограниченность и загрязнение окружающей среды, а достоинством – относительно низкая стоимость электро-

энергии, достоинством возобновляемых источников энергии (ВИЭ) являются их неограниченность и экологичность, а недостатком – высокая стоимость, вырабатываемой электроэнергии, то в настоящее время целесообразно создавать комбинированные СБЭ, построенные с использованием традиционных и возобновляемых источников энергии [3, 4].

В общем случае СБЭ предназначена для обеспечения функционирования ответственных потребителей (потребителей первой категории) при отказе основного ввода (вводов) электроснабжения или при ухудшении качества электроэнергии в течение времени, достаточного для переключения на резервный источник электроснабжения или нормального завершения основных технологических процессов [5].

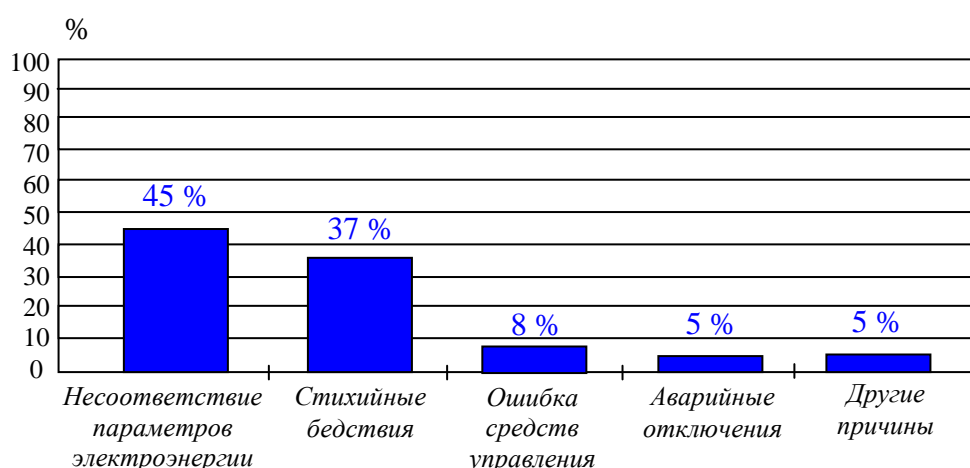


Рисунок 1 – Причины перерывов в электроснабжении потребителей

На этапе предпроектных работ по созданию высокоэффективных комбинированных СБЭ, важную роль играет оптимизация структурно-схемных решений системы по основным критериям, которыми служат, помимо экономических, показатели надёжности, КПД и качества электроэнергии. Они зависят от требований потребителей к параметрам и качеству электроэнергии, современных достижений в развитии техники, климатических условий и территории региона, где предполагается размещать СБЭ [2, 5].

Поэтому целесообразно на первом этапе проектирования разработать обобщённую структурную схему СБЭ (рисунок 2). Схема включает несколько источников электроэнергии: внешнюю сеть, ВИЭ, (ветроэлектрические установки (ВЭУ), солнечную фотоэлектрическую станцию (СФЭС) и малую гидроэлектростанцию (МГЭС)) и традиционные автономные источники электроэнергии (АИЭ), дизельную и газопоршневую электростанции (ДЭС, ГПЭ). Статические преобразователи, используемые в составе СБЭ, инвертор (И), непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) и выпрямители (В) выполняют функции не только согласования параметров источников электроэнергии с нагрузкой, но и функции стабилизаторов напряжения [6, 7, 8].

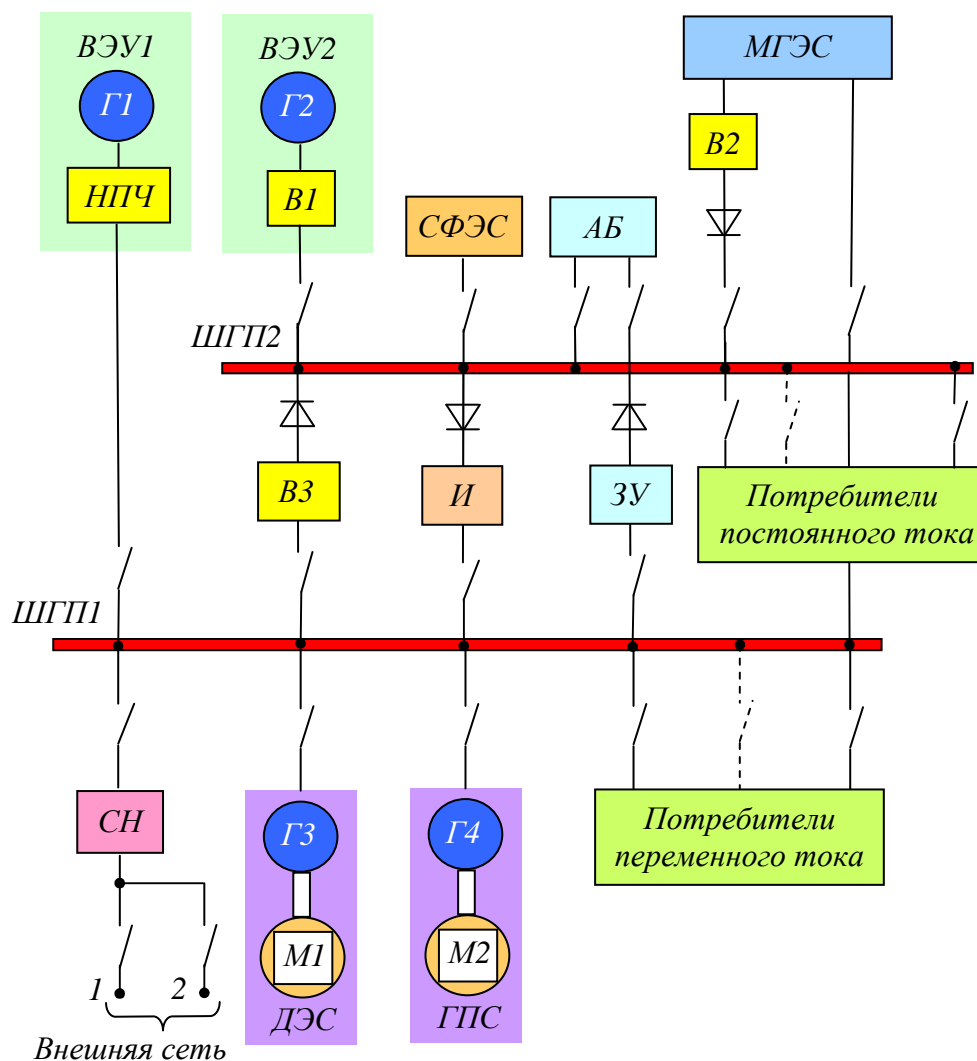


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема СБЭ:
ВЭУ1 и *ВЭУ2* – ветроэнергетические установки; *СФЭС* – солнечная фотоэлектрическая станция; *МГЭС* – малая гидроэлектростанция; *АБ* – аккумуляторные батареи; *В1*, *В2* и *В3* – выпрямители; *И* – инвертор; *ЗУ* – зарядное устройство; *СН* – стабилизатор напряжения; *ДЭС* – дизель-электрическая станция; *ГПС* – газопоршневая станция; *Г1–Г4* – генераторы электроэнергии; *М1* и *М2* – тепловые приводные двигатели; *ШГП1* и *ШГП2* – шины гарантированного питания напряжения переменного тока и постоянного тока соответственно

СБЭ также содержит шины гарантированного питания: переменного и постоянного тока ШГП1 и ШГП2. СБЭ работает в трёх режимах (см. рисунок 2).

Первый режим является основным. Источниками электроэнергии для потребителей переменного и постоянного тока являются ВИЭ: ВЭУ, СФЭС или МГЭС.

Во втором режиме источником электроэнергии для потребителей является внешняя сеть.

В третьем режиме источниками электроэнергии для потребителей являются дизельная или газопоршневая электростанции.

Во всех режимах функционирования СБЭ аккумуляторные батареи находятся в режиме подзаряда. Они являются источниками электроэнергии только на время переключения питания потребителей от одного источника к другому. В этом случае значительно уменьшается мощность батарей, используемых как аварийные источники электроэнергии, запас ёмкости которых должен был обеспечивать всех потребителей системы [5].

Очевидно, что с учетом рассмотренного разнообразия АИЭ можно создавать большое число структурно-схемных решений СБЭ и таким образом выбирать нужную структуру системы, решая оптимизационную задачу по показателям критериев эффективности.

Общие подходы к решению задачи оптимизации структуры СБЭ

К современным СБЭ предъявляются следующие основные требования [2, 6]:

1) соответствие параметров качества электроэнергии на выходе систем электропитания (на шинах гарантированного питания) техническим требованиям потребителей электроэнергии;

2) наличие возможности оптимизации СБЭ как в нормальном, так и аварийных режимах работы путём адаптивного изменения структуры цепей питания и отключения потребителей электроэнергии с учётом приоритета нагрузок;

3) наличие возможности наращивания мощности путем параллельного подключения разных видов источников электроэнергии к шинам гарантированного питания;

4) проведение технического обслуживания и ремонтных работ без перерыва в электроснабжении ответственных потребителей электроэнергии.

5) обеспечение функции оповещения обслуживающего персонала о возникающих аварийных ситуациях.

Электропотребителей СБЭ целесообразно разделить на две группы:

– оборудование, требующее электропитания со стабильно высокими показателями качества электроэнергии, а также не допускающие перерывов в электроснабжении;

– оборудование, подключаемое непосредственно к выходу АИЭ, не требующее стабильно высоких показателей качества электроэнергии и допускающее кратковременный перерыв в электроснабжении, не приводящий к нарушению технологического процесса.

Выделение двух групп потребителей, подключаемых к АИЭ, позволит упростить структуру системы, в том числе уменьшить её стоимость [5].

Обоснование структурно-схемных решений СБЭ для комплекса ответственных потребителей может осуществляться по различным схемам. При этом целесообразно, чтобы основным источником электроэнергии для потребителей являлись ВИЭ, а дополнительными, в том числе резервными – внешняя сеть и АИЭ. В этом случае срок окупаемости ВИЭ уменьшится [6, 9].

Известно, что в зависимости от схемы подключения потребителей к источникам электроэнергии структура СБЭ может быть представлена тремя видами – централизованная, автономная (локальная) или комбинированная [2].

При проектировании необходимо учитывать, что централизованные структуры СБЭ применяются при наличии большого числа ответственных потребителей расположенных на небольшом расстоянии друг

от друга (рисунок 3 а). При больших расстояниях значительно повышается стоимость линии электропередачи и снижается качество электроэнергии.

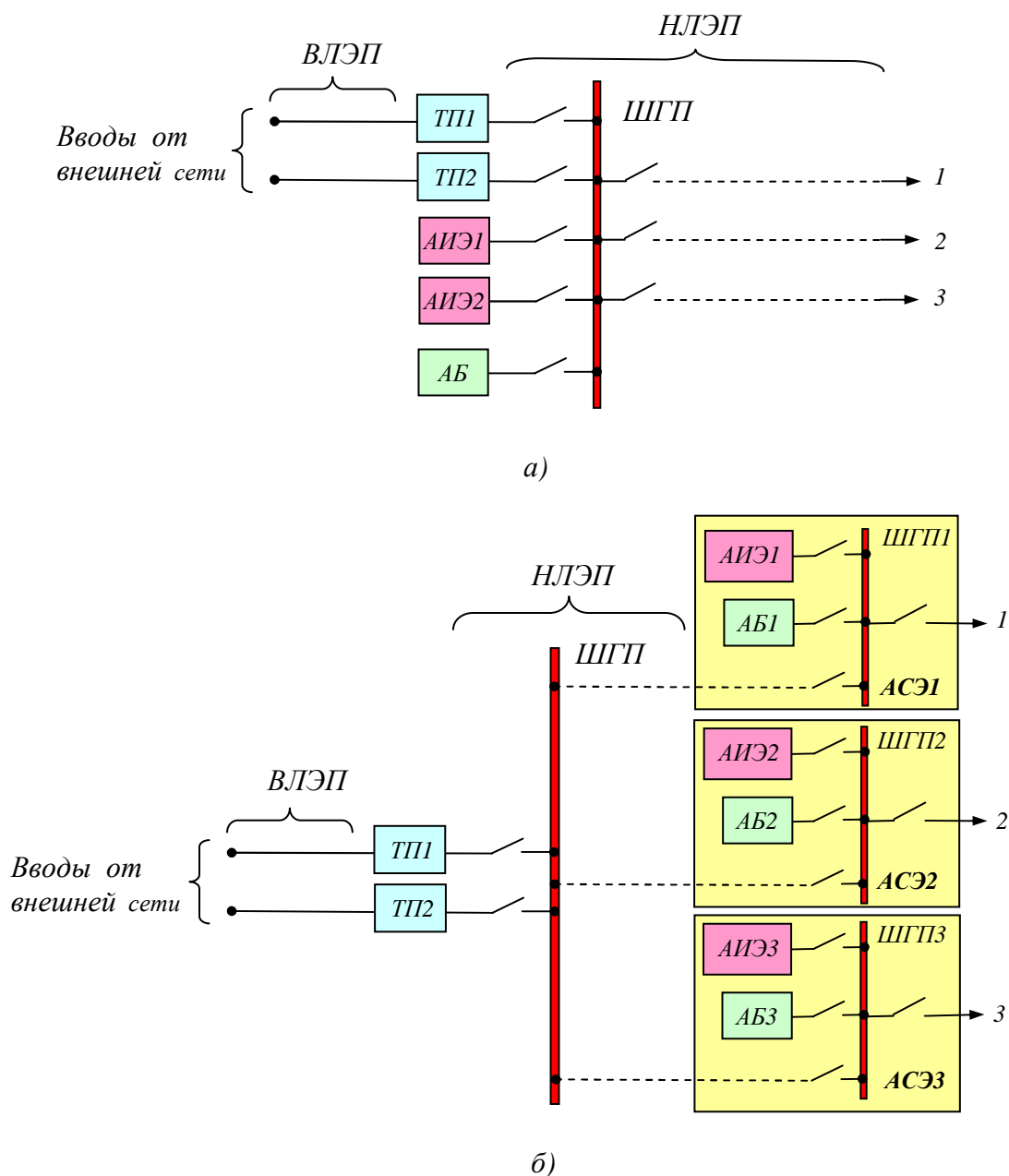


Рисунок 3 – Централизованная (а) и комбинированная (б) структуры СБЭ: ТП1 и ТП2 – трансформаторные подстанции; АИЭ1–АИЭ3 – автономные источники электроэнергии; АБ1–АБ3 – аккумуляторные батареи; АСЭ1–АСЭ3 – автономные системы электроснабжения; ВЛЭП и НЛЭП – высоковольтная и низковольтная линии электропередачи; ШГП, ШГП1–ШГП3 – шины гарантированного питания; 1–3 – выходы для подключения потребителей электроэнергии

Основными достоинствами централизованной структуры СБЭ являются низкая чувствительность к локальным перегрузкам, экономичность и несложность наращивания мощности путём подключения дополнительных источников электроэнергии к шине гарантированного питания ШГП (см. рисунок 3 а).

Основным недостатком централизованной структуры СБЭ является высокая вероятность общего отказа из-за неисправности распределительной сети.

Автономные СБЭ применяются, если потребители находятся на больших расстояниях от внешней электрической сети, когда нецелесообразно, с экономической точки зрения, проводить воздушные линии электропередачи. Основным недостатком автономных СБЭ – повышенная чувствительность к перегрузкам и несимметрии в сети из-за питания однофазных потребителей. Поэтому автономные источники имеют завышенную установленную мощность, как правило, на 20–30%.

В настоящее время в отдельности каждая из рассмотренных структур СБЭ применяется достаточно редко. Для устранения рассмотренных недостатков каждой из систем на практике применяют комбинированную структуру СБЭ (рисунок 3 б). Такая структура предполагает установку автономных систем электроснабжения (АСЭ) поблизости с каждым потребителем, при этом могут быть предусмотрены вводы от внешней сети. Комбинированные системы имеют повышенную надёжность, однако недостаток такой структуры подключения – высокая общая стоимость СБЭ.

Новая элементная база СБЭ

Для улучшения эксплуатационно-технических характеристик (КПД, показателей надёжности, быстродействия систем управления и защиты) в структуре СБЭ необходимо применять новую элементную базу. В качестве электромеханических генераторов электроэнергии необходимо использо-

вать бесконтактные электрические машины, синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронные генераторы емкостного возбуждения. Развитие силовых электронных приборов, применяемых в системах управления бесконтактных генераторов, а также значительное уменьшение удельной массы конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности значительно улучшили их характеристики в сравнении с контактными электрическими машинами (КПД повысился на 5–7%, а ресурс непрерывной работы увеличился в 2–3 раза) [10, 11].

Применение в составе автономных инверторов однофазно-трёхфазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем позволит уменьшить количество силовых электронных приборов в схеме преобразования и стабилизации напряжения, упростить систему управления, уменьшить уровень электромагнитных помех, создаваемых полупроводниковыми приборами при коммутации, и в целом повысить КПД и показатели надёжности преобразователя напряжения постоянного тока [12, 13]. При использовании в их конструкции автономных инверторов промежуточного звена повышенной частоты тока значительно улучшатся массогабаритные показатели [14].

Хороший технический эффект достигается при использовании в составе ветроэлектрической установки непосредственных преобразователей частоты в качестве стабилизатора напряжения и частоты тока. Это позволяет упростить механическую конструкцию редуктора частоты вращения вала ветроколеса за счёт исключения автоматической системы стабилизации частоты вращения [15, 16]. Принцип работы непосредственных преобразователей частоты позволяет осуществлять независимую стабилизацию напряжения и частоты тока генератора ветроустановки [17].

Использование в составе СБЭ комбинированных силовых коммутационных аппаратов, выполненные на силовых электронных приборах, в конструкции которых исключены дугогасительные камеры и, осуществля-

ющих коммутации, и электромеханических контактов, работающих в основном режиме при подключении источников к потребителям, значительно увеличивает ресурс, надёжность и быстродействие таких аппаратов [18].

Перспективным является направление разработки универсальных статических преобразователей (УСП) электроэнергии, работающих в режимах инверторов, выпрямителей, конверторов и преобразователей частоты и способных пропускать через себя потоки энергии в обоих направлениях. УСП представляет собой устройство, содержащее блоки силовых управляемых электронных приборов, фильтров, системы управления и защиты, коммутационные аппараты, трансформаторный блок. Особенностью работы системы управления УСП является то, что она выполняет свои функции по нескольким алгоритмам таким образом, что преобразователь может работать в режиме любого типа преобразователя. Применение УСП в составе СБЭ позволит уменьшить число статических преобразователей электроэнергии и повысит эффективность работы системы в аварийном режиме путём адаптивного изменения структуры силовых цепей и режимов работы УСП [19].

На рисунке 4 представлен один из вариантов структурно-схемного решения СБЭ с использованием УСП, который разработан на базе обобщённой схемы, приведённой на рисунке 2 (на рисунке 4 не показаны АИЭ и внешняя сеть). При питании потребителей электрической энергии от ветроэлектрической установки универсальный статический преобразователь УСП1 может работать в режиме выпрямителя (тогда она подключается к шине ШГП2) или в режиме стабилизатора напряжения переменного тока (тогда она подключается к шине ШГП1). УСП2 работает в режиме выпрямителя, когда основными источниками электроэнергии для потребителей являются ВИЭ и в режиме инвертора – когда источники электроэнергии подключаются к шине ШГП1.

Синтез модульных структур СБЭ

Модульный принцип построения СБЭ повысит надежность работы системы электроснабжения за счёт резервирования основных функциональных элементов (блоков, узлов). Он позволит достаточно просто увеличивать, при необходимости, мощность автономных источников, преобразователей, стабилизаторов и накопителей электроэнергии путем включения соответствующих модулей на параллельную работу. Важно то, что построение СБЭ по модульному принципу сокращает время разработки системы, упрощает задачу по изменению её структуры в зависимости от требований потребителей. Значительный экономический эффект достигается при эксплуатации таких систем за счёт сокращения времени на техническое обслуживание и на устранение неисправностей в аварийных ситуациях [5].

На эксплуатационно-технические характеристики модульных СБЭ оказывают влияние главным образом два фактора, зависящие от требований потребителей электроэнергии: допустимое время перерыва в электроснабжении и показатели качества электроэнергии.

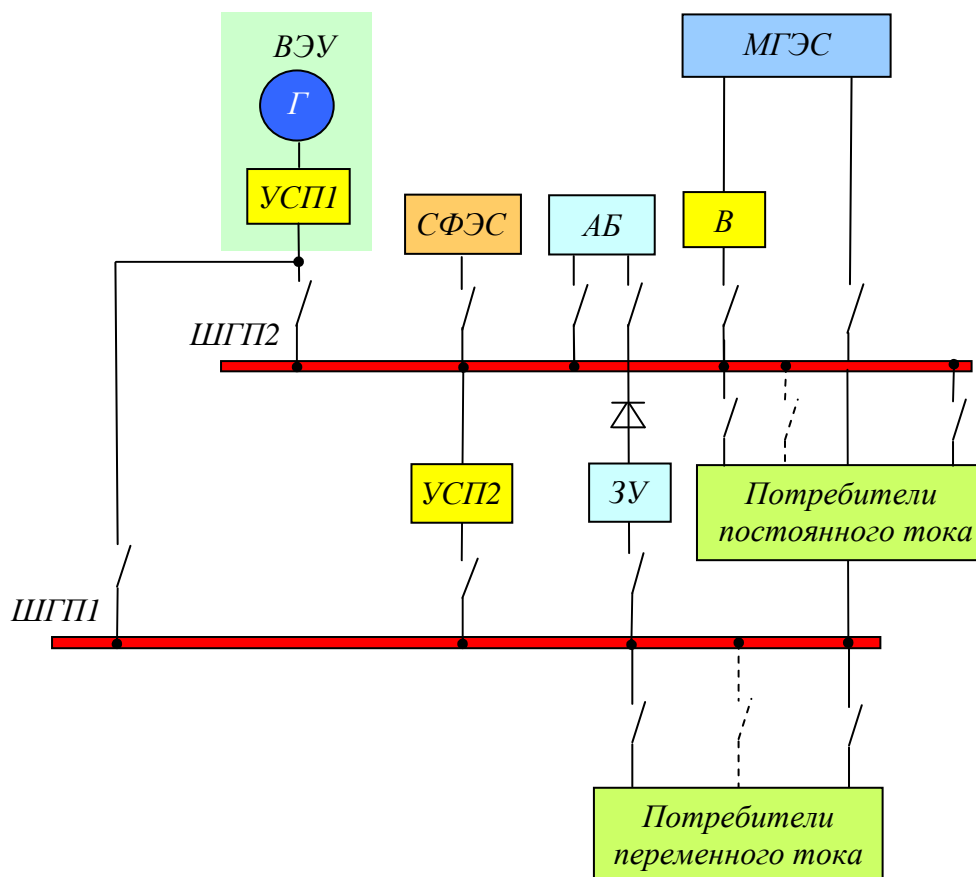


Рисунок 4 – Структурная схема СБЭ с использованием универсального статического преобразователя

Если перерыв в электроснабжении потребителей приводит к значительному экономическому ущербу, в этом случае увеличивается количество резервных источников и преобразователей электроэнергии в составе СБЭ. Чем выше требования к качеству электроэнергии, тем больше усложняется конструкция преобразователей и стабилизаторов параметров электроэнергии.

В общем случае задача синтеза модульных структур СБЭ включает в себя [2, 5]:

1) разработку структурно-схемного решения системы электроснабжения с учетом требований потребителей к качеству электрической энергии, а также допустимому времени перерыва в энергоснабжении;

2) определение степени (уровня) резервирования основных функциональных элементов (блоков, узлов) с учётом обеспечения требуемой надёжности;

3) обеспечение эффективных взаимосвязей, в том числе электромагнитной совместимости, основных функциональных элементов (источников, преобразователей электроэнергии) и рациональное их использование в нормальных и аварийных режимах работы системы;

4) разработку информационной и программной совместимости центральной и локальных систем управления. При этом центральная система управления СБЭ должна выполнять функции контроля параметров электроэнергии, защиты и коммутации, в том числе с помощью подключения или отключения источников и преобразователей электроэнергии, изменения структуры системы в зависимости от требований потребителей и режима работы (нормальный или аварийный).

Функции стабилизации, регулирования параметров электрической энергии должны осуществлять локальные системы управления автономными источниками, преобразователями и стабилизаторами параметров электроэнергии. Таким образом, центральная система управления имеет общие связи с локальными только по контролю параметров и включению или выключению источников и преобразователей электроэнергии из работы. Такое взаимодействие позволяет повысить быстродействие и надёжность работы СБЭ.

Определение оптимальной структуры СБЭ

Важным вопросом при разработке новых структурно-схемных решений СБЭ является определение диапазона оптимальных значений критериев эффективности (показателей надёжности, КПД, качества электрической и тепловой энергии и т. п.), от правильности выбора которых зависят эксплуатационно-технические характеристики проектируемой системы в комплексе [5].

Задача оптимизация СБЭ одновременно по всем критериям эффективности с определением диапазона их оптимальных значений является неразрешимой. Однако оптимизация СБЭ возможна на счёт выбора основных функциональных узлов (источников, стабилизаторов, преобразователей электроэнергии, коммутационных устройств и устройств защиты) с высокими эксплуатационно-техническими, в том числе энергетическими характеристиками.

Известным является способ, основанный на применении многопараметрической оптимизации с использованием обобщённого критерия [5]:

$$F = A_x X + B_y Y + C_z Z + \dots,$$

где X, Y, Z – критерии эффективности БСЭ; A_x, B_y, C_z – весовые коэффициенты, определяющие значения критериев.

Минимизация функции F обеспечивается за счёт всех критериев эффективности (X, Y, Z, \dots), а приоритеты устанавливаются путём выбора значений весовых коэффициентов (A_x, B_y, C_z, \dots), которые не являются строго обоснованными. Как правило, при их выборе опираются на использование экспертных оценок.

Ещё один из несложных подходов – оптимизировать систему по одному или двум критериям, считая фиксированными остальные [2].

Однако более полный результат при оптимизации СБЭ по всем критериям эффективности можно получить, используя метод последовательных отклонений (уступок). На первом этапе фиксируются все критерии эффективности (согласно функции F), кроме оптимизируемого ($X \rightarrow X_{min}$). Затем определяется допустимое отклонение от критерия X_{min} в заданных пределах и находится следующий критерий эффективности Y_{min} . Далее задается допустимое отклонение от Y_{min} , при котором находится последующий критерий эффективности Z_{min} и т. д. Наилучшие результаты обычно даёт оптимизация по функции F с перебором

характерных значений весовых коэффициентов и использованием ограниченных решений, в которых нельзя одновременно улучшить значения всех критериев эффективности.

В любом случае применение того или иного структурно-схемного решения СБЭ должно быть обосновано техническими расчетами, с учетом производственных потерь из-за перерыва в энергоснабжении и снижения качества электроэнергии, а также стоимости элементной базы, в том числе линии электропередачи, АИЭ и ВИЭ. В общем случае задача оптимизации структуры комбинированных СБЭ с точки зрения мощности и стоимости оборудования состоит в определении наиболее ответственных потребителей и минимизации числа групп потребителей путём разработки централизованной адаптивной системы управления, способной изменять структуру СБЭ в зависимости от режима работы [6].

Синтез структурно-схемного решения СБЭ

В общем случае алгоритм синтеза структурно-схемного решения СБЭ включает следующие этапы:

1) группировку потребителей по требованиям к параметрам электроэнергии (мощность, напряжение, род тока и его частота, коэффициент мощности), качеству электроэнергии и бесперебойности электроснабжения;

2) выбор (разработка) функциональных узлов (АИЭ, в том числе ВИЭ, преобразователей и стабилизаторов параметров электроэнергии, коммутационных аппаратов и устройств защиты), определение количества шин гарантированного питания и разработка обобщенной структурной схемы СБЭ;

3) разработку функциональных схем, принципиальных электрических схем силовой части СБЭ с учетом резервирования работы функциональных узлов и адаптивного изменения структуры, режимов работы системы и приоритета нагрузок;

4) сравнительную оценку возможных вариантов построения СБЭ по критериям эффективности: качества электроэнергии, показателей надежности, КПД, стоимости и массогабаритным показателям;

5) исследование электромагнитной совместимости функциональных узлов – математическое моделирование физических процессов в нормальных и аварийных режимах работы. Оптимизация структуры системы с учетом приоритетности для потребителей критериев эффективности;

6) выбор оптимального варианта структурно-схемного решения СБЭ на основании исследований и с учетом эксплуатационных затрат. Разработка практических рекомендаций по техническому решению систем управления, защиты и контроля.

7) формирование технического задания на создание СБЭ.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В настоящее время в энергетике развитие получили направления, достаточно быстро обеспечивающие прямой экономический эффект, при этом, возобновляемая энергетика рассматривалась, как энергоресурс будущего и она будет применяться, когда будут исчерпаны традиционные источники энергии или, когда их добыча станет трудоёмкой и дорогой. Ситуацию резко изменили прогнозы учёных о возможной экологической катастрофе [6].

Первым этапом внедрения ВИЭ является создание комбинированных систем энергоснабжения, с применением традиционных источников энергии. Теоретические исследования в области разработки энергоэффективных и энергосберегающих комбинированных СБЭ позволили сделать следующие выводы:

1) уровень развития технического прогресса сегодня требует создания энергосберегающих и энергоэффективных, в том числе надёжных СБЭ;

2) применение новой элементной базы бесконтактных генераторов электроэнергии, современных силовых электронных приборов, однофазно-трёхфазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем, универсальных статических преобразователей электроэнергии, комбинированных коммутационных аппаратов позволит значительно улучшить эксплуатационно-технические характеристики комбинированных СБЭ;

3) модульное агрегатирование основных функциональных элементов (узлов, блоков) комбинированных СБЭ повысит показатели надёжности и эксплуатационно-технические характеристики системы;

4) рассмотренные простые способы выбора оптимальной структуры СБЭ, позволят улучшить критерии, по которым осуществляется оценка эффективности системы;

5) приведённый алгоритм оценки эффективности систематизирует научный подход к разработке энергосберегающих и энергоэффективных комбинированных СБЭ.

Важным этапом дальнейших исследований с целью совершенствования эксплуатационно-технических характеристик комбинированной СБЭ является математическое моделирование физических процессов в силовых цепях системы в нормальном и аварийном режимах работы. По результатам этих исследований должны быть разработаны рекомендации по электромагнитной совместимости основных функциональных элементов (блоков, узлов) СБЭ, а также по разработке эффективных систем управления и защиты.

Список литературы

1. Амерханов Р.А., Богдан А.В., Вербицкая С.В., Гарькавый К.А. Проектирование систем энергообеспечения: учебник / Под. Ред. Р.А. Амерханова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 548 с.
2. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения. – Краснодар. – 2001. – 333 с.

3. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. и др. Возобновляемые источники электроэнергии: термины, определения, достоинства и недостатки // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 32. – С. 189 – 192.

4. Григораш О.В. Об эффективности и целесообразности использования возобновляемых источников электроэнергии в Краснодарском крае / О.В. Григораш, В.В. Тропин, А.С. Оськина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 09(083). С. 188 – 199. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/09/pdf/38.pdf>.

5. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения. – Краснодар. – 2005. – 306 с.

6. Григораш О.В., Степура Ю.П., Сулейманов Р.А. и др. Возобновляемые источники электроэнергии. – Краснодар. – 2012. – С. 272.

7. Григораш О.В. К расчёту энергетического потенциала и экономической эффективности ветровой энергетики / О.В. Григораш, П.Г. Корзенков, Ю.Е. Кондратенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 06(100). С. 633 – 645. – IDA [article ID]: 1001406004. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/04.pdf>.

8. Усков А.Е. Автономные инверторы солнечных электростанций. – Краснодар: КубГАУ. – 2011. – 137 с

9. Григораш О.В. Стабилизаторы напряжения и частоты тока ветроэлектрических установок на непосредственных преобразователях частоты / О.В. Григораш, А.В. Квитко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №08(092). С. 589 – 617. – IDA [article ID]: 0921308011. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/11.pdf>.

10. Птицын О.В., Григораш О.В. Генераторы переменного тока, состояние и перспективы // Электротехника. – 1994. – № 9. – С. 2 – 6.

11. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы. – Краснодар. – 2012. – 174 с.

12. Григораш О.В., Кабанков Ю.А. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии // Электротехника. – 2002. – № 3. – С. 22–26.

13. Григораш О.В., Дацко А.В., Мелехов С.В. К вопросу электромагнитной совместимости узлов систем автономного электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2001. – № 2. – С. 44–47.

14. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения. – Краснодар. – 2011. – 188 с.

15. Григораш О.В., Божко С.В., Нефедовский В.А., Столбчатый Д.А. Непосредственные преобразователи частоты. – Краснодар. – 2008. – 148 с.

16. Атрощенко В.А., Григораш О.В. Непосредственные преобразователи частоты с улучшенными техническими характеристиками для систем автономного электроснабжения // Электротехника. – 1997. – № 11. – С. 56 – 60.

17. Григораш О.В., Сулейманов Р.А., Квитко А.В. Стабилизаторы параметров электроэнергии ветроэлектрических установок на непосредственных преобразователях частоты // Электротехника. – 2014. – № 4. – С. 35–39.

18. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н., Тельнов Г.В. Электрические аппараты низкого напряжения. – Краснодар: КубГАУ. – 2000. – 313 с.

19. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Шхалахов Р.С. Статические преобразователи электроэнергии. – Краснодар. – 2006. – 264 с.

References

1. Amerhanov R.A., Bogdan A.V., Verbickaja S.V., Gar'kavyj K.A. Proektirovanie sistem jenergoobespechenija: uchebnik / Pod. Red. R.A. Amerhanova. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Jenergoatomizdat, 2010. – 548 s.
2. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N. Sistemy avtonomnogo jelektrosnabzhenija. – Krasnodar. – 2001. – 333 s.
3. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E. i dr. Vozobnovljaemye istochniki jelektroenergii: terminy, opredelenija, dostoinstva i nedostatki // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – № 32. – S. 189 – 192.
4. Grigorash O.V. Ob jeffektivnosti i celesoobraznosti ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jelektroenergii v Krasnodarskom krae / O.V. Grigorash, V.V. Tropin, A.S. Os'kina // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – № 09(083). S. 188 – 199. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2012/09/pdf/38.pdf>.
5. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Normov D.A. i dr. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelektrosnabzhenija. – Krasnodar. – 2005. – 306 s.
6. Grigorash O.V., Stupura Ju.P., Sulejmanov R.A. i dr. Vozobnovljaemye istochniki jelektroenergii. – Krasnodar. – 2012. – S. 272.
7. Grigorash O.V. K raschjotu jenergeticheskogo potenciala i jekonomicheskoj jeffektivnosti vetrovoj jenergetiki / O.V. Grigorash, P.G. Korzenkov, Ju.E. Kondratenko // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – № 06(100). S. 633 – 645. – IDA [article ID]: 1001406004. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/04.pdf>.
8. Uskov A.E. Avtonomnye inventory solnechnyh jelektrostantsij. – Krasnodar: KubGAU. – 2011. – 137 s.
9. Grigorash O.V. Stabilizatory naprjazhenija i chastoty toka vetrojelektricheskikh ustanovok na neposredstvennyh preobrazovateljah chastoty / O.V. Grigorash, A.V. Kvitko // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – №08(092). S. 589 – 617. – IDA [article ID]: 0921308011. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/11.pdf>.
10. Pticyн O.V., Grigorash O.V. Generatory peremennogo toka, sostojanie i perspektivy // Jelektrotehnika. – 1994. – № 9. – S. 2 – 6.
11. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr. Avtonomnye istochniki jelektroenergii: sostojanie i perspektivy. – Krasnodar. – 2012. – 174 s.
12. Grigorash O.V., Kabankov Ju.A. K voprosu primenenija transformatorov s vrahajushhimsja magnitnym polem v sostave preobrazovatelej jelektroenergii // Jelektrotehnika. – 2002. – № 3. – S. 22–26.
13. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovmeti-mosti uzlov sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija // Promyshlennaja jenergetika. – 2001. – № 2. – S. 44–47.
14. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E. Sticheskie preobrazovateli i stabilizatory avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija. – Krasnodar. – 2011. – 188 s.

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

16. Atroshhenko V.A., Grigorash O.V. Neposredstvennye preobrazovateli chastoty s uluchshennymi tehničeskimi harakteristikami dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija // Jelectrotehnika. – 1997. – № 11. – S. 56 – 60.

17. Grigorash O.V., Sulejmanov R.A., Kvitko A.V. Stabilizatory parametrov jelektroenergii vetrojelektрических установок na neposredstvennyh preobrazovateljah chastoty // Jelectrotehnika. – 2014. – № 4. – S. 35–39.

18. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N., Tel'nov G.V. Jelektрические apparaty nizkogo naprjazhenija. – Krasnodar: KubGAU. – 2000. – 313 s.

19. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Hamula A.A., Shhalahov R.S. Statische-
kie preobrazovateli jelektroenergii. – Krasnodar. – 2006. – 264 s.