

УДК 621.314

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Винников Анатолий Витальевич
к.т.н., доцент, декан

Усков Антон Евгеньевич
старший преподаватель
9184349285@mail.ru
SPIN-код: 7461-9490

Хицкова Алина Олеговна
аспирантка

Горбачёв Владимир Александрович
студент
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

В статье приведены обобщённые структурные схемы стационарных и транспортных систем бесперебойного электроснабжения; раскрыто их содержание и основные режимы работы, обеспечивающие бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей. Приводится классификация систем бесперебойного электроснабжения. Основными классификационным признаками систем бесперебойного электроснабжения являются их назначение для стационарных или транспортных потребителей электроэнергии, типы используемых основных, резервных и аварийных источников и преобразователей электроэнергии. Кроме того, системы бесперебойного электроснабжения могут классифицироваться по схемам подключения к потребителям электроэнергии, разделению их по роду тока (постоянный, переменный, высокочастотный), перерывах в электроснабжении, типу коммутационной аппаратуры и так далее. Для оценки эффективности систем бесперебойного электроснабжения предложено использовать следующие критерии эффективности: энергетические и массогабаритные показатели, показатели надёжности, качества электроэнергии и стоимости. Приводятся аналитические выражения для расчёта показателей оценки эффективности систем бесперебойного электроснабжения. Предложенная в статье классификация систем бесперебойного электроснабжения и режимы их работы, а также основные критерии оценки эффективности позволят повысить эффективность предпроектных работ по созданию систем с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками с использованием современной элементной базы.

Ключевые слова: СИСТЕМА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, АВТОНОМ-

UDC 621.314

CLASSIFICATION AND ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF SYSTEMS FOR UNINTERRUPTED ELECTROSUPPLY

Vinnikov Anatoly Vitaljevich
Cand.Tech.Sci., associate professor, dean

Uskov Anton Evgenyevich
senior lecturer
9184349285@mail.ru
SPIN-code 7461-9490

Hitskova Alina Olegovna
postgraduate student

Gorbachjov Vladimir Aleksandrovich
student
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

In the article we present generalized block diagrams of stationary and transport systems of uninterrupted electrosupply, as well as their maintenance and the basic operating modes providing uninterrupted electrosupply of crucial consumers. Classification of systems of uninterrupted electrosupply is resulted. The basic classification attributes of systems of uninterrupted electrosupply are their assignment for stationary or transport consumers of the electric power, types of used basic, reserve and emergency sources and converters of the electric power. Besides systems of uninterrupted electrosupply can be classified under circuits of connection to consumers of the electric power, their division on a sort of a current (constant, variable, high-frequency), breaks in electrosupply, to type of the switching equipment and so on. For the estimation of the efficiency of systems of uninterrupted electrosupply it is offered to use the following criteria of efficiency: Power and weight-dimension parameters, parameters of reliability, quality of the electric power and cost. Analytical expressions for calculation of parameters of the estimation of efficiency of systems of uninterrupted electrosupply are resulted. The classification of systems of uninterrupted electrosupply suggested in article and modes of their work, and also the basic criteria of an estimation of efficiency will allow raising efficiency of pre-design works on creation of systems with improved customer characteristics with use of modern element base

Keywords: UNINTERRUPTED POWER SUPPLY SYSTEM, AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM, AUTONOMOUS ENERGY SOURCE, ENER-

НЬИ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ПРЕОБ- ГY CONVERTER
РАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Системы бесперебойного электроснабжения (СБЭ) широко применяются на транспорте, в авиационно-космической и судовой технике, на стационарных объектах, кроме того, в последнее время они находят применение и в сельскохозяйственном производстве. СБЭ обеспечивают электроэнергией в основном ответственные потребители (потребители 1-й категории) которыми являются компьютерные системы управления, связи и обработки информации, автоматические системы управления технологическими процессами и целыми производственными комплексами. Кроме того, важная функция отводится транспортным СБЭ, которые обеспечивают электроэнергией потребители в труднодоступных районах, в том числе, при возникновении аварийных ситуаций [1].

СБЭ представляет собой комплекс электротехнических устройств, взаимодействующих между собой в сложном процессе производства, преобразования, передачи и распределения электрической энергии с заданными приоритетом нагрузок [1]. Основным источником электроэнергии в стационарных СБЭ является внешняя энергосистема (атомные, тепловые и др. электростанции), а в качестве резервных источников применяются автономные источники электроэнергии (АИЭ) – дизель-электрические станции (ДЭС), возобновляемые источники электроэнергии (ВИЭ), аккумуляторные батареи и т. д. Тип и количество АИЭ, преобразователей электроэнергии (ПЭ) и резервных источников СБЭ определяются требованиями потребителей [2, 3].

Необходимость включения ПЭ (вторичных источников электроэнергии) в состав СГЭ вызвана тем, что большинство потребителей электроэнергии требуют для своего питания электроэнергию с параметрами, отличными от тех, которые генерируют внешняя сеть и АИЭ [4].

В настоящее время известно большое многообразие структурных решений СБЭ. На рисунке 1 представлена обобщенная структурная схема стационарных СБЭ, где обозначено: дизель-электрическая станция – ДЭС; аккумуляторные батареи - АБ; статические преобразователи - выпрямители $B1$ и $B2$, инвертор I , конвертор K ; электромашинные преобразователи - двухмашинный, выполненный на базе двигателя постоянного тока $M1$ и синхронного генератора $СГ1$ и трехмашинный преобразователь, выполненный на базе двигателя переменного и постоянного тока соответственно $M2$ и $M3$, и синхронного генератора $СГ2$; шины гарантированного электропитания переменного $Ш1$ и постоянного $Ш2$ токов.

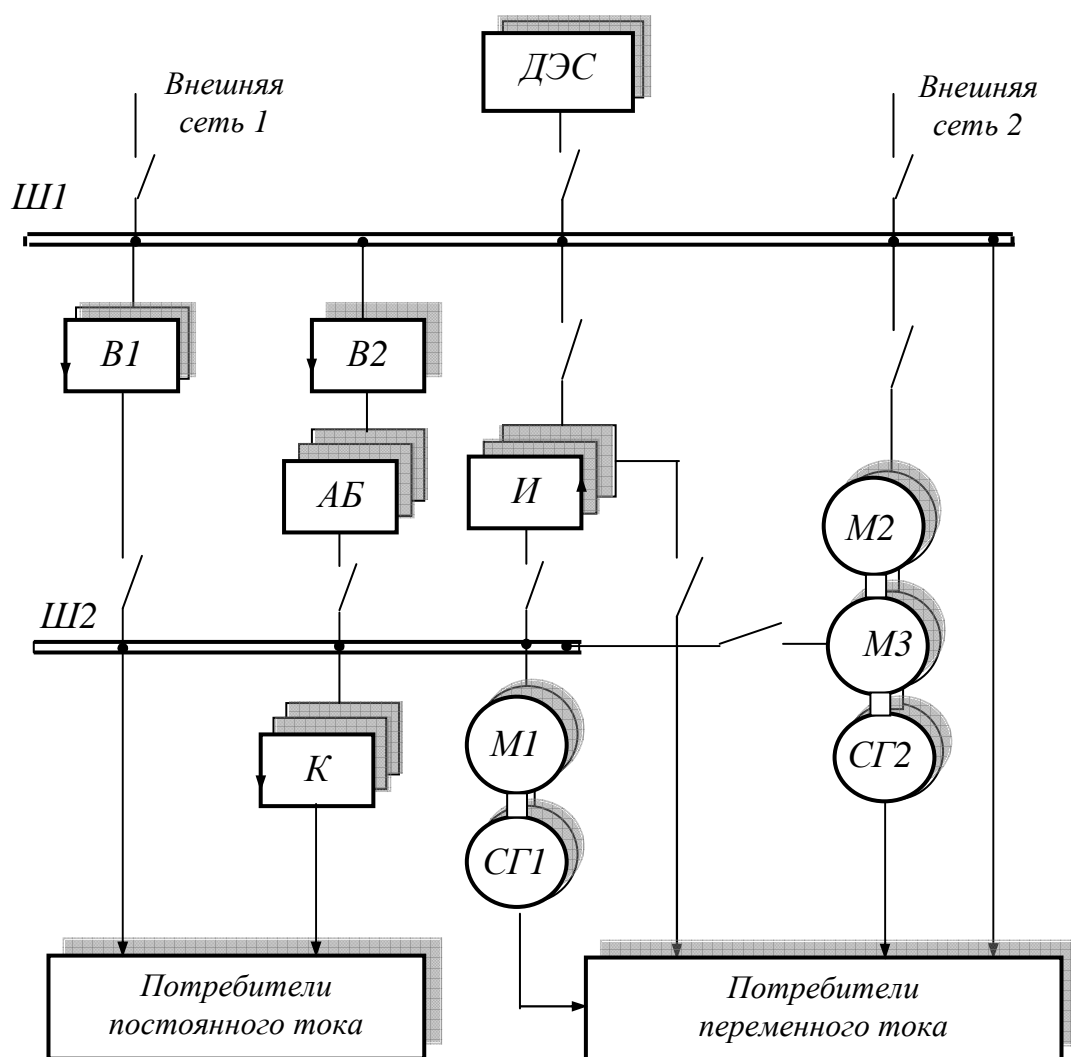


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема стационарных СБЭ

В основном режиме работы стационарных СБЭ питание потребителей электроэнергией обеспечивается по основному вводу «Внешняя сеть 1» или дополнительному вводу «Внешняя сеть 2». Дизель-электрическая станция ДЭС является резервным источником электроэнергии, аккумуляторные батареи АБ – аварийный источник. Для повышения надежности электроснабжения автономные источники, полупроводниковые и электромашинные преобразователи имеют резерв однотипных источников и преобразователей.

Когда источниками питания для потребителей электроэнергии является внешняя сеть или ДЭС (включены контакторы К1 или К2 или К3), и

соответственно, контактор $K6$. Потребители постоянного тока получают питание от шины III_2 , а переменного от шины III_1 . В этих режимах аккумуляторные батареи AB находятся в режиме непрерывного подзаряда от выпрямителя $B2$. Для обеспечения бесперебойности электроснабжения, при исчезновении напряжения на двух внешних вводах, на время запуска ДЭС (30 – 50 с) потребители переменного тока получают питание от двухмашинного преобразователя электроэнергии $M1 - CГ1$, питание которого, как и потребителей постоянного тока, осуществляется от аккумуляторных батарей AB . Длительность перерыва электроснабжения потребителей переменного тока в этом случае определяется временем запуска двухмашинного преобразователя и находится в пределах $2 \div 3$ с [2].

Если же потребители электроэнергии не допускают разрыва кривой питающего напряжения, то применяются структуры СБЭ с использованием трехмашинных преобразователей. Потребители переменного тока в этом случае получают питание от постоянно работающего трехмашинного преобразователя $M2 - M3 - CГ2$. При этом в нормальном режиме работы привод синхронного генератора $CГ2$ осуществляется асинхронным двигателем $M2$, а при прекращении электроснабжения от шины III_1 привод $CГ2$ осуществляется двигателем постоянного тока $M3$ источником питания которого являются аккумуляторные батареи AB .

Иногда в СБЭ с двухмашинными преобразователями используются инерционные маховики, которые размещаются на валу между электрическими машинами. В этом случае при прекращении электроснабжения от внешней сети за счет массы маховика (его инерционности) обеспечивается непрерывное электроснабжение потребителей в интервале времени необходимым для запуска ДЭС.

СБЭ на базе статических ПЭ имеют преимущества в сравнении с СБЭ, выполненными на электромашинных преобразователях по показателям надежности и времени необслуживаемой работы.

Типовые структурные схемы транспортных СБЭ, выполненных на базе статических ПЭ представленные на рисунке 2, где обозначено: *ПД* – приводной двигатель; *Г* – генератор электроэнергии; *ШГП1* и *ШГП2* – шины гарантированного питания переменного и постоянного тока соответственно; *ТВП* – трансформаторно-выпрямительный преобразователь; *ИТП* – инверторно-трансформаторный преобразователь; *ПНП* – преобразователь напряжения постоянного тока; *АБ* – аккумуляторные батареи. Особенностью конструкции данных схем является отсутствие вводов электропитания от внешних источников электроэнергии, но они могут быть предусмотрены. Надежность работы таких систем повышается за счет дополнительных резервных АИЭ и ПЭ (на рисунке 2 не показаны).

АИЭ СБЭ (рисунке 2, *а*) генерирует переменный ток промышленной частоты, резервным источником электроэнергии является генератор постоянного тока *Г*, привод которого, как правило, осуществляется от коробки отбора мощности ходового двигателя. Инверторно-трансформаторный преобразователь *ИТП* работает при отключении АИЭ, т.е. когда источником электроэнергии являются аккумуляторные батареи *АБ* или генератор постоянного тока *Г*. *ТВП2* выполняет функции зарядного устройства.

АИЭ СБЭ (рисунок 2, *б*) является источником напряжения постоянного тока. В зависимости от величины генерируемого напряжения постоянного тока автономная система электроснабжения (АСЭ) может иметь преобразователь напряжения постоянного тока *ПНП*, выполняющего функции зарядного устройства.

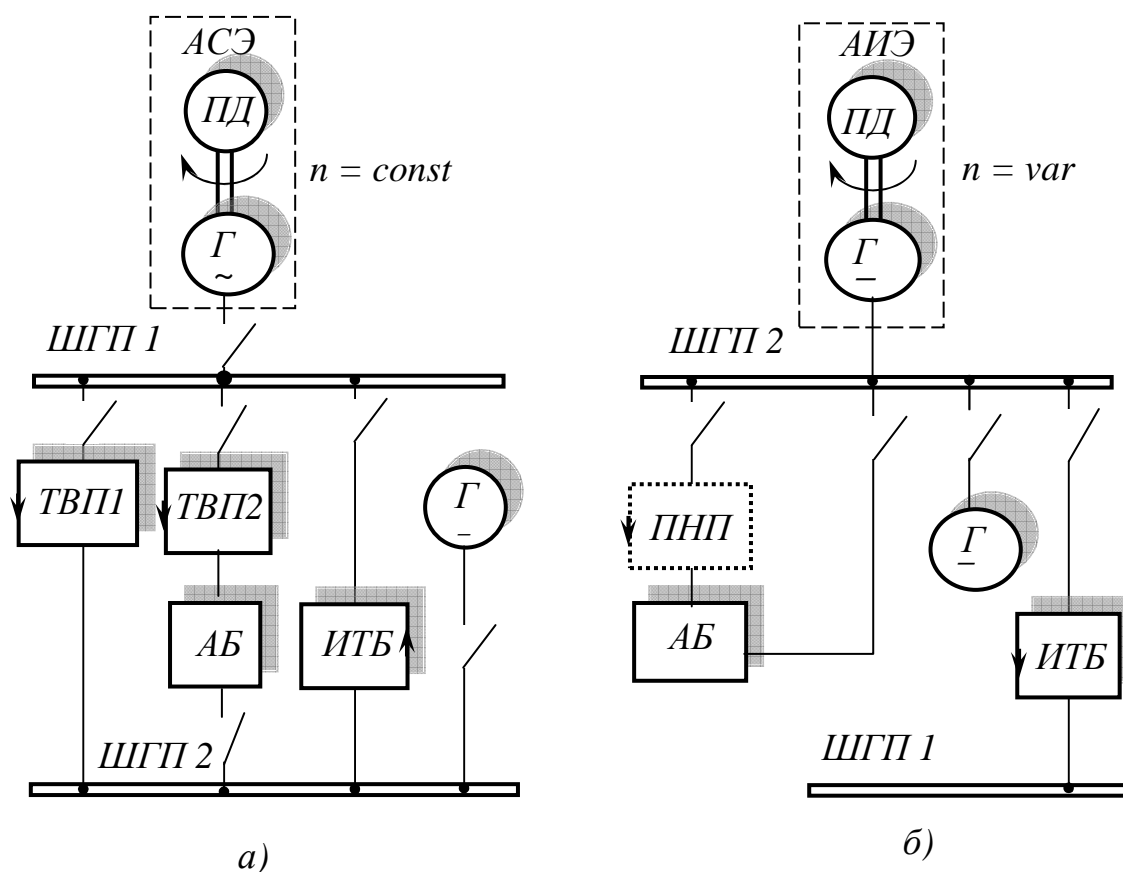


Рисунок 2 – Типовые структурные схемы транспортных СБЭ

С учетом, обобщенной структурной схемы стационарных и типовых структурных схем транспортных СБЭ можно представить в общем виде классификацию СБЭ (см. рисунок 3).

Основным классификационным признаком СБЭ является их назначение: для стационарных или транспортных потребителей электроэнергии. Вторыми по важности классификационными признаками являются типы используемых основных, резервных и аварийных источников и преобразователей электроэнергии. Кроме того, СБЭ могут классифицироваться по схемам подключения к потребителям электроэнергии (централизованные, децентрализованные и комбинированные), разделению их по роду тока, перерывам в электроснабжении, типу коммутационной аппаратуры и т.д.

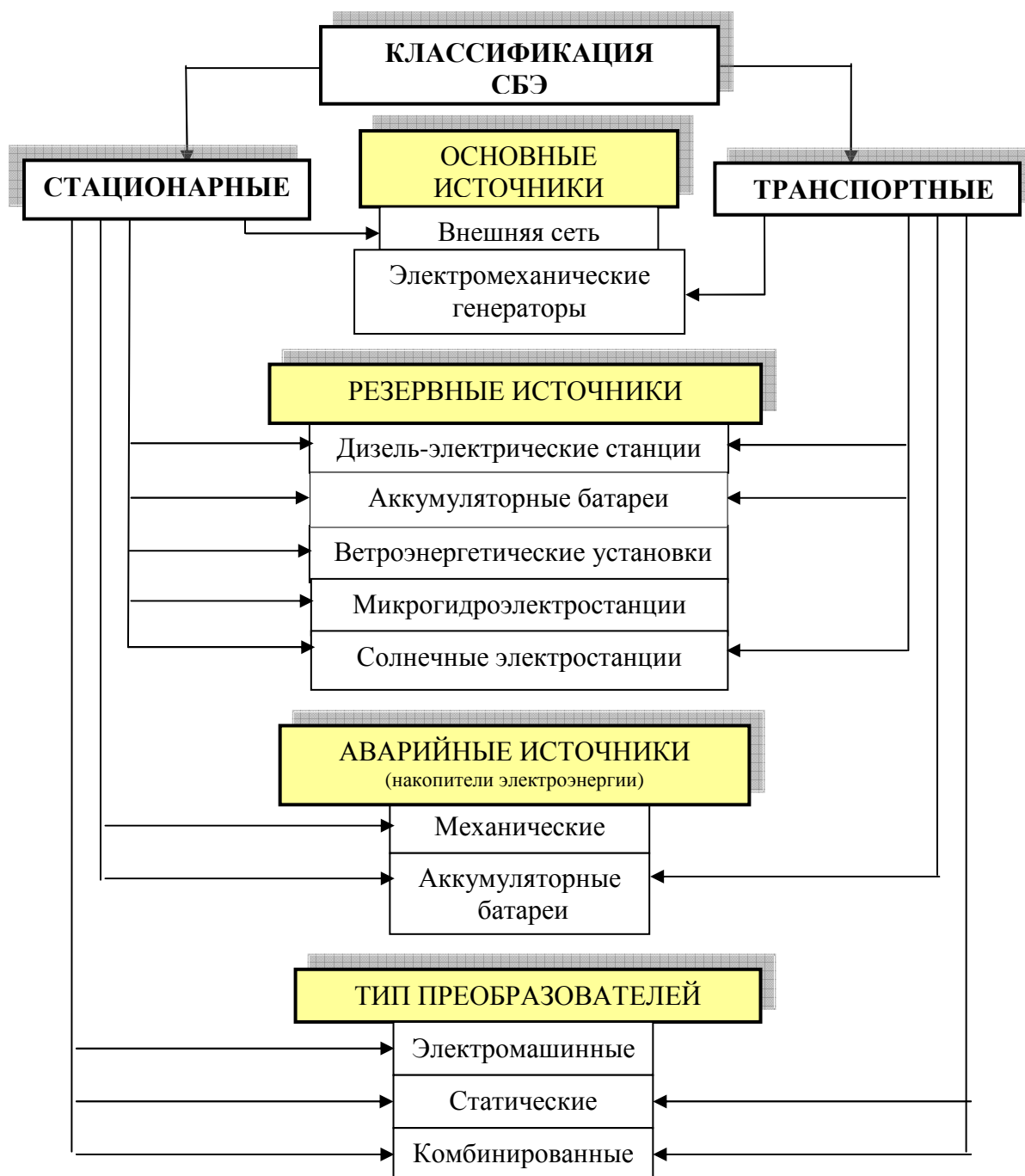


Рисунок 3 – Общая классификация систем бесперебойного электроснабжения

Для оценки эффективности СБЭ необходимо использовать следующие критерии эффективности: энергетические и массогабаритные показатели, показатели надежности, качества электроэнергии и стоимости [1].

Как правило, в качестве массогабаритных показателей используют результаты расчета массы, а для оценки энергетических показателей применяют расчетные значения КПД. Кроме того, при проектировании АСЭ

ответственных потребителей в качестве энергетических показателей используются критерии оценки качества электроэнергии (отклонения, колебания напряжения и частоты тока и т. п.). Для оценки показателей надежности проводится расчет вероятности безотказной работы в течение установленного времени, средней наработки до первого отказа и коэффициента готовности.

В период эксплуатации СБЭ требуемая мощность потребителями постоянного и переменного тока изменяется в широких пределах. Поэтому АИЭ и ПЭ должны работать в режимах, обеспечивающих максимальное и минимальное потребление мощности. Кроме того, если учесть, что потребители отличаются не только по потребляемой мощности и роду тока, а и по частоте (для переменного тока) и величине напряжения, то можно создать большое число структурных решений СБЭ, обеспечивающих генерирование электроэнергии требуемого качества. Очевидно, что из большого числа структур систем электроснабжения всегда возможно отобрать структуры СБЭ, имеющие лучшие, в сравнении с другими техническими решениями показатели критериев эффективности.

Целесообразно на этапе проектирования вначале осуществить оценку СБЭ по основным критериям эффективности. Исходными данными для такой оценки являются:

1) количество питающих шин (здесь учитывается род тока его частота, уровень напряжения и мощность потребителей), необходимые для электроснабжения потребителей;

2) технические решения эксплуатируемых и перспективных приводных двигателей, АИЭ, ПЭ и коммутационных аппаратов.

На основании исходных данных строится обобщенная схема электроснабжения (см. рисунки 1 и 2). С учетом известных режимов работы, в том числе их времени, можно определить массу и КПД, как АИЭ и ПЭ,

так и возможных вариантов структурного решения СБЭ в целом. При этом масса СБЭ определяется по формуле

$$M_{СБЭ} = \sum_{i=1}^n S_{АИЭi} (m_{ПДi} + m_{Гi}) + \sum_{j=1}^k S_{ПЭj} m_{ПЭj}, \quad (1)$$

где $S_{АИЭi}$ и $S_{ПЭj}$ – мощность автономного i -го источника и j -го преобразователя электроэнергии соответственно, в том числе резервных; n и k – количество источников и преобразователей соответственно; $m_{ПДi}$ и $m_{Гi}$ – значения удельных масс приводного двигателя и генератора; $m_{ПЭj}$ – удельная масса преобразователя.

Выражение (1) не учитывает массу коммутационной аппаратуры и других элементов системы, но оно позволяет, аргументировано, проводить сравнительную оценку структурных решений СБЭ [1].

Поскольку СБЭ работают в нескольких режимах работы, обусловленные, прежде всего, изменением источника электроэнергии, и как следствие работающих ПЭ, то КПД АСЭ для одного режима работы, только с учетом потерь в АИЭ и преобразователях, определяется по формуле

$$\eta_{АСЭр} = \eta_{АИЭ} \eta_{рПЭ}, \quad (2)$$

где $\eta_{АИЭ}$ – КПД автономного источника, работающего в расчетном режиме; $\eta_{рПЭ}$ – результирующее КПД преобразователей электроэнергии расчетного режима, которое определяется по формуле

$$\eta_{рПЭ} = \frac{\sum_{j=1}^k S_{ПЭj}}{\sum_{j=1}^k S_{ПЭj} + \sum_{j=1}^k \Delta P_j}, \quad (3)$$

где ΔP_j – потери электроэнергии j -го преобразователя.

Практически определив значения КПД АСЭ для всех ее режимов работы, определяющим является значение КПД основного режима, режима имеющего наибольший временной интервал эксплуатации систе-

мы. На этапе проектирования СБЭ качество выходного напряжения постоянного тока достаточно оценивать расчетным значением коэффициента пульсации K_D , а качество напряжения переменного тока – коэффициентом несинусоидальности K_U [1].

Когда полностью установлен состав спроектированной системы электроснабжения, проводится расчет основных показателей надежности нового технического решения СБЭ и расчет экономических показателей.

Основные показатели надежности СБЭ является статистический показатель – интенсивность отказов основных функциональных узлов, блоков и элементов λ , а также средняя наработка до первого отказа системы, которая определяется по формуле

$$T_{срАСЭ} = 1 / \lambda_C(t), \quad (4)$$

где $\lambda_C(t)$ – суммарное значение интенсивностей отказов функциональных узлов, блоков и элементов системы.

Вероятность безотказной работы за время t численно показывающая степень объективной возможности отсутствия отказа в заданном интервале времени определяется по формуле

$$P_{СБЭ}(t) = P_{АИЭ}(t) \cdot P_{ПЭ}(t), \quad (5)$$

где $P_{АИЭ}(t)$ и $P_{ПЭ}(t)$ – вероятности безотказной работы автономных источников и преобразователей электроэнергии соответственно.

Учитывая резервирование работы основных функциональных узлов, важным показателем надежности СБЭ является бесперебойность электроснабжения потребителей, которая оценивается значением коэффициента готовности K_G . Как правило, считают, что время восстановления работоспособности функционального узла (блока, элемента) равно времени включения его резерва, поэтому значение коэффициента готовности определяется по формуле

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{ср}\phi\psi}}{T_{\text{ср}\phi\psi} + t_{\text{вкл}}} P_{\phi\psi}(t), \quad (6)$$

где $T_{\text{ср}\phi\psi}$ – средняя наработка до отказа функционального узла; $t_{\text{вкл}}$ – время включения резервного функционального узла; $P_{\phi\psi}(t)$ – вероятность безотказной работы функционального узла в определяемый интервал времени.

Окончательный расчет вероятности безотказной работы СБЭ и средней наработки до отказа выполняется тогда, когда известны реальные режимы работы системы.

Последним этапом оценки эффективности является определение стоимости разработанной СБЭ, которая определяется по формуле

$$C_{\text{СБЭ}} = C_{\text{O}} + C_{\text{Э}}, \quad (7)$$

где C_{O} – стоимость оборудования; $C_{\text{Э}}$ – эксплуатационные расходы.

Стоимость оборудования для оценочных расчетов в первом приближении вычисляют по формуле

$$C_{\text{O}} = \sum_{i=1}^N P_i C_i, \quad (8)$$

где P_i и C_i – мощность и удельная стоимость соответственно i -го оборудования; N – количество оборудования СБЭ.

Затраты на эксплуатационные расходы для различного оборудования происходят в различное время. Поэтому при использовании экономических показателей их необходимо привести к одному времени - началу эксплуатации. В общем случае эксплуатационные расходы определяются по формуле

$$C_{\text{Э}} = \frac{C_{\text{уд}}^t C_{\text{O}}}{(1 + E_{\text{H}})^t} \cdot \alpha_{\text{СС}}, \quad (9)$$

где C_{y0}^t – удельные эксплуатационные затраты за время эксплуатации t ; E_H – нормативный коэффициент; α_{cc} – коэффициент, учитывающий изменение срока службы.

Таким образом, рассмотренная классификация СБЭ и режимы их работы, а также предложенные основные критерии оценки позволят повысить эффективность предпроектных работ по созданию СБЭ с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками с использованием современной элементной базы. При этом, важным является вопрос предпроектных работ – это учитывать электромагнитную совместимость основных функциональных узлов СБЭ [5].

Список литературы

1. Григораш О.В., Божко С.В., Безуглый С.М. Модульные системы гарантированного электроснабжения: Монография. КВВАУЛ. – Краснодар, 2006, 306 с.
2. Григораш О.В., Тропин В.В., Оськина А.С. Об эффективности и целесообразности использования возобновляемых источников энергии в Краснодарском крае // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 83 (09). С. 188 – 199.
3. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы: Монография. – Краснодар: ВУЦ ВВС. – 2012. – 174 с.
4. Григораш О.В. Генераторы переменного тока. Состояние и перспективы // Электротехника. – 1994. – № 9. – с. 2 – 6.
5. Григораш О.В., Дацко А.В., Мелехов С.В. К вопросу электромагнитной совместимости основных узлов САЭ // Промышленная энергетика. – 2001. – № 2. – с. 44 – 47.
6. Однофазно-трехфазный трансформатор с вращающимся магнитным полем Григораш О.В., Власенко Е.А., Усков А.Е., Бутенко А.В., Григораш А.О. патент на изобретение RUS 2417471 25.01.2010
7. Автономные инверторы солнечных электростанций Усков А.Е. Краснодар, 2011.
8. Преобразователь напряжения постоянного тока с промежуточным звеном повышенной частоты Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е., Власенко Е.А., Винников А.В. патент на изобретение RUS 2414802 29.03.2010
9. Однофазный автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией переменного тока Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е., Тонкошкуров Ю.Н., Сулейманов А.Э. патент на изобретение RUS 2420854 11.05.2010
10. Автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е.; Тонкошкуров Ю.Н., Сулейманов А.Э. патент на изобретение RUS 2421871 12.05.2010

References

1. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Bezuglyj S.M. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelectrosnabzhenija: Monografija. KVVAUL. – Krasnodar, 2006, 306 s.
2. Grigorash O.V., Tropin V.V., Os'kina A.S. Ob jeffektivnosti i celesoobraznosti ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии v Krasnodarskom krae // Politematicheskij setevoj jelektronnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU). – Krasnodar: KubGAU, 2012. – № 83 (09). S. 188 – 199.
3. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr Avtonomnye istochniki jelektrojenerгии: sostojanie i perspektivy: Monografija. – Krasnodar: VUC VVS. – 2012. – 174 s.
4. Grigorash O.V. Generatory peremennogo toka. Sostojanie i perspektivy // Jelektrotehnika. – 1994. – № 9. – s. 2 – 6.
5. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovместimosti osnovnyh uzlov SAJe // Promyshlennaja jenergetika. – 2001. – № 2. – s. 44 – 47.
6. Odnofazno-trehfaznyj transformator s vrashhajushhimsja magnitnym polem Grigorash O.V., Vlasenko E.A., Uskov A.E., Butenko A.V., Grigorash A.O. patent na izobrenie RUS 2417471 25.01.2010
7. Avtonomnye invertory solnechnyh jelektrostantsij Uskov A.E. Krasnodar, 2011.
8. Preobrazovatel' naprjazhenija postojannogo toka s promezhutochnym zvenom povyshennoj chastoty Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E., Vlasenko E.A., Vinnikov A.V. patent na izobrenie RUS 2414802 29.03.2010
9. Odnofaznyj avtonomnyj inverter s shirotno-impul'snoj moduljaciej peremennogo toka Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E., Tonkoshkurov Ju.N., Sulejmanov A.Je. patent na izobrenie RUS 2420854 11.05.2010
10. Avtonomnyj inverter s shirotno-impul'snoj moduljaciej vyhodnogo naprjazhenija Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E.; Tonkoshkurov Ju.N., Sulejmanov A.Je. patent na izobrenie RUS 2421871 12.05.2010