

УДК 621.313

**АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ, ОСНОВАННАЯ
НА СОВМЕСТНОМ ПРИМЕНЕНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
И ТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Д.Ю. Хохлов, К.А. Набатов

*Кафедра «Электрооборудование и автоматизация»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; ket@nnn.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: автоматизированная система управления; автономная система электроснабжения; альтернативные энергоресурсы; звено постоянного тока; классы замещения ресурсов; принцип замещения ресурсов; снижение расхода топлива; совместная работа генераторов; увеличение ресурса двигателей; экологическая эффективность.

Аннотация: Рассмотрены общие вопросы синтеза автономной системы электроснабжения с возможностью использования нетрадиционных источников энергии, характеризующейся по сравнению с существующими аналогами сниженным удельным расходом топлива, увеличенным сроком службы первичных двигателей и возможностью совместной работы генераторов любого типа.

На предприятиях добывающей промышленности, сельскохозяйственных производствах, а также в инфраструктуре сопутствующих им поселений находят широкое применение электроприводы постоянного и переменного тока, которые функционируют в составе насосов, компрессоров, флотационных установок и прочего технологического и вспомогательного оборудования. Ввиду того, что основные промышленные месторождения углеводородного сырья, руд ценных металлов и других полезных ископаемых сосредоточены в отдаленных районах Сибири, Крайнего Севера и Дальнего Востока, а многие сельскохозяйственные предприятия находятся на значительном удалении от электрических сетей, одной из важнейших задач при разработке инженерных систем приведенных выше объектов является обеспечение их качественной электроэнергией, в том числе от автономных систем электроснабжения (СЭС) [1]. При этом децентрализованное электроснабжение должно быть не только надежным, но и экономически эффективным, поэтому принятие решения о проектировании на объекте автономной СЭС, в общем случае, должно осуществляться на основании технико-экономического сопоставления, учитывающего не только величины капитальных затрат на строительство линейных объектов и текущие тарифы, но и постоянный рост последних, а также имеющее место в последние годы снижение основных показателей надежности внешнего электроснабжения [2], проявляющееся в виде серьезных аварийных ситуаций на объектах российской энергетики. Из сказанного выше вытекает, что развитие автономного электроснабжения становится важным направлением в энергетике ведущих отраслей промышленности и народного хозяйства.

При разработке автономных СЭС необходимо решить целый ряд задач:

- достижение соответствия показателей качества электроэнергии, вырабатываемой системой, нормативным документам;
- обеспечение как можно более экономичного режима работы автономной СЭС, что связано, в том числе, со значительными трудностями доставки топлива в отдаленные районы;
- минимизация негативного влияния автономной СЭС на окружающую среду;
- снижение влияния графика нагрузки на продолжительность автономной работы системы, обусловленного недоиспользованием номинальной мощности генераторов, в связи с чем происходит снижение их КПД в соответствии с выражением

$$\eta_G = \frac{P_G}{P_G + \Delta P},$$

где P_G – электрическая мощность, выдаваемая генератором, кВт;
 $\Delta P = \Delta P_C + \Delta P_L$ – потери в генераторе, состоящие из постоянных (магнитные, механические, добавочные потери) и нагрузочных (потери в обмотках и на возбуждение), кВт.

Данное обстоятельство, очевидно, приводит к дополнительному расходу топлива [3].

Как показано в работе [4], автономные СЭС технологических комплексов, включающие в себя многодвигательные электроприводы, могут быть обобщены укрупненной схемой, приведенной на рис. 1, причем указанная схема будет справедлива и для автономных СЭС поселений, сельскохозяйственных производств с той лишь разницей, что доля мощных приводов в суммарной мощности электроприемников для указанных объектов будет меньше, чем для промышленных

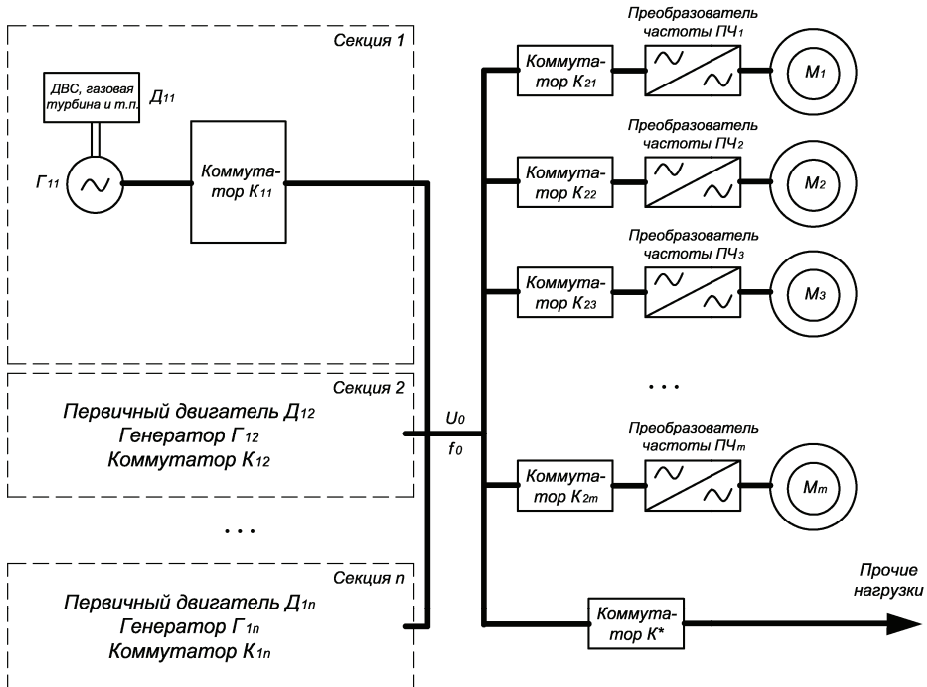


Рис. 1. Обобщенная структура автономной СЭС объекта, на котором используется многодвигательный электропривод

предприятий. В общем случае, традиционная автономная СЭС состоит из генераторов $\Gamma_{11} - \Gamma_{li}$, $i = \overline{1, n}$, которые приводятся во вращение первичными двигателями (обычно поршневыми, реже – газовыми турбинами) $D_{11} - D_{li}$, $i = \overline{1, n}$, при этом необходимое количество источников подключается коммутаторами $K_{11} - K_{li}$, $i = \overline{1, n}$ к общей шине, на которой присутствует переменное напряжение U_0 с частотой f_0 . К этой же шине через токопроводы (на укрупненной схеме не обозначены) подключаются и электроприемники, представленные мощными электроприводами технологического оборудования $M_1 - M_j$, $j = \overline{1, m}$, снабженными преобразователями частоты ПЧ₁ – ПЧ_{*j*}, $j = \overline{1, m}$ и подключаемыми через коммутаторы $K_{21} - K_{2j}$, $j = \overline{1, m}$, и прочие потребители электроэнергии промышленной частоты (электроосвещение, электрооборудование инженерных сетей и т.п.). В данном случае генераторы $\Gamma_{11} - \Gamma_{li}$ работают с коэффициентами загрузки, зависящими от графика нагрузки объекта. Однако, как было отмечено ранее, КПД генераторов тем выше, чем больше коэффициент их загрузки, поэтому при малых нагрузках удельный расход топлива увеличивается. Кроме того, в этих условиях существенно уменьшается ресурс первичного двигателя, поэтому производителями указывается минимально допустимая мощность на его валу, при достижении которой необходимо проведение мероприятий по ее искусственному поддержанию на допустимом уровне. Обычно средняя нагрузка автономной СЭС меньше номинальной ввиду того, что эти системы проектируются с запасом мощности (с целью покрытия пиков графика нагрузки, на перспективу), поэтому очевидно, что большую часть времени такая система работает в режиме повышенного расхода топлива. Ввиду того, что определяющим при работе автономной СЭС является критерий экономичности, введем величину удельного расхода топлива $P_{уд}$, которую определим как количество топлива, необходимое для выработки 1 кВт·ч электрической энергии

$$P_{уд} = \frac{Q}{W},$$

где Q – количество топлива, израсходованное на выработку W , кВт·ч, электрической энергии, м³.

В работе [4] для минимизации расхода топлива и, как следствие, повышения эксплуатационных характеристик автономной СЭС предлагается использовать систему с перестраиваемой структурой и звеном постоянного тока для суммирования мощности генераторов (рис. 2), которая обладает следующими преимуществами по сравнению со схемой, показанной на рис. 1:

- пониженным удельным расходом топлива $P_{уд}$ за счет исключения работы приводных двигателей и генераторов в неоптимальных режимах и, следовательно, повышения общего КПД системы;
- возможностью использования генераторов любых типов и номинальных мощностей, в том числе, совместно;
- не ставится задача стабилизации частоты вращения первичных двигателей $D_{11} - D_{li}$ ($i = \overline{1, n}$), более того, вариация этого параметра может быть использована для уменьшения расхода топлива;
- на порядок меньшим запасом по мощности, необходимым для надежной работы агрегатов;
- увеличением ресурса работы приводных двигателей благодаря исключению режимов, близких к холостому ходу.

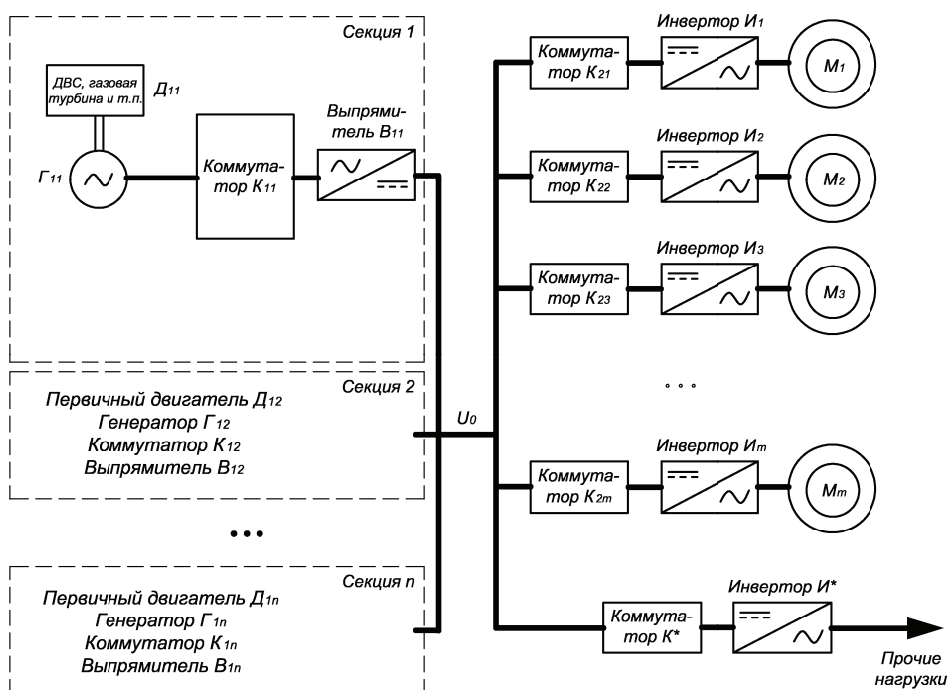


Рис. 2. Структура автономной СЭС с объединенным звеном постоянного тока

В данной работе предлагается система, которая не только наследует все преимущества автономной СЭС (см. рис. 2), но и дополнительно уменьшает удельный расход топлива $P_{уд}$ за счет применения в ее составе альтернативных источников энергии, что является определяющим при использовании подобной СЭС в местности, доставка топлива в которую затруднена.

Известно, что запасы альтернативных и возобновляемых энергоресурсов территорий, на которых сосредоточена основная масса потребителей, эксплуатирующих автономные СЭС или имеющих возможность их эксплуатировать, составляют значительную величину. При этом исследователями рассматриваются некоторые варианты их использования для выработки электрической энергии в автономных СЭС. Например, в работе [5] предлагается способ совместного использования ветроустановки с дизельным генератором. Однако эта система обладает существенным недостатком – наличием механической связи между генератором и первичными двигателями, выполненной на паре электромагнитных муфт, одна из которых, – муфта вязкого трения, работает в режиме скольжения, что является нерациональным, учитывая низкий КПД последней. Подобное решение служит для поддержания частоты вращения приводного вала на постоянном уровне для стабилизации выходного напряжения. Также замена механической связи на электрическую (рис. 3) позволяет устранить указанный выше недостаток и синтезировать новую систему, соединяющую в себе преимущества обеих, рассмотренных выше, и лишенную их основных недостатков. В схеме на рис. 3 генерирующие мощности объединены в унифицированные секции $1-i$, состоящие из блоков – первичный двигатель-генератор $D_{1i} - G_{1i}$, $i = \overline{1, n}$, и альтернативный источник-генератор $AI_{1i} - G_{2i}$, $i = \overline{1, n}$, подключенные через коммутаторы $K_{11} - K_{1i}$,

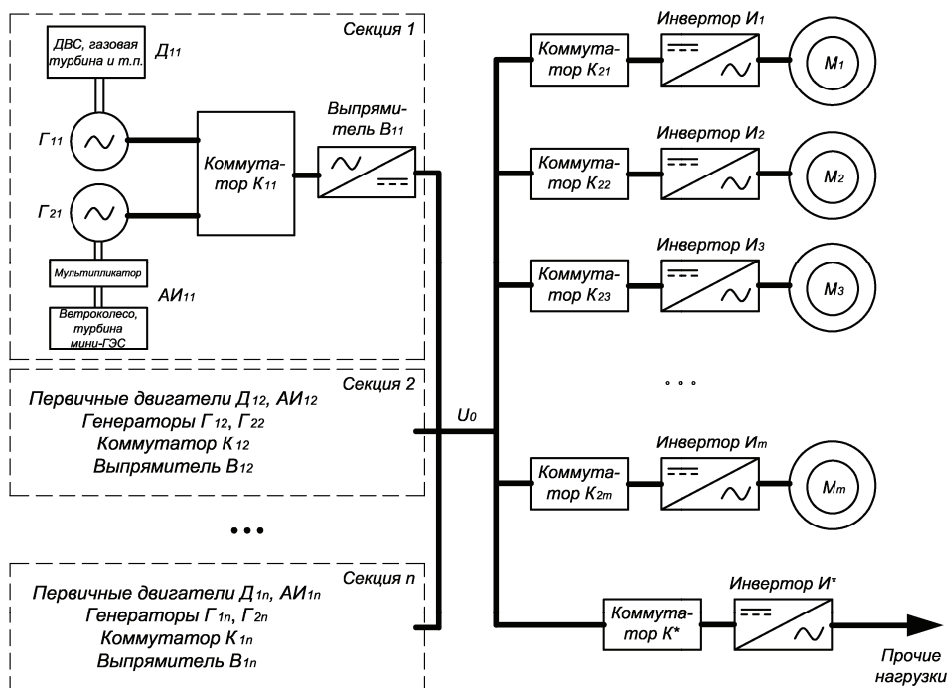


Рис. 3. Структура автономной СЭС с объединенным звеном постоянного тока с возможностью использования альтернативных источников энергии

$i = \overline{1, n}$ на секционные выпрямители $V_{11} - V_{1i}, i = \overline{1, n}$. Суммирование мощности, аналогично системе, показанной на рис. 2, происходит на звене постоянного тока, что позволяет предлагаемой автономной СЭС унаследовать ее преимущества, дополнительно снизив удельный расход топлива, который является важнейшим параметром автономных СЭС. При необходимости энергия постоянного тока преобразуется инверторами $I_1 - I_j, j = \overline{1, m}$, в энергию трехфазного переменного тока, причем для мощных потребителей преобразование происходит непосредственно на месте их установки, что дополнительно сокращает потери в распределительных сетях за счет отсутствия реактивной составляющей сопротивления и экономит кабельно-проводниковую продукцию из-за особенностей систем постоянного тока [6].

Функционирование синтезированной автономной СЭС может осуществляться под управлением автоматизированной системы управления (АСУ), которая содержит программы управления первичными двигателями, выпрямителями, коммутаторами и инверторами, а также выполняет функции защиты элементов системы от ненормальных режимов работы. Подобная АСУ может действовать, например, на основе принципов замещения или эквивалентности.

В то же время, как и для любой сетевой электротехнической системы (ЭТС), остаются открытыми вопросы связности и живучести синтезированной автономной СЭС, рассматриваемой наряду с проблематикой принятия решений по управлению потоками и распределению ресурсов между унифицированными секциями с наибольшей эффективностью, что является одной из основных задач системы управления. В качестве концептуального принципа, на базе которого будет происходить функционирование АСУ, в данном случае используется принцип заме-

шения, на котором основаны модели выбора ресурсов ЭТС [7]. Базовая модель, обеспечивающая оптимальный выбор и распределение ресурсов ЭТС в ситуациях, когда учитывается несколько критериев оптимизации, будет иметь следующий вид:

$$Q_d = (q_1(x), \dots, q_s(x)) \xrightarrow{d \in \Phi} \text{Opt};$$

$$\Phi : f_k(d) \leq 0, k = \overline{1, K};$$

$$d = d_{ij} (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}),$$

где Opt – оператор векторной оптимизации; Q_d – вектор частных критериев качества $q_\mu (\mu = \overline{1, s})$ ресурсного распределения; Φ – область допустимых решений.

При этом также вводится множество Парето, состоящее из элементов $d' \in \Phi$, называемых парето-оптимальными решениями, которое является оптимальным решением задачи. Для выбора же наиболее предпочтительного решения d'' необходимо получение дополнительной информации, которой располагает либо АСУ вследствие опроса датчиков для получения данных о состоянии системы, либо лица, принимающие решения (ЛПР) по функционированию системы. Однако базовая модель не способна служить для решения общей ресурсной задачи [7, с. 35], ибо не учитывает факт необходимости анализа функционирования ЭТС автоматизированной системой управления либо ЛПР. Поэтому для решения общей ресурсной задачи вводится так называемая общая математическая модель выбора и распределения ресурсов ЭТС, обеспечивающая эффективное управление синтезированной автономной СЭС в любых условиях (в том числе, в условиях замещения ресурсов или ресурсного конфликта, которые могут возникнуть в результате повреждения оборудования унифицированных секций, дефицита энергоресурсов и т.п.). С учетом вышесказанного, уточненная математическая модель представляется в следующем виде:

а) этап синтеза общего ресурсного процесса:

$$\bar{q} = \left[\bar{q}^c(d), \bar{q}^d(d, z) \right] \xrightarrow{d, z \in \Phi} \text{Opt};$$

$$\Phi = \Phi^c \cup \Phi^d \text{ и } \Phi^c \cap \Phi^d = \emptyset;$$

б) этап анализа общего ресурсного процесса:

$$\bar{q}^c(d) = \left[q_1^c(d), \dots, q_{s1}^c(d) \right] \xrightarrow{d, z \in \Phi^c} \text{Opt};$$

$$\Phi^c : f_{k1}^c(d) \leq 0, f_{k1}^c(d) \in F^c, k = \overline{1, K_1};$$

$$\Phi^- = \bigcup_{k1=1}^{K1} \Phi_{k1}^-; \bigcup_{k1=1}^{K1} \Phi_{k1}^- \neq \emptyset;$$

$$\bar{q}^d(d, z) = \left[q_1^d(d, z), \dots, q_{s1}^d(d, z) \right] \xrightarrow{z \in \Phi} \text{Opt};$$

$$\Phi^d : f_{k2}^d(d, z) \geq 0, f_{k2}^d(d, z) \in F, k = \overline{1, K_2};$$

$$d = \text{const}; d \in \Phi^c; \Phi^d = \bigcup_{k2=1}^{K2} \Phi_{k2}^d; \bigcup_{k2=1}^{K2} \Phi_{k2}^d \neq \emptyset.$$

В то же время, для построения процедур замещения ресурсов необходимо учесть вопрос, связанный с формированием классов замещения ресурсов (КЗР), то есть установлением связей между элементами множества ресурсов, которое может быть использовано при замещении одного ресурса другим, а также выявлением связанных между собой по совокупности своих свойств некоторыми соотношениями ресурсов [7, с. 51]. Это необходимо сделать таким образом, чтобы в результате операции по замещению одного ресурса другим полезность операции замещения не понижала эффективность функционирования ЭТС. В качестве примера можно рассмотреть замещение углеводородного топлива для одной из унифицированных секций синтезированной автономной СЭС совокупностью ресурсов $D(d)$, которая состоит из альтернативного источника энергии (например, ветроустановки), а также трудовых и материальных ресурсов, затраченных на его разработку, внедрение и эксплуатацию, при воздействии сигнала управления $U(u)$ от АСУ, который появляется на ее выходе в результате воздействия на нее некоторого внешнего возмущения либо их совокупности $V(v)$ (например, сигнала о достижении скоростью ветра некоторого эффективного значения V_3 и сигнала об изменении нагрузки согласно суточному графику до определенного уровня, на котором целесообразно произвести замещение при данном значении энергоотдачи альтернативного источника). Будем рассматривать КЗР как разбиение множества ресурсов, которое может быть использовано при замещении одного вида ресурса другим, на совокупность его подмножеств. Однако при таком подходе неизбежно возникнет проблема в получении классификации, содержащей как «хорошие», так и «посредственные» КЗР, то есть каждое выделенное подмножество допустимо рассматривать как потенциальный КЗР. Данная проблема может быть успешно решена структуризацией отношений и правил принятия решений на множествах ресурсов и их свойств, которая, применительно к рассматриваемому вопросу, состоит в определении некоторого подмножества взаимосвязанных ресурсов, которое по совокупности свойств и проявлений удовлетворяет достижению главной цели замещения – не допущению снижения эффективности функционирования ЭТС полезностью операции замещения. Логично предположить, что для структуризации множества КЗР естественным будет объединить все ресурсы автономной СЭС в две совокупности – первую, состоящую из S ресурсов и вторую, состоящую из N их свойств, рассматриваемых при замещении

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_s, \dots, d_S\}; \quad Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n, \dots, z_N\}.$$

Однако двух этих совокупностей недостаточно для классификации, поэтому вводится матрица реализаций N свойств на S ресурсах

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} & \dots & x_{1N} \\ x_{s1} & x_{s2} & \dots & x_{sn} & \dots & x_{sN} \\ x_{S1} & x_{S2} & \dots & x_{Sn} & \dots & x_{SN} \end{bmatrix},$$

где x_{sn} – реализация n -го свойства на s -м ресурсе.

Очевидно, что в структуре матрицы строки представляют из себя реализации N свойств на s -м ресурсе, в то время как столбцы – реализации S ресурсов на n -м свойстве. Данная матрица размещается в NS -мерном пространстве, образуя область анализа по замещению ресурса. Фактически, матрица описывает то, как влияет изменение совокупности ресурсов на совокупность их свойств, и наоборот, как влияет изменение совокупности свойств ресурсов на совокупность собственно

ресурсов в некоторой ЭТС. Для синтезированной автономной СЭС при замещении углеводородного топлива в одной из унифицированных секций можно сказать, что уменьшение доли традиционного источника изменяет такие свойства этого ресурса, как удельный расход, удельные затраты на приобретение, доставку и т.д. При этом параллельно изменяются свойства других ресурсов – например, трудовых и финансовых затрат на обслуживание ветроустановки. С учетом приведенных выражений в матричной форме, удобных для машинной обработки, АСУ может вычислить матрицу структурных связей свойств ресурсов и, используя структуры предпочтения ЛПР выбора классов замещения ресурсов [7, с. 74], ввести для синтезированной автономной СЭС модели формирования и выбора КЗР в различных ситуациях, что обеспечит не только снижение вероятности ошибочного принятия решений под влиянием человеческого фактора, но и сделает систему более экономичной и живучей в условиях внешних возмущений $V(v)$, вызванных неравномерностью суточного графика нагрузки и изменениями в ее структуре.

Таким образом, можно сделать вывод, что в районах, где сосредоточено достаточное количество альтернативных энергоресурсов, синтезированная в данной работе автономная СЭС (см. рис. 3) является более эффективной, чем системы, приведенные на рис. 1, 2, и система, синтезированная в [5]. Ее главными преимуществами являются: снижение удельного расхода топлива по сравнению со всеми рассмотренными автономными СЭС; увеличение ресурса работы приводных двигателей благодаря исключению режимов, близких к холостому ходу, и отключению агрегатов во время использования энергии автономного источника; повышение живучести, вызванное наиболее оптимальным распределением ресурсов и исключением ситуаций ресурсного конфликта. Кроме того, не следует забывать и о бесспорной экологической эффективности синтезированной автономной СЭС благодаря использованию альтернативных источников энергии, сокращающих количество вредных выбросов от традиционных источников по сравнению с системами, показанными на рис. 1, 2.

Список литературы

1. Белоусенко, И.В. Энергетика и электрификация газовых промыслов и месторождений / И.В. Белоусенко, Г.Р. Шварц, В.А. Шпилевой. – Тюмень : Тюмень, 2000. – 273 с.
2. Назарычев, А.Н. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей : централизованное и автономное электроснабжение объектов, цехов, промыслов, предприятий и промышленных комплексов / А.Н. Назарычев. – М. : ИНФРА-М, 2006. – 925 с.
3. Кацман, М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2003. – 469 с.
4. Перестраиваемая по структуре автономная система электроснабжения технологического комплекса с многодвигательным электроприводом / И.И. Артюхов [и др.] // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 1(10). – С. 20–28.
5. Никитенко, Г.В. Применение ветроэнергетической установки в системах автономного электроснабжения / Г.В. Никитенко, Е.В. Коноплев // Альтернатив. энергетика и экология. – 2007. – № 5(49). – С. 144–146.
6. Delea, F. Understanding Electric Power Systems: An Overview of the Technology and the Marketplace / F. Delea, J. Casazza. – Wiley-Interscience (IEEE Press), 2003. – 232 p.
7. Распределение ресурсов сетевых электротехнических систем/ К.А. Набатов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2008. – 240 с.

Autonomous System of Power Supply with Rearrangeable Structure Based on the Combined Use of Alternative and Traditional Energy Sources

D.Yu. Khokhlov, K.A. Nabatov

Department "Electrical Equipment and Automation", TSTU; ket@nnn.tstu.ru

Key words and phrases: autonomous power supply system; alternative energy sources; classes of resources replacement; computerized management system; DC link; environmental performance; engine life increase; principle of resources replacement; reduced fuel consumption; joint work of generators.

Abstract: We consider the general problems of synthesis of an autonomous power supply system with the ability to use alternative sources of energy, characterized in comparison with the existing analogues by reduced specific fuel consumption, longer life of primary engines and the possibility of joint work of generators of any type.

Autonomes auf der gemeinsamen Anwendung der alternativen und traditionellen Energiequelle basierte System der Energieversorgung mit der umbauenden Struktur

Zusammenfassung: Es werden die allgemeinen Fragen der Synthese des autonomen Systems der Energieversorgung mit der Möglichkeit der Benutzung der untraditionellen Energiequellen betrachtet. Im Vergleich mit den vorhandenen Analogien wird dieses System von dem gesenkten spezifischen Brennstoffverbrauch, der vergrößerten Lebensdauer der Primärmotoren und der Möglichkeit der gemeinsamen Arbeit der Generatoren des beliebigen Typus charakterisiert.

Système autonome de l'alimentation électrique avec une structure reconstruite, fondé sur une application commune des sources de l'énergie alternatives et traditionnelles

Résumé: Sont examinées les questions générales de la synthèse du système autonome de l'alimentation électrique avec une possibilité de l'utilisation des sources de l'énergie non traditionnelles qui en comparaison avec ses analogues existants sont caractérisées par un poids spécifique de la dépense du combustible diminué, par une augmentation du service des moteurs primaires et par une possibilité du fonctionnement commun des générateurs de n'importe quel type.

Авторы: *Хохлов Дмитрий Юрьевич* – аспирант кафедры «Электрооборудование и автоматизация»; *Набатов Константин Александрович* – кандидат технических наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Электрооборудование и автоматизация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Шувалов Анатолий Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Альтернативные источники энергии», ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт по использованию техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» Российской академии сельскохозяйственных наук, г. Тамбов.