

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

*В.О. Сайданов, д.т.н., профессор, ВИ(ИТ) ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулева
А.Б. Михайлин, к.т.н. доцент*

О.Л. Мартемьянов, к.т.н. доцент, зав. отд. НТЦ «Комплексное развитие инженерной инфраструктуры» в Санкт-Петербурге АО «Газпром Промгаз»

Рассмотрены вопросы обеспечения структурной надежности существующих и перспективных систем децентрализованного энергоснабжения специальных объектов. Акцентировано внимание на особенностях систем с альтернативными источниками энергии. Разработана оценочная вероятностная модель и приведены результаты расчетов надежности с учетом влияния и значимости элементов систем на эффективность функционирования. Показаны преимущества и перспективные направления совершенствования сложнокомбинированных систем энергоснабжения для обеспечения максимального значения коэффициента системной готовности при ограниченной безотказности элементов.

Системы децентрализованного энергоснабжения специальных объектов (далее по тексту статьи — системы энергоснабжения или СЭС) предназначены для производства, преобразования, накопления и распределения по потребителям электрической и тепловой энергии. По надежности снабжения энергией потребители энергии СЭС, как правило, относятся к первой группе. Причем в части надежности снабжения электрической энергией нередко предъявляются повышенные требования к потребителям, так называемой особой группы. СЭС являются сложными техническими системами, предполагающими длительную эксплуатацию с заданной надежностью, поэтому для парирования негативного влияния возможных неисправностей оборудования СЭС в них предусматривается структурно-функциональное резервирование, а также организация оперативного восстановительного ремонта. В этой связи актуальной задачей является оценка текущей надежности СЭС как на этапе эксплуатации, так и при проектировании ее структуры и выборе состава оборудования. По составу источников энергии, входящих в СЭС, а также по специфике связей между источниками и режимами их работы, обусловленными принятой технологией выработки электрической и тепловой энергии, СЭС такого рода можно условно отнести к одной из следующих трех групп [1], показанных на рис. 1.

В СЭС с отдельной выработкой энергии электроэнергетическая часть в простейшем случае состоит из резервного электроагрегата (ЭА) на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС), агрегатированного с синхронным электрическим генератором, и распределительного устройства (РУ) электрической энергии (P). Такая упрощенная структура показана на рис. 1, а. В современных СЭС электроэнергетическая часть, как правило, включает в свой состав несколько ЭА, подключенных к РУ. Тепловая часть СЭС состоит из котельной теплогенерирующей установки (ТГУ) на основе традиционного котельного оборудования, использующего, как и ЭА, углеводородное топливо (УТ), и распределительного теплового пункта (РТП), обеспечивающего потребителей тепловой энергией (Q).

Электротехническая и теплотехническая компоненты таких СЭС технологически изолированы

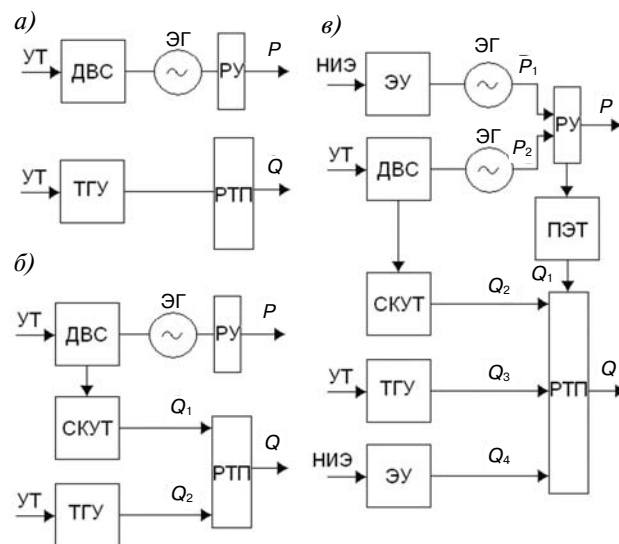


Рис. 1. Структурные схемы СЭС:

УТ — углеводородное топливо; ДВС — двигатель внутреннего сгорания; ЭГ — электрические генераторы ЭА и НИЭ; РУ — распределительное устройство; ТГУ — теплогенерирующая установка; РТП — распределительный тепловой пункт; P — электрическая энергия; Q , Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 — потоки тепловой энергии; СКУТ — система комплексной утилизации теплоты ДВС; НИЭ — нетрадиционный источник энергии; ЭУ — энергетическая установка, предназначенная для преобразования нетрадиционных видов энергии; ПЭТ — преобразователь электрической энергии в тепловую энергию

и связаны лишь опосредованно — через систему электроснабжения собственных нужд ТГУ. В штатном режиме работы котельная автоматика и насосное оборудование ТГУ, как правило, снабжаются электрической энергией от сетевых вводов, а электрическая энергия от РУ ЭА используется только при сетевой аварии или в специальном режиме принудительного отказа от сети в угрожаемый период. Для изолированных от сети СЭС, работающих в так называемом островном режиме, единственным первичным источником энергии является химическая энергия УТ, поэтому все электроснабжение, в том числе и для собственных нужд, осуществляется только от ЭА или системы ЭА.

Комбинированная СЭС (рис. 1, б) дополнительно к структуре системы на рис. 1, а включает в свой состав систему комплексной утилизации тепла (СКУТ), позволяющую использовать попутное (когенерационное) тепло Q_1 работающего под нагрузкой ДВС. В случае полной когенерации это тепло отработавших газов, рубашки охлаждения блока цилиндров, масляной системы и охладителя надувочного воздуха. В РТП комбинированной СЭС осуществляется суммирование попутного теплового потока Q_1 от ДВС с основным тепловым потоком Q_2 от ТГУ, что позволяет обеспечить существенно большую топливную экономичность таких СЭС по сравнению с СЭС первого типа. Комбинированные СЭС по этой причине являются перспективными. Специфической особенностью СКУТ является прямая зависимость когенерационного теплового потока Q_1 от величины электрической мощности P текущей нагрузки ДВС, поэтому такие системы целесообразны для применения только в автономных (не сетевых) СЭС.

С точки зрения структурной надежности представляется существенным, что в летний период при сравнительно малом потреблении тепла Q , в комбинированных СЭС появляется возможность для отключения от РТП всего оборудования ТГУ или, по крайней мере, большей его части. Это создает предпосылки для существенного повышения общесистемной надежности СЭС за счет экономии технического ресурса отключаемой части ТГУ и обеспечения благоприятных условий для проведения полноценных профилактических эксплуатационных мероприятий на отключенных частях системы в летний период.

Сложно-комбинированная (поливалентная [2]) СЭС (рис. 1, в) является развитием концепции системы второго типа. В ее состав дополнительно включены энергетические установки, использующие альтернативные (нетрадиционные) источники электрической и (или) тепловой энергии

от возобновляемых источников (НИЭ), особенности использования которых пояснены ниже.

Специфика и целесообразность использования НИЭ в составе СЭС зависят, в первую очередь, от таких климатических и ситуационных условий предполагаемого места установки, как средняя годовая скорость ветра и географическая широта места. Количество энергии, которое может быть получено от НИЭ в каждый конкретный момент времени (доступная мгновенная мощность), априори точно неизвестно. Понятно, что при использовании в качестве НИЭ солнечных фотоэлектрических панелей (ФЭП), ветровых генераторов и (или) солнечных тепловых коллекторов, их доступная мгновенная мощность будет в первую очередь зависеть от текущей скорости ветра и инсоляции. Именно поэтому доступное (ожидаемое) количество энергии от НИЭ при проектировании их установки может быть определено только на уровне вероятностных оценок, как правило, сезонных. В этой связи НИЭ в составе СЭС должны быть выбраны с разумным запасом и особым образом скомбинированы (гибридизированы) с традиционными источниками энергии — ЭА и ТГУ, текущая мощность которых детерминирована и может быть автоматически откорректирована в процессе работы в соответствии с текущей потребностью.

Большой определенностью в части прогнозной выработки электрической энергии характеризуются гидроэнергетические НИЭ. Однако и им присуща вариация выработки энергии, обусловленная сезонными колебаниями допустимого расхода воды через гидрогенераторы в зависимости от текущей гидрологической обстановки. В силу специфичности (уникальности) условий, предъявляемых к месту для их установки, массовое применение гидроэнергетических агрегатов специально для нужд военной инфраструктуры представляется маловероятным.

Для территориально удаленных систем, функционирующих изолированно от централизованных сетей электроснабжения, важными факторами являются стоимость и возможность обеспечения регулярной доставки УТ к месту дислокации СЭС. В этом случае экономическим критерием целесообразности использования того или иного вида НИЭ в конкретном проекте является ожидаемая доля УТ, предполагаемая к замещению с помощью НИЭ в процессе планируемой эксплуатации проектируемой СЭС.

Упомянутое замещение осуществляется, в первую очередь, за счет электрогенерирующих НИЭ, преимущественно фотоэлектрических панелей или ветровых генераторов, обеспечивающих выработку именно электрической энергии P_1 . Использовании таких НИЭ позволяет в ус-

ловиях сохранения общего электрического баланса P в СЭС снизить потребную текущую выработку P_2 от ЭА на основе ДВС. Реализация такой схемы при правильном проектировании и грамотной эксплуатации позволяет существенно (на половину или более) снизить потребление УТ традиционными электроагрегатами. Кроме того, в случае избыточной выработки электрической энергии P_1 электрогенерирующими НИЭ, эта избыточная часть может быть преобразована в тепловую энергию Q_1 с помощью соответствующих преобразователей (ПЭТ). Разновидностью ПЭТ, например, являются электрические водогрейные котлы или электрические воздушные калориферы. Ввиду того что нагревательные элементы не требовательны к форме синусоиды, частоте и другим параметрам качества электрической энергии, то упомянутая избыточная часть электрической энергии P_1 может быть снята непосредственно с силовой обмотки ветрового генератора или сборного щита фотоэлектрических панелей, т. е. до ее преобразования в инверторах в чистую синусоиду. Эта часть не вполне кондиционной электрической энергии может быть подключена в РУ к специальной так называемой вспомогательной шине [3]. Таким образом, обеспечивается возможность направления значительной части условно бесплатной возобновляемой энергии от НИЭ на цели обогрева, вместо того чтобы рассеивать ее впустую, например, на балластной нагрузке системы электродинамического торможения ветрового генератора.

Существенно, что, помимо повышения экономической эффективности СЭС, такое техническое решение позволяет увеличить структурную надежность тракта выработки тепловой энергии Q_1 , поскольку упомянутая выше вспомогательная шина [3] (даже в случае отказа электрической части ЭА, выпрямителя или инвертора) не отключается от ветрового генератора по соображениям его конструктивной безопасности. Наличие в структуре РУ вспомогательной шины позволяет использовать ее и для профилактической цели — при эксплуатации ДВС в составе ЭА с целью его дополнительной дозагрузки в полезном эксплуатационном режиме «прожигания», который на практике используется для исключения «коксования» распылителей форсунок.

Вторым направлением замещения УТ в СЭС третьего типа является непосредственная генерация потока тепловой энергии Q_4 с помощью солнечных коллекторов или тепловых насосов — как для обеспечения горячего водоснабжения, так и для нужд обогрева. Эта компонента замещения УТ в сильной степени зависит от климатических и ситуационных условий места установки. Солнечные коллекторы широко используются в

южных регионах в комплекте с тепловыми аккумуляторами. Оборудование этого класса НИЭ является относительно дешевым и надежным, однако его использование в средних широтах носит сезонный характер.

В области НИЭ электрогенерирующего типа предпочтительными являются фотоэлектрические панели. Современные исследования и практический опыт [4] проектирования и эксплуатации систем с НИЭ для Северных регионов (в том числе на 66° с.ш.) показали, что область целесообразного использования ФЭП могут быть и Арктические регионы. Зоной целесообразного использования ветровых генераторов являются области с высоким ветровым потенциалом (средней годовой скоростью ветра не менее 5 м/с), преимущественно в островных или прибрежных условиях. Эксплуатационная надежность ФЭП существенно выше, чем у ветровых генераторов. В случае эквивалентных по ожидаемой выработке условий более предпочтительными являются ФЭП.

Топология и алгоритмы функционирования сложнокомбинированных СЭС (рис. 1, в) позволяют в значительной мере компенсировать недостатки, присущие НИЭ, и использовать их достоинства в перспективных децентрализованных СЭС.

Сравнительная оценка структурной надежности вариантов СЭС, представленных на схемах рис. 1, может быть осуществлена с помощью известных методов [5].

Расчетные структурные схемы, разработанные на основе функционально-технологического анализа, показаны на рис. 2.

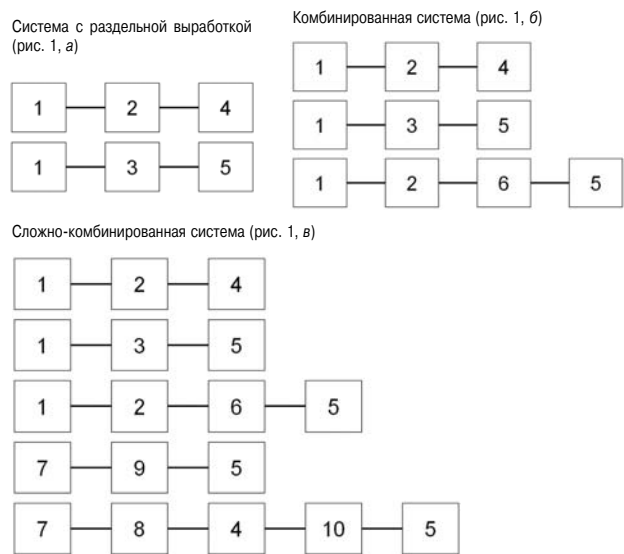


Рис. 2. Структурные схемы функциональных трактов: 1 — склад топлива; 2 — ЭА с ДВС; 3 — ТГУ; 4 — РУ; 5 — РТП; 6 — СКУТ; 7 — НИЭ; 8 — ЭУ, преобразующая НИЭ в электрическую энергию; 9 — ЭУ, преобразующая НИЭ в теплоту; 10 — ПЭТ

В основу структурной схемы положены последовательные цепи надежности следующих функциональных трактов:

1–2–4 — выработка электрической энергии за счет УТ;

1–3–5 — выработка тепловой энергии за счет УТ;

1–2–6–5 — выработка когенерационного тепла;

7–9–4 — выработка электрической энергии НИЭ;

7–9–5 — выработка тепловой энергии НИЭ;

7–8–4–10–5 — выработка тепла из избыточной электрической энергии НИЭ.

Опыт эксплуатации СЭС и результаты проведенных исследований показывают, что для оценки структурной надежности приведенных схем адекватным является допущение о стационарности потока отказов λ_i и восстановлений μ_i соответствующих элементов СЭС $i = 1, 2, \dots, 10$. На содержательном уровне это обусловлено тем, что рассматриваемые СЭС относятся к классу специальных систем постоянной готовности с длительным циклом функционирования. Плановый период штатной работы которых, после ввода в эксплуатацию и первичной приработки, составляет десятки лет. В этой связи в качестве комплексных показателей надежности элементов и подсистем (функциональных сборок на их основе) приняты именно стационарные значения коэффициентов готовности K_{gi} . Исходные параметры надежности типовых элементов СЭС и соответствующие им расчетные значения показателя надежности K_{gi} приведены в табл. 1.

Для предварительной оценки надежности [6] структур (рис. 2) вычислены значения коэффициента готовности частных подсистем — функцио-

Показатели надежности функциональных трактов

| Вариант структурной схемы СЭС (по рис. 1) | № строки по схеме рис. 2, вид энергии | Коэффициенты готовности частных подсистем K_{ge} |
|---------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Раздельная выработка, вариант (а) | 1, электроэнергия | 0,854 |
| | 2, теплота | 0,931 |
| Комбинированная система, вариант (б) | 1, электроэнергия | 0,854 |
| | 2, теплота | 0,931 |
| | 3, теплота | 0,853 |
| Сложно-комбинированная система, вариант (в) | 1, электроэнергия | 0,854 |
| | 2, теплота | 0,931 |
| | 3, теплота | 0,853 |
| | 4, теплота | 0,580 |
| | 5, электроэнергия и теплота | 0,572 |

нальных трактов K_{ge} . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Анализ вычисленных значений показателей надежности элементов (табл. 1) и функциональных трактов (табл. 2) показывает, что наиболее критичной в отношении надежности является функциональная сборка ЭА с ДВС. Именно поэтому разработка и производство надежных приводных двигателей для ЭА СЭС является наиболее актуальной задачей. В современных СЭС для обеспечения структурной надежности электроэнергетическая часть, как правило, состоит из нескольких ЭА, подключаемых к сборной шине РУ.

Из сопоставления данных таблицы предварительного расчета видно, что с позиции структурной надежности предпочтительной является сложно-комбинированная СЭС, позволяющая увеличить надежность функционального тракта выработки электрической энергии (строка 1 в таблице на рис. 2) за счет запараллеливания его с функциональным трактом НИЭ (строка 5).

Детальное исследование структурной надежности рассмотренных вариантов СЭС с учетом внутривидовых функциональных связей целесообразно провести на основе общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем (ОЛВМ) [7].

В соответствии с примененной методикой [7, 8] разработаны схемы функциональной целостности (СФЦ) вариантов СЭС и соответствующие им логические функции. Схемы и функции представлены на рис. 3.

На основе разработанных структур с помощью программного комплекса «АРБИТР» [7–9], реализующего процедуру автоматизированного структурно-логического моделирования (АСЛМ), получены и сведены в табл. 3 уточненные расчет-

Таблица 1

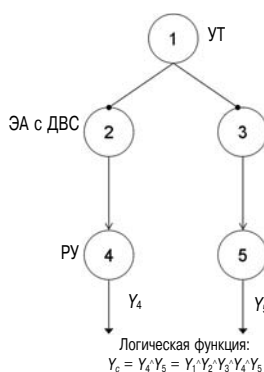
Расчетные значения показателя надежности K_{gi}

| № элемента | Обозначение (название) элемента | Параметры надежности элементов | | | Показатель надежности K_{gi} |
|------------|---------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|
| | | Интенсивность отказов $i, \text{ч}^{-1}$ | Среднее время восстановления $t_{bi}, \text{ч}$ | Интенсивность восстановления $i, \text{ч}^{-1}$ | |
| 1 | Топливный склад | 0,001 | 24 | 0,042 | 0,977 |
| 2 | ЭА с ДВС | 0,003 | 48 | 0,021 | 0,875 |
| 3 | ТГУ | 0,001 | 48 | 0,021 | 0,954 |
| 4 | РУ | 0,0001 | 12 | 0,083 | 0,999 |
| 5 | РТП | 0,0001 | 12 | 0,083 | 0,999 |
| 6 | СКУТ | 0,0001 | 6 | 0,167 | 0,999 |
| 7 | НИЭ | 0,01 | 72 | 0,014 | 0,583 |
| 8 | ЭУ с НИЭ (э) | 0,0003 | 48 | 0,021 | 0,986 |
| 9 | ЭУ с НИЭ (т) | 0,0001 | 48 | 0,021 | 0,995 |
| 10 | ПЭТ | 0,0003 | 12 | 0,083 | 0,996 |

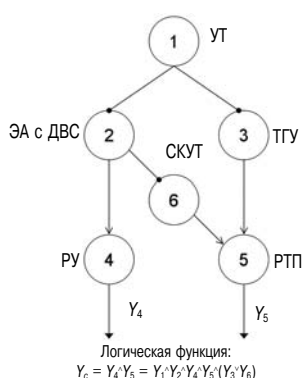
Уточненные расчетные значения системных показателей надежности $K_{гс}$

| Вариант схемы СЭС | Коэффициент готовности системы $K_{гс}$ |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Система с раздельной выработкой электроэнергии и теплоты (а) | 0,814 |
| Комбинированная система энергоснабжения (б) | 0,853 |
| Сложнокомбинированная система энергоснабжения (в) | 0,936 |

Система с раздельной выработкой (рис. 1, а), логическая функция работоспособности и структура



Комбинированная система (рис. 1, б), логическая функция работоспособности и структура



Сложнокомбинированная система (рис. 1, в), логическая функция работоспособности и структура

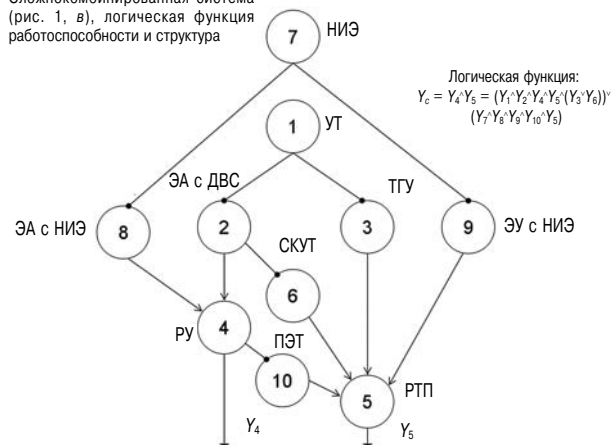


Рис. 3. Схемы функциональной целостности систем энергоснабжения и логические функции:

Функциональные события элементов $i = 1 \dots 10$:

1 — поступление углеводородного топлива (УТ); 2 — функционирование ЭА с ДВС; 3 — функционирование ТГУ; 4 — функционирование РУ; 5 — функционирование РТП; 6 — функционирование СКУТ; 7 — наличие нетрадиционной энергии НИЭ; 8 — функционирование ЭУ, преобразующих НИЭ в электрическую энергию; 9 — функционирование ЭУ, преобразующих НИЭ в теплоту; 10 — функционирование ПЭТ

Выходные функции СЭС:

Y_i — выходные функции, $i = 1 \dots 10$, элементов СЭС; Y_4 — выходная функция системы энергоснабжения по электро-энергии; Y_5 — выходная функции системы энергоснабжения по теплу

ные значения системных показателей надежности $K_{гс}$ для рассматриваемых вариантов СЭС.

Анализ вычисленных значений $K_{гс}$ показывает, что в рассмотренных вариантах СЭС имеет место тенденция повышения коэффициента готовности $K_{гс}$ комбинированной и сложнокомбинированных систем по сравнению с системой раздельной выработки, несмотря на усложнение структур этих схем (введение в состав дополнительных элементов и связей). Увеличение надежности систем по выбранному показателю связано с введением резервирования обусловленного дополнительной функциональной избыточностью схем комбинированной и сложно-

комбинированной систем. Так, ключевые функциональные элементы тракта выработки тепловой энергии (ТГУ и РТП) в комбинированной системе (б) резервируются комплексной системой утилизации тепла, обуславливая, таким образом, существенное возрастание надежности (по показателю готовности) всей теплогенерирующей части такой СЭС. В сложнокомбинированной системе (в) глубина функционального резервирования еще выше за счет включения НИЭ в ее структуру. Это фактически означает резервирование не только теплового и электрического трактов, но и самих первичных источников энергии.

Существенным дополнением к общепризнанным методам оценки надежности структурно-сложных систем в ОЛВМ является определение величин значимости Z_i основных функциональных элементов.

Величины значимости Z_i позволяют количественно оценить, какую роль играет надежность отдельных элементов в реализации надежности всей системы в целом, а также выделить в системе наиболее уязвимые и ненадежные элементы, что позволяет в контексте решаемой задачи обеспечить целенаправленный синтез СЭС и оценить синергетическое влияние упомянутого выше комбинирования функциональных сборок.

Гистограммы по результатам расчета Z_i для схем (рис. 3) представлены на рисунках 4а–4в.

Из их анализа следует следующее.

1. Для системы с раздельной выработкой электрической энергии и теплоты наиболее критичными элементами являются ЭА с ДВС. Критичность ТГУ в системе существенно меньше в силу ее большей по сравнению с ЭА с ДВС надежности. Разброс по значениям Z_i по отношению к другим элементам значительный, что в данном случае, с учетом низкого значения системного коэффициента готовности ($K_{гс} = 0,814$), свидетельствует о нерациональности такой структуры СЭС и необходимости ее совершенствования.

2. Для системы с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии и теплоты наиболее критичными элементами остаются ЭА

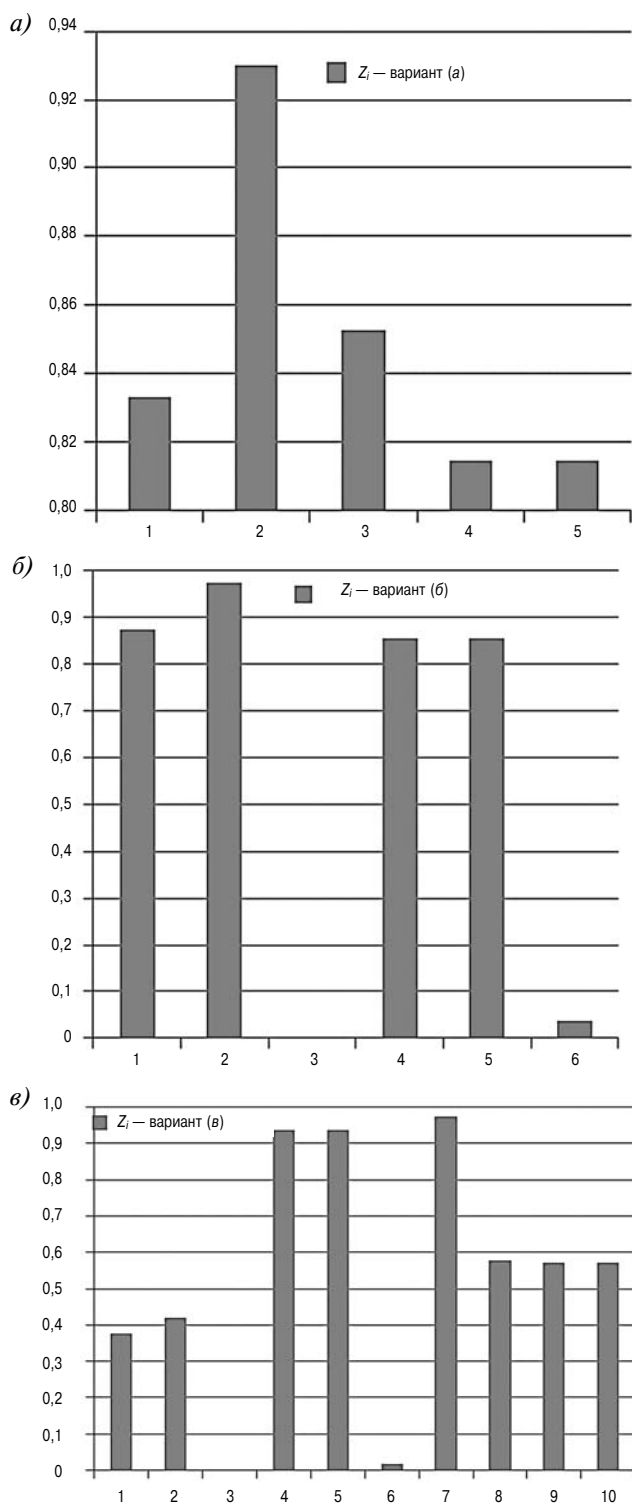


Рис. 4. Величины значимости элементов:

а — для системы с отдельной выработкой энергии; *б* — для сложнокомбинированной системы выработки энергии; *в* — для комбинированной системы выработки энергии

с ДВС. ТГУ в данной схеме не критична за счет наличия КСУТ, которая интегрирована в резервированную тепловую схему. В данной комбинированной схеме (см. рис. 3) очевидна критичность топливной системы в силу того, что

УТ в данном случае является единственным источником энергии. Значение системного коэффициента готовности ($K_{гс} = 0,853$) здесь выше, чем у схемы (*а*). Данная схема является компромиссной. Может быть вполне приемлемой и перспективной при увеличении надежности функционального тракта ЭА с ДВС.

3. Для сложнокомбинированной СЭС критичными являются надежность поступления энергии от НИЭ (элемент 7) и, вполне ожидаемо, «суммирующие» энергию элементы: РУ и РТП (элементы 4 и 5). Значение системного коэффициента готовности ($K_{гс} = 0,936$), характерного для такой СЭС, существенно выше, чем при использовании схем (*а*) или (*б*). Причиной этого является полное резервирование как теплового, так и электрического трактов. Схема СЭС сложнокомбинированного типа наиболее перспективна. Особенность заключается в том, что увеличение надежности НИЭ (элемента 7 схемы) осуществляется не обычными инженерными методами, а за счет тщательного учета природно-климатических условий применения альтернативных источников энергии.

Таким образом, выполненная сравнительная оценка вероятностных характеристик функциональной надежности вариантов построения СЭС позволяет рекомендовать к использованию в качестве базовой для специальных объектов общего назначения схему сложно-комбинированной системы.

Литература

1. Сайданов В.О., Смолинский С.Н., Булат Р.Е. Концепция децентрализованного энергоснабжения объектов МО РФ и проблемы подготовки военных инженеров-энергетиков // Двигателестроение. 2015. № 2(260). С. 28–32.
2. Аверьянов В.К. Поливалентные системы зданий. Энергетический баланс и оценка эффективности использования топлива / В.К. Аверьянов, А.И. Тютюнников // Теплоэнергоэффективные технологии. 2002. № 1. С. 6–10.
3. Михайлин А.Б. Гибридная система электроснабжения на мысе Сеть-Наволоок // Академия энергетики. СПб., 2010. № 5(37). С. 46–56.
4. Михайлин А.Б., Астахов А.В. Комбинированные системы электроснабжения. Опыт эксплуатации, вопросы импортозамещения и удаленного мониторинга / Материалы XVII международной конференции. Состояние развития энергетики связи «СПРЭС-2016». С. 7–14.
5. Надежность и эффективность в технике. Справочник в десяти томах. Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Машиностроение, 1987 Т. 2. 280 с.
6. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных схем. СПб.: Политехника, 2000. 247 с.
7. Можжев А.С., Громов В.Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем. СПб.: ВИТУ. 2000. 145 с.
8. Можжев А.С., Алексеев А.О., Громов В.Н. Автоматизированное логико-вероятностное моделирование технических систем. Руководство пользователя ПК АСМ, версия 5.0. СПб.: ВИТУ, 1999. 63 с.
9. ПК АРБИТР разработан с использованием среды программирования Borland Delphi Professional, Version 7.0 (Build 4.453), Copyright © 1983-2002, Borland Software Corporation, Registration Key: 9617613.