

УДК 621.311.6

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю.А. Шиняков

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: Shua@main.tusur.ru

Рассмотрены структурные схемы систем электроснабжения автоматических космических аппаратов. Проведен их сравнительный энергетический анализ. Обоснована целесообразность использования на объектах с изменяющимися условиями эксплуатации и резко-переменными графиками нагрузки универсальной параллельно-последовательной структуры системы электроснабжения, обеспечивающей возможность экстремального регулирования мощности солнечной батареи и имеющей лучшие энергетические показатели.

Одной из важнейших бортовых систем автоматических космических аппаратов (КА) является система электроснабжения (СЭС), которая представляет собой совокупность первичных и вторичных источников тока, аппаратуры преобразования энергии и стабилизации выходного напряжения с необходимой автоматикой контроля и управления. В качестве первичных источников энергии наибольшее применение находят солнечные батареи (СБ), а в качестве накопителей энергии для питания бортовых потребителей энергии на теневых участках орбиты и при пиковых нагрузках обычно используются аккумуляторные батареи (АБ).

Аппаратура регулирования и контроля (АРК), включающая в свой состав как требуемый набор энергопреобразующих устройств, так и необходимые устройства контроля параметров СЭС, согласовывает работу СБ, АБ и нагрузки. При изменении освещенности СБ и деградации характеристик СБ и АБ она обеспечивает заданное качество выходного напряжения в установившихся и переходных режимах, реализацию оптимальных алгоритмов управления режимами заряда-разряда АБ и оптимальное использование СБ.

Основные базовые структурные схемы СЭС, нашедшие широкое применение при разработке и создании автоматических КА, представлены на рис. 1 и 2 [1].

На начальном этапе развития космической техники наибольшее распространение получила надежная структура СЭС с общими силовыми шинами первичного источника питания, накопителя энергии и нагрузки (рис. 1, а). В такой системе напряжение на СБ и на выходной шине питания нагрузки (Н) определяется напряжением АБ, что приводит к невозможности оптимизации режима работы СБ при изменении условий ее эксплуатации и значительной нестабильности выходного напряжения СЭС. Ограничение диапазона изменения напряжения АБ с целью повышения стабильности напряжения питания бортовых потребителей ухудшает энергетические характеристики АБ, увеличивает частоту циклирования и уменьшает ее ресурс.

Усложнение и увеличение числа задач, решаемых автоматическими КА непосредственно в космосе, потребовали применения новых подходов к проектированию бортовых систем и предопределили переход к использованию централизованных СЭС с отдельными силовыми шинами СБ-АБ-Н (рис. 1, б, в, рис. 2), позволяющих согласовывать режимы источников энергии с нагрузкой и тем самым существенно повысить энергетическую эффективность, понизить массу СЭС и увеличить ресурс КА [2]. В СЭС дополнительно введены зарядные устройства (ЗУ), разрядные устройства (РУ) и регуляторы напряжений (РН), принципы постро-

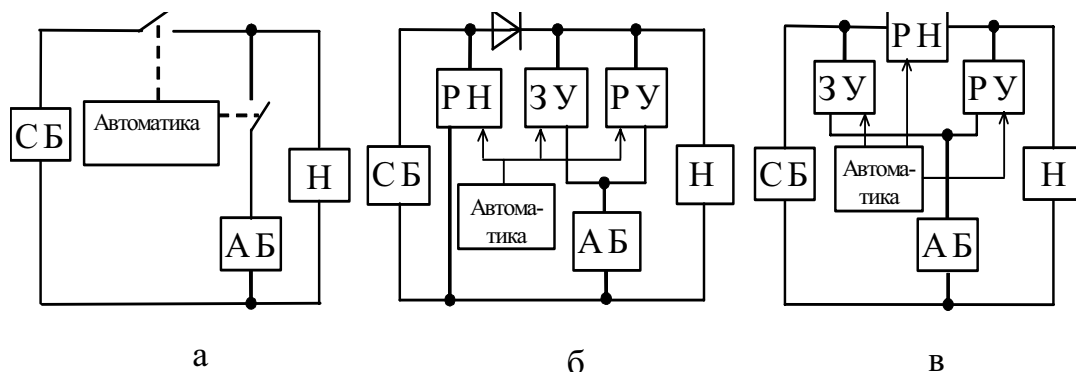


Рис. 1. Структурные схемы СЭС: а) с общими силовыми шинами, б) параллельная, в) параллельно-последовательная

ения которых в СЭС, выполненных по всем названным структурам, имеют много общего.

Недостатком СЭС параллельной структуры (ПАС) является «жесткая» связь в одном направлении (через диод) шин СБ и нагрузки (Н), что резко снижает управляемость системы, так как не позволяет регулировать напряжение СБ в оптимальной рабочей точке при изменении условий эксплуатации (температура, освещенность и т. д.).

В СЭС параллельно-последовательной структуры (ППС) шины источников энергии и нагрузки разделены между собой преобразующими устройствами (ЗУ, РУ, РН). Это дает возможность перераспределения потоков энергии в СЭС по любому алгоритму и закону. Система электроснабжения становится управляемой полностью. Потери на последовательном ключе регулятора напряжения РН компенсируются возможностью коммутации отдельных секций СБ непосредственно к шине питания нагрузки и применением экстремального регулирования мощности СБ [3, 4].

В СЭС выполненной по последовательной структуре (ПС) (рис. 2, а) передача энергии от СБ в нагрузку всегда осуществляется через два преобразующих устройства (ЗУ и РУ), поэтому ее использование ограничено и возможно только на КА с резкопеременными графиками нагрузки и значительными теневыми участками, то есть, только на объектах, на которых большая часть энергии должна сначала запасаться в АБ, а затем передаваться в нагрузку.

На рис. 2, б, представлена схема СЭС с подключением ЗУ и РУ к входной шине СБ, которую можно классифицировать как производную параллельно-последовательной структуры (рис. 1, в). Отличие заключается в том, что выход РУ подключен к шине СБ. Такое переключение выхода РУ с шины питания нагрузки на шину СБ ведет к увеличению потерь энергии в СЭС, т. к. передача энергии от АБ в нагрузку осуществляется через два последовательно соединенных устройства – РУ и РН. Однако при этом обеспечиваются более качественные параметры электропитания, поскольку только один регулятор РН стабилизирует выходное напряжение. Стабилизатор напряжения СН обеспечивает электропитание дополнительной нагрузки Н2 малой

мощности с другим уровнем напряжения. Количество дополнительных стабилизаторов напряжения СН и шин питания бортовых потребителей с уровнем напряжения, отличающимся от значения основной стабилизированной шины питания нагрузки Н1, может быть произвольным.

Представленные упрощенные структурные схемы являются базовыми, которые значительно уточняются при разработке структурно-функциональных схем АРК и проведении энергетического расчета СЭС. При этом уточняется требуемое количество АБ и секций СБ, конфигурация АРК, учитывается целый ряд специфических требований конкретного КА, обусловленных его функциональным назначением, конструктивным исполнением, условиями терморегулирования и т. д.

Одним из важнейших показателей любой автономной энергетической системы является ее энергетическая эффективность, поэтому представляет практический интерес проведение сопоставительного анализа энергетической эффективности базовых структур СЭС автоматических КА, с целью определения областей их рационального применения.

Энергетическая эффективность СЭС (K_3) аналитически выражается отношением разности между энергией, выработанной первичным источником (W_{CB}) при принятом в системе законе регулирования мощности СБ, и потерями энергии в преобразующих устройствах АРК (ΔW_{Π}) и АБ (ΔW_{AB}) к энергии, которую может выработать СБ при непрерывном регулировании в точке максимальной мощности ($W_{CB\max}$)

$$K_3 = (W_{CB} - \Delta W_{\Pi} - \Delta W_{AB}) / W_{CB\max} = W_{\Pi} / W_{CB\max} = \int_0^T P_{\Pi} dt / \int_0^T P_{CB\max} dt, \quad (1)$$

где W_{Π} – энергия, доставляемая в нагрузку; $P_{CB\max}$ – экстремальное текущее значение мощности СБ; P_{Π} – текущее значение мощности нагрузки; T – период функционирования СЭС [1].

Выражение (1) можно преобразовать к виду

$$K_3 = W_{CB} / W_{CB\max} - (\Delta W_{\Pi} + \Delta W_{AB}) / W_{CB\max} = K_{T\text{СБ}} - K_{\Pi\text{СЭС}}. \quad (2)$$

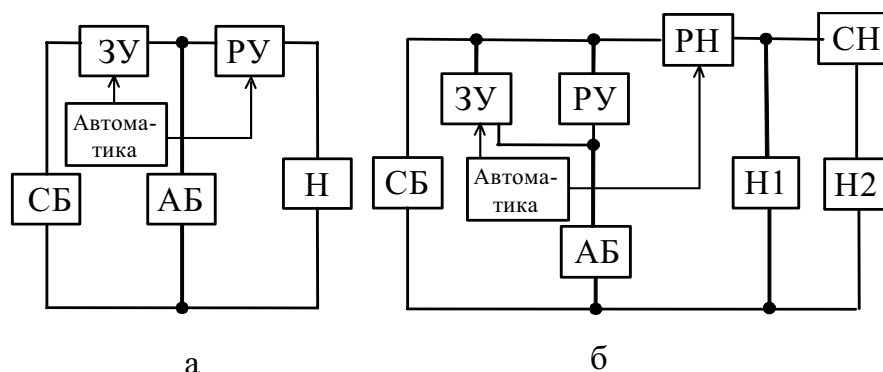


Рис. 2. Структурные схемы СЭС: а) с последовательным соединением ЗУ и РУ, б) с подключением ЗУ и РУ к шине СБ

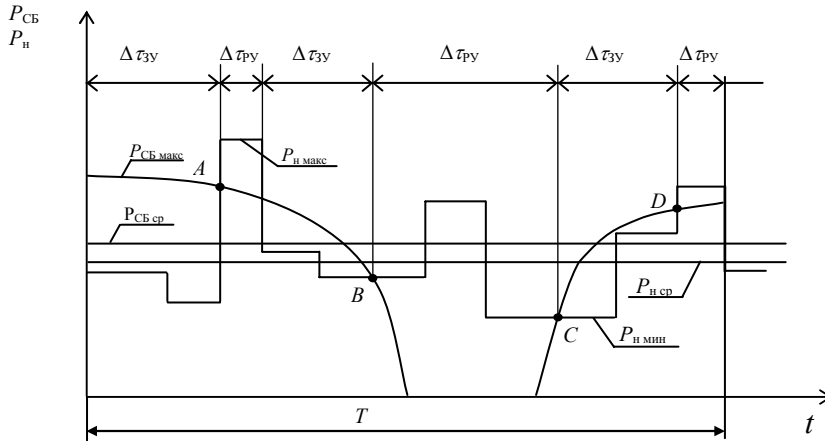


Рис. 3. Циклограмма нагрузки и график мощности СБ

Коэффициент $K_{СБ}$ характеризует эффективность использования первичного источника (точность поддержания экстремума мощности СБ), а $K_{ПЭС}$ – уровень потерь энергии в СЭС. В системе с экстремальным регулированием мощности СБ $K_{СБ} \rightarrow 1$ ($K_3 \rightarrow 1 - K_{ПЭС}$).

Из (2) следует, что повышение энергетической эффективности СЭС может достигаться двумя путями – максимально возможным отбором энергии от СБ и снижением потерь энергии в АБ, регулирующих и коммутирующих устройствах АРК.

Эффективность преобразования энергии может быть повышена увеличением КПД регулирующей аппаратуры и улучшением эксплуатационных энергетических характеристик АБ.

Наиболее действенным способом повышения эффективности преобразования энергии в СЭС является определение и выбор оптимальной структуры, обеспечивающей при детерминированных циклограммах ориентации объекта и мощности нагрузки максимально возможное использование по мощности СБ и минимальные потери энергии в АБ, силовых преобразующих и коммутирующих устройствах АРК.

Из анализа произвольной циклограммы нагрузки и графика мощности СБ (рис. 3) аналитические уравнения энергобаланса для базовых структур (параллельной, параллельно-последовательной с ЭРМ СБ и последовательной с ЭРМ СБ) имеют вид:

$$W_{СБ}^{ПлС} = \int_0^T P_{СБ} dt = \int_0^T P_{н} dt / \eta_{РН} + ((1 - \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}) / \eta_{РН} \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}) \times \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{РУ_i}} (P_{н} - P_{СБ} \eta_{РН}) dt, \quad (3)$$

$$W_{СБ \text{ ЭРМ}}^{ПлС} = \int_0^T P_{СБ \text{ макс}} dt = \int_0^T P_{н} dt / \eta_{РН} + ((\eta_{РН} - \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}) / \eta_{РН} \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}) \times \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{РУ_i}} (P_{н} - P_{СБ \text{ макс}} \eta_{РН}) dt, \quad (4)$$

$$W_{СБ \text{ ЭРМ}}^{ПлС} = \int_0^T P_{СБ \text{ макс}} dt = \int_0^T P_{н} dt / \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} + ((1 - \eta_{АБ}) / \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}) \times \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{РУ_i}} (P_{н} - P_{СБ \text{ макс}} \eta_{РН}) dt, \quad (5)$$

где $P_{СБ}$ – текущее значение мощности; $\eta_{РН} \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}$ – КПД силовых устройств АРК и коэффициент отдачи АБ; $\Delta \tau_{РУ_i}$ – время работы РУ при пиковых нагрузках и в периоды затенения СБ.

Из (1), (4) и (5) получаем выражения коэффициентов энергетической эффективности СЭС с последовательным РН и ЭРМ СБ, а также последовательной структуры СЭС с ЭРМ СБ

$$K_{Э \text{ ЭРМ}}^{ПлС} = \eta_{РН} / (1 + ((\eta_{РН} - \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}) / \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ} \eta_{РН})) \times \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{РУ_i}} (P_{н} - P_{СБ \text{ макс}} \eta_{РН}) dt / \int_0^T P_{н} dt, \quad (6)$$

$$K_{Э \text{ ЭРМ}}^{ПлС} = \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} / (1 + ((1 - \eta_{АБ}) / \eta_{АБ})) \times \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{РУ_i}} (P_{н} - P_{СБ \text{ макс}} \eta_{РН}) dt / \int_0^T P_{н} dt. \quad (7)$$

Учитывая, что эффективность использования режима экстремального регулирования равна

$$K_{Т СБ} = W_{СБ} / W_{СБ \text{ макс}} = \int_0^T P_{СБ} dt / \int_0^T P_{СБ \text{ макс}} dt,$$

коэффициент энергетической эффективности СЭС с параллельным РН с учетом (1) и (3) имеет вид:

$$K_3^{ПлС} = K_{Т СБ} \eta_{РН} / (1 + ((1 - \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ}) / \eta_{ЗУ} \eta_{РУ} \eta_{АБ} \eta_{РН})) \times \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{РУ_i}} (P_{н} - P_{СБ} \eta_{РН}) dt / \int_0^T P_{н} dt. \quad (8)$$

Аналитические уравнения энергобаланса последовательной и параллельно-последовательной структуры без режимов ЭРМ СБ ($W_{СБ}^{ПлС}$, $W_{СБ}^{ПлС}$) имеют вид, аналогичный выражениям (5) и (4) при условии замены $P_{СБ \text{ макс}}$ на $P_{СБ}$, а уравнения коэффициентов энергетической эффективности ($K_3^{ПлС}$, $K_3^{ПлС}$) кро-

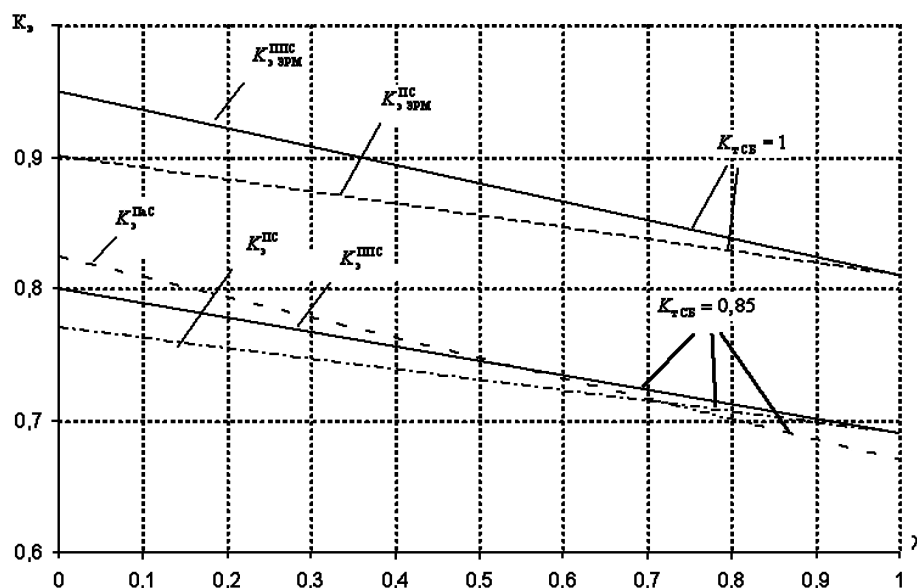


Рис. 4. Зависимости коэффициентов энергетической эффективности от λ и $K_{\tau CB}$

ме этого должны быть умножены на коэффициент эффективности использования СБ ($K_{\tau CB}$).

Из анализа выражений (6–8) следует, что энергетическая эффективность СЭС зависит от значений КПД устройств РН, ЗУ, РУ ($\eta_{РН}$, $\eta_{ЗУ}$, $\eta_{РУ}$), значения коэффициента отдачи АБ по энергии ($\eta_{АБ}$), точности регулирования экстремума мощности СБ ($K_{\tau CB}$) и степени совпадения графиков мощности СБ и нагрузки, которая характеризуется долей энергии (λ), передаваемой в нагрузку по цепи ЗУ-АБ-РУ:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta \tau_{PY_i}} (P_{\text{н}} - P_{\text{СБ}} \eta_{\text{РН}}) dt / \int_0^T P_{\text{н}} dt.$$

На рис. 4 представлены графики зависимости коэффициентов энергетической эффективности всех трех базовых структур (ППС, ПАС, ПС) в зависимости от значений λ и точности регулирования экстремума мощности СБ ($K_{\tau CB}$). Графики составлены при условии, что $K_{\tau CB}$ систем без ЭРМ СБ равен 0,85 (значение задано произвольно), коэффициенты полезного действия ЗУ, РУ, а также коэффициенты отдачи АБ по энергии всех систем имеют одинаковые значения ($\eta_{ЗУ}=0,95$, $\eta_{РУ}=0,95$, $\eta_{АБ}=0,9$), а коэффициенты полезного действия устройств РН различаются ($\eta_{РН}^{ППС}=0,95$, $\eta_{РН}^{ПАС}=0,97$). При условии увеличения или уменьшения $K_{\tau CB}$ зависимости коэффициентов энер-

гетической эффективности всех базовых структур без реализации режима ЭРМ СБ ($K_{\tau}^{ПС}$, $K_{\tau}^{ППС}$, $K_{\tau}^{ПАС}$) пропорционально повышаются или понижаются.

Из анализа графиков следует, что применение структуры СЭС с параллельным РН целесообразно только при передаче малой доли энергии в нагрузку через АБ ($\lambda < 0,4$) и высоком значении коэффициента эффективности использования СБ ($K_{\tau CB} \rightarrow 1$). Значительные преимущества имеют структуры обеспечивающие возможность реализации режима ЭРМ СБ, т. к. сложно предположить, что в системе с параллельным РН, без активного поиска экстремума мощности СБ, возможно достижение эффективности использования первичного источника более 0,90...0,95.

Целесообразность использования параллельного или последовательного РН определяется спецификой назначения объекта, его условиями эксплуатации, а также соотношением параметров циклограмм энергопотребления и графика изменения мощности СБ. На объектах с изменяющимися условиями эксплуатации и резко-переменными графиками нагрузки ($\lambda > 0,4$) предпочтительнее использование универсальной параллельно-последовательной структуры автономной СЭС, обеспечивающей возможность экстремального регулирования мощности СБ и имеющей лучшие энергетические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. — Новосибирск: Наука, 1994. — 318 с.
2. Шиняков Ю.А. Эффективность использования солнечных батарей в автономных системах электроснабжения // Проблемы комплексного проектирования и испытаний энергетических устройств космических аппаратов. — Куйбышев, 1986. — Вып. 3.4.1. — С. 58–59.
3. Чернышев А.И., Шиняков Ю.А., Гордеев К.Г. Экстремальный регулятор мощности для автономных систем электроснабжения // VIII Всес. конф. по космической технике: Материалы. — Куйбышев, 1983. — С. 45–52.
4. Пат. 2101831 РФ. МКИ⁶ H02J 7/35. Система электропитания с экстремальным регулированием мощности фотоэлектрической батареи / К.Г. Гордеев, С.П. Черданцев, Ю.А. Шиняков. Изобретения. — 1998. — № 1.