

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛЕВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Асанин А. В.¹, Иванов В. Г.², Иванишко А. Н.³

DOI:10.21681/3034-4050-2026-1-78-87

Ключевые слова: эффективность системы, критерии системы, напряжение, мощность, часовой расход.

Аннотация

Цель работы: обоснование критериев эффективности полевой системы электроснабжения специального назначения.

Метод исследования: методологическую основу исследования составила общая теория систем с использованием методов системного анализа. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок задач, адекватностью применяемых методов исследования решаемым задачам и непротиворечивостью полученных результатов данным предшествующих исследований, согласованностью полученных теоретических оценок с результатами аналитических расчетов.

Результаты исследования: выбраны и обоснованы критерии эффективности полевой системы электроснабжения. В качестве экономического критерия эффективности системы принят часовой расход топлива, критерий технической эффективности оценивается суммой объемов и масс элементов полевой системы электроснабжения. За комплексный (обобщенный) технико-экономический критерий принято время непрерывной работы. Данный критерий позволяет оценить экономический и технический уровень устройств полевой системы электроснабжения, сопоставить их с функциональными возможностями и определить их целесообразный предел совершенствования.

Научная новизна: заключается в разработке обоснованных критериев эффективности полевой системы электроснабжения специального назначения с учетом ее применения для электроснабжения полевых средств связи военного назначения.

Введение

Система электроснабжения является неотъемлемой и составной частью подвижных объектов связи [1] (рис. 1), и является подсистемой более высокой по иерархии системы, поэтому исследования эффективности полевой системы электроснабжения (ПСЭС) должны проводиться на основе системного анализа. Для этого необходимо выбрать и обосновать критерии эффективности, которые формализуются на основе технико-экономических показателей типовых средств электроснабжения и источников вторичного электропитания (ИВЭП).

При всех возможных обстоятельствах выбора критерия он должен удовлетворять вполне определенным требованиям:

- отражать основное назначение системы и соответствовать цели исследования;

- количественно измерять эффективность системы;
- быть критичным к параметрам системы;
- должен быть наглядным и по возможности просто определяемым;
- иметь, по возможности, четкий физический смысл.

Принципиально важным в методологическом плане является учет принадлежности ПСЭС конкретному подвижному объекту связи. Это положение вытекает из основного принципа системного анализа, состоящего в том, что эффективность того или иного технического средства может рассматриваться лишь в определенной среде, под которой понимаются условия применения, предъявляемые требования и накладываемые ограничения [1, 2]. Это означает, что при выборе критериев эффективности ПСЭС необходимо

¹ Асанин Антон Викторович, кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлова», г. Химки, Россия. E-mail: asanin-anton@mail.ru

² Иванов Василий Геннадьевич, доктор военных наук, доцент, профессор кафедры информатики и вычислительной техники, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлова» г. Химки, Россия. E-mail: wasj2006@yandex.ru

³ Иванишко Александр Николаевич, начальник группы главного управления связи Вооруженных Сил Российской Федерации, г. Москва, Россия. E-mail: GUS_1@mail.ru



Рис. 1. Функциональные элементы системы электроснабжения специального назначения

вводить в них параметры, характеризующие условия применения подвижных объектов связи по назначению.

Основная часть

Система преобразования энергии и ее составные элементы в частности двигатели внутреннего сгорания (ДВС), электроагрегаты (ЭГ), кабельное распределительное оборудование (КРО) и ИВЭП аппаратуры связи оцениваются множеством показателей. При этом в соответствии с принципом однозначности, сформулированным в [1,2], критерий эффективности должен быть представлен в виде одного показателя, зависящего от всех необходимых параметров. Вместе с тем, следуя методологическим основам исследования эффективности ПСЭС, необходимо выделить такие показатели или группу показателей, которые отвечали бы исследованиям эффективности ПСЭС. При этом значения эффективности определяются не только показателями самой ПСЭС, но и показателями применения средств связи.

Функционирование ПСЭС связано с расходом топлива [3] на выработку полезной энергии для аппаратуры связи (АС) и технических

средств обеспечения обитаемости (ТСОО), на тепловые потери энергии. В общем случае экономические затраты выражаются стоимостью разработки, и производства подвижных объектов связи, материалоемкостью элементов системы и средствами, расходуемыми в процессе функционирования (эксплуатации) объекта, в частности, горюче-смазочными материалами. Стоимость системы в условиях выполнения подвижными объектами связи специальных задач. Показатель стоимости может рассматриваться как ограничение при выборе возможных реализаций элементов системы. Помимо этого, система должна характеризоваться показателями технического уровня ее элементов, которые войдут в критерий технической эффективности. Комплексный (обобщенный) критерий эффективности системы должен отражать влияние функционирования ПСЭС на выполнение подвижными объектами связи специальных задач по обеспечению связи в полном объеме.

Исходя из вышеизложенного, в качестве экономического критерия эффективности системы предлагается использовать часовой расход топлива (m_T), аналитическое выражение которого представлено в следующем виде:

$$m_{TC} = \frac{P_{ac}}{\eta_{dec} \times KnC_T \times P'_{\vartheta T}}. \quad (1)$$

где:

- P_{ac} – мощность потребления аппаратуры связи и технических средств обеспечения обитаемости;
- η_{dec} – КПД ДВС;
- KnC_T – общий коэффициент преобразования тепловой энергии;
- $P'_{\vartheta T}$ – эквивалентная удельная энергия 1-го килограмма топлива [кВт*ч/кг].

$$KnC_T = \prod_{i=1}^K Kn_i = \prod_{i=1}^K \eta_i, \quad (2)$$

где: η_i – КПД i -го элемента СПЭ.

Исследования, проведенные в работах [1, 4], показали, что общий коэффициент преобразования тепловой энергии (KnC_T) зависит от совокупности параметров, которые характеризуют поток электрической энергии, при этом исследовался функционал вида:

$$KnC_T = F \{U_c, U_{hi}, P_{i_{ac}}, Pac, \varepsilon_{ex}, \varepsilon_2, Unph_i\}, \quad (3)$$

где:

- U_c – напряжение на выходе ИЭЭ;
- U_{hi} – напряжение i -й цепи электропитания в АС;
- $P_{i_{ac}}$ – мощность i -й цепи электропитания в АС или ТСОО;
- Pac – мощность потребляемая АС и ТСОО;
- ε_{ex} – коэффициент кратности изменения напряжения в электрической сети (ИЭЭ);
- ε_2 – коэффициент кратности изменения напряжения на выходе ИЭЭ, или стабилизованных ИВЭП;
- $Unph_i$ – напряжение пульсаций на выходе сглаживающего фильтра выпрямителя.

Анализ используемых в устройствах (ДВС, ЭГ, КРО, ИВЭП) показывает, что КПД каждого устройства зависит, прежде всего, от номинальной мощности, напряжения и тока, за исключением в ДВС. По известным значениям КПД серийно выпускаемых устройствах согласно [3, 5], были получены аналитические выражения зависимостей КПД устройств от их номинальной мощности. В (2.4...2.7) эти выражения представлены в общем виде:

$$\eta_{i_2} = a_1 + b_1 \times \left(\frac{Pac}{\prod_{i=1}^{K-1} Kn_i} \right); \quad (4)$$

$$\eta_{i_2} = a_2 + b_2 \times \left(\frac{Pac}{lac \times \prod_{i=1}^{K-1} Kn_i} \right); \quad (5)$$

$$\eta_{i_3} = b_3 \times \left(\frac{Pac}{\prod_{i=1}^{K-1} Kn_i} \right)^a; \quad (6)$$

$$\eta_{i_4} = a_4 = const, \quad (7)$$

где:

- a_i, b_i [1/вт] – постоянные коэффициенты аппроксимации;
- a – степенной показатель;
- Kn_i – общий коэффициент преобразования энергии, равный произведению η_i – $*Km_i$, Km_i – коэффициент мощности.

Коэффициент Km каждого i -го устройства системы определяется из выражения:

$$Km_i = \cos \varphi \times K_{Hi} \times K_{Hv}, \quad (8)$$

где: $\cos \varphi$ – коэффициент сдвига фазы между током и напряжением; K_{Hi} , K_{Hv} – коэффициенты искажения формы тока и напряжения.

В свою очередь, составляющие, входящие в выражение (8) были определены, как:

$$\cos \varphi_1 = c_1 + d_1 \times \left(\frac{Pac}{\prod_{i=1}^K \eta_i} \right); \quad (9)$$

$$\cos \varphi_2 = d_2 \times (\varepsilon_{BX}); \quad (10)$$

$$K_{Hi_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + Kr^2}}; \quad (11)$$

$$K_{Hi_2} = d_2 \times (\varepsilon_{BX}); \quad (12)$$

$$K_{Hi_3} = c_2 = const; \quad (13)$$

$$K_{Hv_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + Kr^2}} 1/\sqrt{(1+Kr^2)}; \quad (14)$$

$$K_{Hv_2} = d_2 \times (\varepsilon_{BX}), \quad (15)$$

где: c, d – постоянные коэффициенты аппроксимации; Kr – коэффициент гармоник искаженной формы тока и напряжения.

Конкретные выражения КПД и реактивных составляющих устройств, входящих в ПСЭС приведены в табл. 1.

Наличие реактивных составляющих в ПСЭС приводит к увеличению потерь тепловой энергии, падению напряжения на реактивных

Таблица 1.
Элементы полевой системы электроснабжения и их характеристики

№ п/п	Тип преобразователя	Вид преобразователя	Перечень технико- экономических показателей	Расчеты, формулы и соотношения
1	2	3	4	5
1.	Двигатель внутреннего сгорания карбюраторный	Химическую энергию топлива в механическую	$m_T, \dot{\eta}_{\mathcal{E}F}, P_{\mathcal{E}T}, V_{\partial\partial}, M_{\partial\partial}$	$m_T = \frac{Pac}{\eta_{\partial\partial c} \times P'_{\mathcal{E}T}}, \dots \eta_{\mathcal{E}F} = 0,17...0,24;$ $P_{\mathcal{E}m} = 11862 \text{ Вт} \times \text{ч}/\text{кг};$ $V_{\partial\partial} = 403 \times \log(P_{\mathcal{E}F}) - 2976;$ $M_{\partial\partial} = 171 \times \log(P_{\mathcal{E}F}) - 576.$
2.	Двигатель внутреннего сгорания дизельный	Химическую энергию топлива в механическую	$m_T, \dot{\eta}_{\mathcal{E}F}, P_{\mathcal{E}T}, V_{\partial\partial}, M_{\partial\partial}$	$m_T = \frac{Pac}{\eta_{\partial\partial c} \times P'_{\mathcal{E}T}}, \dots \eta_{\mathcal{E}F} = 0,25...0,35;$ $P_{\mathcal{E}m} = 12560 \text{ Вт} \times \text{ч}/\text{кг};$ $V_{\partial\partial} = 800,2 \times \log(P_{\mathcal{E}F}) - 1358;$ $M_{\partial\partial} = 407 \times \log(P_{\mathcal{E}F}) - 1447.$
3.	Электрогенератор переменного тока	Магнитную энергию в электрическую посредством механической	$\eta_{\mathcal{E}G}, V_{\mathcal{E}G}, M_{\mathcal{E}G}$	$\eta_{\mathcal{E}G} = 0,542 \times (P_H)^{0,0476};$ $V_{\mathcal{E}G} = 188,2 \times \log(P_H) - 597;$ $M_{\mathcal{E}G} = 189,6 \times \log(P_H) - 603.$
4.	Электрогенератор постоянного тока	Магнитную энергию в электрическую посредством механической	$\eta_{\mathcal{E}G}, V_{\mathcal{E}G}, M_{\mathcal{E}G}$	$\eta_{\mathcal{E}G} = 0,715 + 0,67 \times 10^{-5} \times P_H;$ $V_{\mathcal{E}G} = 16 + 0,003 \times P_{\mathcal{E}G};$ $M_{\mathcal{E}G} = 5,3 + 0,008 \times P_{\mathcal{E}G}.$
5.	Бензиновый электроагрегат переменного тока	Химическую энергию топлива в электрическую	$V_{B\mathcal{E}A}, M_{B\mathcal{E}A}$	$V_{B\mathcal{E}A} = 8,38 \times (P_H)^{0,512};$ $M_{B\mathcal{E}A} = 1,51 \times (P_H)^{0,606}.$
6.	Дизельный электроагрегат переменного 3ф тока	Химическую энергию топлива в электрическую	$V_{D\mathcal{E}A}, M_{D\mathcal{E}A}$	$V_{D\mathcal{E}A} = 1987 \times \log(P_H) - 6933;$ $M_{D\mathcal{E}A} = 1570 \times \log(P_H) - 5400.$
7.	Электроустановка с отбором мощности	Магнитную энергию в электрическую посредством механической	$M_{\mathcal{E}V}$	$M_{\mathcal{E}V} = 190 \times \log(P_H) - 600.$
8.	Коммутационно-распределительное оборудование переменного 3ф тока	Транзит электроэнергии от ЭА к ИВЭП АС	$\eta_{KPO}, V_{KPO}, M_{KPO}$	$\eta_{KPO} = 0,95;$ $V_{KPO} = Kv \times P_{KPO};$ $M_{KPO} = Km \times P_{KPO}.$
9.	Коммутационно-распределительное оборудование постоянного тока	Транзит электроэнергии от ЭА к ИВЭП АС	$\eta_{KPO}, V_{KPO}, M_{KPO}$	$\eta_{KPO} = 0,95, \text{ при токе до } 100\text{A};$ $\eta_{KPO} = 0,9, \text{ при токе выше } 100\text{A};$ $V_{KPO} = Kv \times P_{KPO};$ $M_{KPO} = Km \times P_{KPO}.$
10.	Стабилизатор напряжения переменного 1ф тока типа СОС	Стабилизация переменного напряжения	$\eta_{COC}, cos\varphi_{mp}, cos\varphi_{bx}, Kui, Km, \varepsilon_{ex}, \varepsilon_2, V_{COC}, M_{COC}$	$\eta_{COC} = 0,35 + 0,125 \times \log(P_H);$ $cos\varphi_{mp} = 0,428 + 0,191 \times \log(P_s);$ $cos\varphi_{bx} = 0,98;$ $Kui = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_g^2}};$ $Km = cos\varphi_{mp} \times cos\varphi_{bx} \times Kui = 0,7;$ $\varepsilon_{ex} = 1,3; \varepsilon_2 = 1,05;$ $V_{COC} = 40 + 0,0135 \times P_H;$ $M_{COC} = 50 + 0,016 \times P_H.$

1	2	3	4	5
11.	Стабилизатор напряжения переменного 3ф тока типа СТС	Стабилизация переменного напряжения	η_{CTC} , $\cos\varphi_{TP}$, K_M , ε_{ex} , ε_2 , V_{CTC} , M_{CTC}	$\eta_{CTC} = 0,394 + 0,115 \times \log(P_H)$; $\cos\varphi_{TP} = 0,818 + 0,016 \times \log(P_e)$; $K_M = 0,75$; $\varepsilon_{ex} = 1,3$; $\varepsilon_2 = 1,05$; $V_{CTC} = 80 + 0,0065 \times P_H$; $M_{CTC} = 85 + 0,0105 \times P_H$.
12.	Стабилизатор напряжения переменного 1ф тока типа СТО	Стабилизация переменного напряжения	η_{CTO} , K_M , ε_{ex} , ε_2 , V_{CTO} , M_{CTO}	$\eta_{CTO} = 0,639 + 0,05 \times \log(P_H)$; $K_M = 0,85$; $\varepsilon_{ex} = 1,3$; $\varepsilon_2 = 1,05$; $V_{CTO} = 40 + 0,008 \times P_H$; $M_{CTO} = 35 + 0,005 \times P_H$.
13.	Стабилизатор напряжения переменного 3ф тока типа СТТ	Стабилизация переменного напряжения	η_{CTT} , K_M , ε_{ex} , ε_2 , V_{CTT} , M_{CTT}	$\eta_{CTT} = 0,387 + 0,12 \times \log(P_H)$; $K_M = 0,85$; $\varepsilon_{ex} = 1,3$; $\varepsilon_2 = 1,05$; $V_{CTT} = 60 + 0,005 \times P_H$; $M_{CTT} = 50 + 0,005 \times P_H$.
14.	Линейный стабилизатор напряжения постоянного тока	Стабилизация постоянного напряжения	η_{LCH} , ε_H , V_{LCH} , M_{LCH}	$\eta_{LCH} = \frac{1}{\varepsilon_{ex} \times (1 + \delta_{EK})}$; $P_{Hac} = \frac{P_{Hac}}{[\varepsilon_{ex} \times (1 + \delta_{EK}) - 1]}$; $\delta_{EK} = \frac{U_{K\min} + U_{nc}}{U_H}$, $\varepsilon_H = 1$; $V_{LCH} = Kv \times P_H \times [\varepsilon_1 \times (1 + \delta_{EK}) - 1]$; $M_{LCH} = K_M \times P_H \times [\varepsilon_1 \times (1 + \delta_{EK}) - 1]$.
15.	Сетевой трансформаторный выпрямитель 1ф исполнения	Трансформирование, выпрямление переменного 1ф тока и сглаживание выпрямленного напряжения	η_{CTBo} , $\cos\varphi_{TP}$, K_{Hi} , K_M , $K_{H.TP}$, ε_{ex} , ε_2 , V_{CTBo} , M_{CTBo}	$\eta_{CTBo} = 0,403 + 0,126 \times \log(P_H)$; $\cos\varphi_{TP} = 0,428 + 0,191 \times \log(P_e)$; $K_{Hi} = 0,88$; $K_M = \cos\varphi_{TP} \times K_{Hi}$; $K_{H.TP} = 0,32/0,675/0,9^2$); $\varepsilon_{ex} = 1,3$; $\varepsilon_2 = 1,05$; $V_{CTBo} = 4 + 0,009 \times P_H$; $M_{CTBo} = 7 + 0,048 \times P_H$.
16.	Сетевой трансформаторный выпрямитель 3ф исполнения	Трансформирование, выпрямление переменного 3ф тока и сглаживание выпрямленного напряжения	η_{CTBm} , $\cos\varphi_{TP}$, K_{Hi} , K_M , $K_{H.TP}$, ε_{ex} , ε_2 , V_{CTBm} , M_{CTBm}	$\eta_{CTBm} = 0,404 + 0,107 \times \log(P_H)$; $\cos\varphi_{TP} = 0,818 + 0,016 \times \log(P_e)$; $K_{Hi} = 0,9$; $K_M = \cos\varphi_{TP} \times K_{Hi}$; $K_{H.TP} = 0,74/0,95^3$); $\varepsilon_{ex} = 1,3$; $\varepsilon_2 = 1,05$; $V_{CTBm} = 30 + 0,037 \times P_H$; $M_{CTBm} = 32 + 0,025 \times P_H$.
17.	Сетевой трансформаторный выпрямитель 1ф исполнения	Трансформирование, выпрямление переменного 1ф тока и сглаживание, стабилизация выпрямленного напряжения	η_{CTBCo} , K_M , $K_{H.TP}$, ε_{ex} , ε_2 , V_{CTBCo} , M_{CTBCo}	$\eta_{CTBCo} = 0,218 + 0,187 \times \log(P_H)$; $K_M = 0,85$; $K_{H.TP} = 0,6$: $\varepsilon_{ex} = 1,3$; $\varepsilon_2 = 1,05$; $V_{CTBCo} = 25 + 0,052 \times P_H$; $M_{CTBCo} = 15 + 0,078 \times P_H$.
18.	Сетевой трансформаторный выпрямитель 3ф исполнения	Трансформирование, выпрямление переменного 3ф тока и сглаживание, стабилизация выпрямленного напряжения	η_{CTBCm} , K_M , $K_{H.TP}$, ε_{ex} , ε_2 , V_{CTBCm} , M_{CTBCm}	$\eta_{CTBCm} = 0,281 + 0,145 \times \log(P_H)$; $K_M = 0,65/0,85^4$); $K_{H.TP} = 0,62/0,68^5$); $\varepsilon_{ex} = 1,3$; $\varepsilon_2 = 1,05$; $V_{CTBCm} = 20 + 0,1 \times P_H$; $M_{CTBCm} = 30 + 0,033 \times P_H$.

1	2	3	4	5
19.	Преобразователь постоянного напряжения стабилизированный дискретного исполнения	Преобразование и стабилизация постоянного напряжения	$\eta_{\text{ПНС}}, \varepsilon_{\text{ex}}, \varepsilon_2, K_{\text{И.ТР}}, V_{\text{ПНС}}, M_{\text{ПНС}}$	$\eta_{\text{ПНС}} = 0,503 + 0,186 \times \log(U_H);$ $\varepsilon_{\text{ex}} = 1,3; \varepsilon_2 = 1,05;$ $K_{\text{И.ТР}} = \frac{I_1}{\sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{ex}} \times \pi}{\pi - \alpha_{\min}}}}$ $V_{\text{ПНС}} = Ku \times P_H; M_{\text{ПНС}} = Km \times P_H.$
20.	Преобразователь напряжения дискретного исполнения	Преобразование постоянного напряжения	$\eta_{\text{ПН}}, \varepsilon_{\text{ex}}, \varepsilon_2, K_{\text{И.ТР}}, V_{\text{ПН}}, M_{\text{ПН}}$	$\eta_{\text{ПН}} = \frac{U_H}{1,22 \times U_H + 0,553};$ $K_{\text{И.ТР}} = 1; \varepsilon_{\text{ex}} = 1,3; \varepsilon_2 = 1,05;$ $V_{\text{ПН}} = Ku \times P_H; M_{\text{ПН}} = Km \times P_H.$
21.	Выпрямитель с бестрансформаторным входом 1ф	Преобразование переменного 1ф напряжения в постоянное	$\eta_{\text{ВБВ}}, \varepsilon_{\text{ex}}, \varepsilon_2, K_B, K_{\text{И.и}}, K_M, V_{\text{ВБВ}}, M_{\text{ВБВ}}$	$\eta_{\text{ВБВ1}} = 0,8 + 0,04 \times \log(U_H);$ $\varepsilon_{\text{ex}} = 1,3; \varepsilon_2 = 1,05; K_B = 0,9; K_{\text{И.и}} = 0,7;$ $K_M = K_B \times K_{\text{И.и}} = 0,63;$ $V_{\text{ВБВ}} = Ku \times P_H; M_{\text{ВБВ}} = Km \times P_H.$
22.	Выпрямитель с бестрансформаторным входом 3ф	Преобразование переменного 3ф напряжения в постоянное	$\eta_{\text{ВБВ}}, \varepsilon_{\text{ex}}, \varepsilon_2, K_B, K_{\text{И.и}}, K_M, V_{\text{ВБВ}}, M_{\text{ВБВ}}$	$\eta_{\text{ВБВ3}} = 85; \varepsilon_{\text{ex}} = 1,3; \varepsilon_2 = 1,05;$ $K_B = 0,95; K_{\text{И.и}} = 0,8; K_M = 0,76;$ $V_{\text{ВБВ}} = Ku \times P_H; M_{\text{ВБВ}} = Km \times P_H.$
23.	Стабилизатор напряжения постоянного тока микромодульного исполнения	Стабилизация постоянного напряжения	$\eta_{\text{МЛСН}}, \varepsilon_H, V_{\text{МЛСН}}, M_{\text{МЛСН}}$	$\eta_{\text{МЛСН}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{ex}} \times (1 + \delta_{\text{ЭК}})};$ $P_H = \frac{P_{\text{рас}}}{[\varepsilon_{\text{ex}} \times (1 + \delta_{\text{ЭК}}) - 1]},$ $V_{\text{МЛСН}} = Kv \times P_H \times [\varepsilon_1 \times (1 + \delta_{\text{ЭК}}) - 1];$ $M_{\text{МЛСН}} = K_M \times P_H \times [\varepsilon_{\text{ex}} \times (1 + \delta_{\text{ЭК}}) - 1].$
24.	Стабилизатор напряжения микромодульного исполнения	Преобразование и стабилизация постоянного напряжения	$\eta_{\text{МПСН}}, \varepsilon_{\text{ex}}, \varepsilon_2, V_{\text{МПСН}}, M_{\text{МПСН}}$	$\eta_{\text{МПСН}} = 0,728 + 0,098 \times \log(U_H);$ $\varepsilon_{\text{ex}} = 1,3; \varepsilon_2 = 1,05;$ $V_{\text{МПСН}} = Ku \times P_H; M_{\text{МПСН}} = Km \times P_H.$
25.	Микровыпрямитель с бестрансформаторным микромодульного исполнения	Преобразование переменного напряжения в постоянное	$\eta_{\text{МВБВ}}, K_M, \varepsilon_{\text{ex}}, \varepsilon_2, V_{\text{МВБВ}}, M_{\text{МВБВ}}$	$\eta_{\text{МВБВ}} = 0,628 + 0,099 \times \log(U_H);$ $\varepsilon_{\text{ex}} = 1,3; \varepsilon_2 = 1,05; K_M = 0,83;$ $V_{\text{МВБВ}} = Ku \times P_H; M_{\text{МВБВ}} = Km \times P_H.$
26.	Устройства гарантированного питания с щелочными АБ		$V_{AB_{\text{и}}}, M_{AB_{\text{и}}}$	$V_{AB_{\text{и}}} = 13,4 + 0,02 \times P_H;$ $M_{AB_{\text{и}}} = 0,581 + 0,187 \times P_H.$
27.	Устройства гарантированного питания с кислотными АБ		$V_{AB_{\text{к}}}, M_{AB_{\text{к}}}$	$V_{AB_{\text{к}}} = 1,3 + 0,07 \times P_H;$ $M_{AB_{\text{к}}} = 0,136 \times P_H - 2,34.$

элементах, перегрузке генератора, снижению нагрузки на ДВС, к созданию предпосылок искажения формы кривой напряжения на зажимах генератора и, тем самым, к увеличению мощности искажений. Анализ разработок существующих СЭС и ИВЭП показывает, что реактивные составляющие, как правило, при этом не оцениваются. Избыточность по мощности при этом обычно компенсируется выбором более мощного электроагрегата, что приводит к увеличению потребления топлива и ухудшению МГП системы. Поэтому исследование ПСЭС по снижению избыточных МГП,

а значит и реактивных составляющих является необходимым условием повышения эффективности системы. Эти показатели необходимо отнести к критерию технической эффективности, которые оцениваются суммой объемов и масс элементов ПСЭС.

$$Vc = \sum_{i=1}^n Vi_{u\omega\omega} + \sum_{j=1}^m Vj_{kpo} + \sum_{y=1}^{\kappa} Vy_{u\omega\omega n}; \quad (16)$$

$$Mc = \sum_{i=1}^n Mi_{u\omega\omega} + \sum_{j=1}^m Mj_{kpo} + \sum_{y=1}^{\kappa} My_{u\omega\omega n}. \quad (17)$$

Массогабаритные показатели ИЭЭ, КРО и ИВЭП зависят, в основном, от номинальной мощности нагрузки. В соответствии с этим, объем и масса каждого элемента системы выражены через Rac .

$$V_1 = \pm m_1 + n_1 \times \left(\frac{Pi_{ac}}{1} \right); \quad (18)$$

$$V_2 = \pm m_2 + n_2 \times \left(\frac{Pi_{ac}}{Kno_1} \right); \quad (19)$$

$$V_3 = \pm m_3 + n_3 \times \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n Pi_{ac}}{Kno_1 \times Kno_2} \right); \quad (20)$$

$$V_4 = n_4 \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n Pi_{ac}}{Kno_1 \times Kno_2 \times Kno_3} \right)^\alpha, \quad (21)$$

где Kno – общий коэффициент преобразования энергии в i -м элементе СПЭ.

Расчетные соотношения массы каждого элемента системы имеют аналогичный вид, что и для объема в (18)...(21).

Общим параметром, характеризующим связь экономического и технических показателей ПСЭС с показателями подвижных объектов связи является мощность потребления АС и ТСОО Rac . Однако более полно эта связь может быть установлена с помощью комплексного (обобщенного) показателя. Наиболее распространенным приемом формирования обобщенного критерия эффективности является представление его в аддитивной или мультиплективной форме. При этом зачастую используется метод экспертных оценок, когда для каждого из формируемых показателей (частных критериев) определяется «вес» в сравнении с другими. Недостатками таких критериев эффективности являются субъективизм экспертов, утрата наглядности и физического смысла обобщенного показателя. Поэтому необходим такой обобщенный показатель, в котором частные показатели имеют аналитическое выражение.

Основной задачей подвижных объектов связи в условиях боевых действий является выполнение ими своих функций в полном объеме в течение времени проведения боевой операции (t_{on}). Это достигается непрерывным функционированием подвижных объектов связи за этот промежуток времени. Согласно [1,3], функционирование подвижных объектов связи является циклическим. При этом установлены подготовительный и основной циклы функционирования. На подготовительном цикле подвижных объектов связи приводится в состояние выполнения боевых

задач (производится ремонт поврежденных узлов, или замена на работоспособные, проводятся регламентные работы, техническое обслуживание, заправка топливом). Основной цикл функционирования характеризуется выполнением подвижных объектов связи боевых задач в течении t_{on} , который обеспечивается качеством функционирования ПСЭС. Время t_{on} устанавливается нормативными документами или приказами и является величиной заданной. Так, например, для подвижных объектов связи тактического звена управления (в ПУС КП МСП) t_{on} составляет 120 часов.

Результат функционирования подвижных объектов связи напрямую связан с непрерывной работой ПСЭС и, в первую очередь, ИЭЭ и определяется временем непрерывной работы ПСЭС (t_{HP}). Этот показатель является одним из важных временных показателей и задается в требованиях технического задания на разработку ПСЭС подвижных объектов связи. Для ПСЭС время t_{HP} определяется следующим выражением:

$$t_{HP} = \frac{M_{m3}}{m_T}, \quad (22)$$

где M_{m3} – масса запаса топлива, предназначенная для ИЭЭ.

В существующих СЭС ПОС запас топлива определяется емкостью топливного бака ИЭЭ. Как показано в работах [1,2], запас M_{m3} обеспечивает непрерывную работу ИЭЭ в течение 8–12 часов, что значительно меньше t_{on} , вследствие чего, возможны перерывы в электроснабжении подвижных объектов связи из-за отсутствия топлива. Перерывы в электроснабжении подвижных объектов связи также могут вызывать и отказы в ПСЭС, но в данной работе надежностные показатели считаются заданными и будут введены в ограничения при разработке математической модели и выборе наиболее эффективного варианта ПСЭС. Это оправданно тем, что рассматриваемый отрезок времени t_{on} в десятки раз меньше, чем заданная наработка на отказ (Тос) СЭС, которая для подвижных объектов связи тактического звена управления составляет 1500–2000 часов. При таких соотношениях, когда t_{on} « Тос, отказы маловероятны, и вследствие этого надежностные показатели в обобщенный показатель вводить нецелесообразно. Из вышеизложенного следует, что для организации непрерывного функционирования ПСЭС необходима неоднократная и своевременная дозаправка топливом в течении t_{on} :

$$N_3 = \frac{t_{on}}{tp_3}, \quad (23)$$

где: t_{p_3} – время работы ИЭЭ на одной заправке топливом; N_3 – количество заправок.

При $t_{p_3} = t_{HP} = t_{on}$ результат функционирования ПСЭС соответствует идеальному случаю (при одной исходной заправки топливом). Но практически, в настоящее время это невозможно, так как запас топлива в подвижных объектах связи для ПСЭС ограничен емкостью топливного бака ИЭЭ. Количество резервного топлива, доставляемого с базы снабжения в район боевых действий для объектов военной техники, в том числе и ПСЭС подвижных объектов связи, определяется нормативными документами и составляется в тактическом звене управления половине всей заправки топливом. При этом дозаправка резервным топливом организуется в соединении 1-2 раза в сутки. Поэтому увеличение исходного запаса топлива в подвижных объектах связи является важным условием повышения эффективности ПСЭС и, как следует из (22), этот запас топлива увеличивает время непрерывной работы системы в пределах времени t_{on} . Исходя из (22), можно утверждать, что время непрерывной работы ПСЭС является одним из важных обобщенных показателей, связывающих систему преобразования энергии с подвижными объектами связи. Но необходимый запас топлива может размещаться в подвижных объектах связи в том случае, если для него имеется соответствующий запас полезного объема и массы. В существующих подвижных объектах связи со встраиваемыми электроагрегатами такой запас отсутствует из-за громоздких габаритов и массы ВЭА и ИВЭП. Следовательно, необходимый объем и массу для размещения дополнительного топлива можно получить за счет совершенствования элементов ПСЭС, то есть улучшения их МГП и снижения потерь тепловой энергии.

Практика проектирования СЭС показывает, что компоновка ее составных элементов в подвижных объектах связи всегда связана с ограниченными возможностями в отношении их размещения, так как приоритетным оборудованием считается аппаратура связи. Следовательно, размещаемые в подвижных объектах связи элементы ПСЭС не должны превышать заданные значения объема и массы ($V_{C.zad}$, $M_{C.zad}$), которые устанавливаются для конкретных типов подвижных объектов связи. С учетом этого условия имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} V_C &\leq V_{C.zad}, \\ M_C &\leq M_{C.zad}. \end{aligned} \quad (24)$$

Тогда объем и масса, отводимые для размещения топлива, определяются из выражения:

$$\begin{aligned} V_{m3} &= V_{C.zad} - V_C, \\ M_{m3} &= M_{C.zad} - M_C. \end{aligned} \quad (25)$$

где: V_C – объем, занимаемый элементами перспективной (усовершенствованной) СПЭ; M_C – суммарная масса элементов перспективной ПСЭС.

Подставляя (25) в (22), получим аналитическое выражение обобщенного критерия эффективности:

$$t_{HP} = \frac{M_{C.zad} - M_C}{m_T}, \quad (26)$$

где M_C – масса перспективной ПСЭС.

Из (26) следует, что обобщенный критерий t_{HP} объединяет экономический и технические показатели ПСЭС и в дальнейшем может трактоваться как обобщенный технико-экономический критерий, на основании которого можно проводить оценку эффективности ПСЭС и решать поставленную научную задачу.

Заключение

Каждый из частных критериев эффективности, входящих в обобщенный критерий, отражает несопоставимые друг с другом значения, и может иметь противоречивые результаты, по которым наилучший вариант ПСЭС определить не удастся. Их взаимосвязь можно установить только косвенным путем, после тщательного исследования различных вариантов ПСЭС. С помощью обобщенного критерия эффективности (t_{HP}) решаются эти противоречия и удается найти компромиссное решение. Выбранный обобщенный критерий (27) имеет простую форму и содержит глубокий физический смысл.

$$\begin{aligned} t_{HP} &= \frac{M_{m3}}{m_{TC}} = \frac{M_{C.zad} - M_C}{m_{TC}} = \\ &= y_T \times \frac{(V_{C.zad} - V_C)}{m_{TC}} = \max t_{HP}. \end{aligned} \quad (26)$$

Данный критерий позволяет оценить экономический и технический уровень устройств ПСЭС, сопоставить их с функциональными возможностями подвижных объектов связи и определить их целесообразный предел совершенствования. Эти обстоятельства позволяют говорить о правильном выборе обобщенного критерия технико-экономической эффективности.

Литература

1. Электроснабжение телекоммуникационных систем, стационарных и полевых узлов связи / А. В. Мякотин, Д. Ю. Замазий, Е. А. Кордюков, Н. М. Мельников, Н. Г. Сысоев, Д. Б. Шляхтенко, под ред. А. В. Мякотина. – СПб.: ВАС, 2018. – 408 с.: ил.
2. Воробьев А. Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. – М.: Эко-Трендз, 2002.
3. Романов Н. В., Алексашкин А. А. Энергетика для войск // Армейский сборник. 2021. № 8. С. 100–110.
4. Основные проблемы и перспективы развития АСЭС / Бартош В. В., Винограденко А. М., Веселовский А. П. // В сборнике: Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды III Межвузовской научно-практической конференции. 2018. С. 136–140.
5. Железняков В. О., Матвеев Р. В., Мякотин А. В. Способ электроснабжения полевых объектов материально-технического обеспечения // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах. под. ред. С. В. Бачевского, сост. А. Г. Владыко, Е. А. Аникеевич, Л. М. Минаков. 2015. С. 1209–1215.

CRITERIA FOR THE EFFICIENCY OF THE FIELD POWER SUPPLY SYSTEM

Asanin A. V.⁴, Ivanov V. G.⁵, Ivanishko A. N.⁶

Keywords: system efficiency, system criteria, voltage, power, hourly consumption.

Abstract

The purpose of the work is to substantiate the criteria for the efficiency of a field power supply system for special purposes.

Research method: the methodological basis of the research is the general theory of systems using the methods of system analysis. The reliability of the results is ensured by the correctness of the problem statements, the adequacy of the applied research methods to the tasks to be solved and the consistency of the results obtained with the data of previous studies, the consistency of the theoretical estimates obtained with the results of analytical calculations.

Results of the study: the criteria for the efficiency of the field power supply system are selected and substantiated. As an economic criterion for the efficiency of the system, the hourly fuel consumption is taken, the criterion of technical efficiency is estimated by the sum of the volumes and masses of the elements of the field power supply system. The time of continuous operation is taken as a complex (generalized) technical and economic criterion. This criterion allows to assess the economic and technical level of field power supply devices power supply system, compare them with the functional capabilities and determine their expedient limit of improvement.

Scientific novelty: consists in the development of substantiated criteria for the efficiency of a field power supply system for special purposes, taking into account its use for power supply of field military communications.

References

1. Jelektrosnabzhenie telekommunikacionnyh sistem, stacionarnyh i polevyh uzlov svjazi / A. V. Mjakotin, D. Ju. Zamazij, E. A. Kordjukov, N. M. Mel'nikov, N. G. Sysoev, D. B. Shljahtenko, pod red. A. V. Mjakotina. – SPb.: VAS, 2018. – 408 s.: il.
2. Vorob'ev A. Ju. Jelektrosnabzhenie kompjuternyh i telekommunikacionnyh sistem. – M.: Jeko-Trendz, 2002.
3. Romanov N. V., Aleksashkin A. A. Jenergetika dlja vojsk // Armejskij sbornik. 2021. № 8. S. 100–110.

4 Anton V. Asanin, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering, Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Academy of Civil Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after Lieutenant General D. I. Mikhaylik», Khimki, Russia. E-mail: asanin-anton@mail.ru

5 Vasily G. Ivanov, Dr.Sc. of Military Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Informatics and Computer Engineering, Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Academy of Civil Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after Lieutenant General D. I. Mikhaylik», Khimki, Russia. E-mail: wasj2006@yandex.ru

6 Alexander N. Ivanishko, Head of the Group of the Main Communications Directorate of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow, Russia. E-mail: GUS_1@mil.ru

4. Osnovnye problemy i perspektivy razvitiya ASJeS / Bartosh V. V., Vinogradenko A. M., Veselovskij A. P. // V sbornike: Problemy tehnicheskogo obespechenija vojsk v sovremennyh uslovijah. Trudy III Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. S. 136–140.
5. Zhleznjakov V. O., Matveev R. V., Mjakotin A. V. Sposob jelektrosnabzhenija polevyh obektov material'no-tehnicheskogo obespechenija // V sbornike: Aktual'nye problemy infotelekomunikacij v nauke i obrazovanii. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija: sbornik nauchnyh statej v 2 tomah. pod. red. S. V. Bachevskogo, sost. A. G. Vladko, E. A. Anikevich, L. M. Minakov. 2015. S. 1209–1215.

