

**Д. В. Каркоцкий, А. Н. Малашин, С. А. Чумаков, Ю. Г. Коваль**

*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ПЕРВИЧНОГО ИСТОЧНИКА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ**

**Аннотация.** При разработке новых или модернизации существующих энергоемких подвижных объектов (ПО) основным способом обеспечения оптимальных параметров качества питающего напряжения является завышение мощности первичного источника (ПИ) в 1,5–2 раза по отношению к максимальной мощности всех потребителей электрической энергии (ПЭЭ) ПО. Следствием существующего подхода определения мощности ПИ являются: завышение массы и габаритов системы автономного электроснабжения (САЭС) на 30–70 %, что существенно снижает скоростные характеристики, показатели проходимости и длительность автономной работы ПО, а также ухудшают экономичность САЭС; загруженность ПИ САЭС не более чем 35–55 % от номинальной мощности, что приводит к сокращению их сроков службы. Таким образом, невозможно учесть особенности реального токопотребления отдельных ПЭЭ и влияние их совместного функционирования на конкретные ПИ САЭС, что приводит к дополнительным финансовым затратам и увеличению сроков разработки, а также к риску отказа в процессе испытаний как САЭС, так и подключаемого к ним оборудования.

Предложенный подход оценки мощности ПИ электрической энергии в САЭС ПО позволяет определить полную мощность ПЭЭ в условиях ограниченной информации о них с учетом характера графика нагрузки, а также величины и формы токопотребления. В результате аналитических расчетов согласно приведенной методике мощность ПИ ПО может быть снижена на 13–45 % в зависимости от характера нагрузки при сохранении показателей качества питающего напряжения в допустимых пределах.

Рассмотренные способы расчета мощности ПИ САЭС позволяют определить ограничения для решения задачи структурно-параметрического синтеза САЭС и алгоритма оценки мощности ПИ при разработке новой или модернизации существующей САЭС ПО. Это позволит снизить массогабаритные параметры САЭС, тем самым повысить скоростные характеристики, маневренные возможности и показатели проходимости ПО, а также длительность автономной работы и экономичность функционирования САЭС.

**Ключевые слова:** системы автономного электроснабжения, мощность первичного источника, полная мощность, качество питающего напряжения, график нагрузки

**Для цитирования:** Методика оценки мощности первичного источника системы автономного электроснабжения с учетом прогнозируемого графика нагрузки / Д. В. Каркоцкий [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №2. – С. 205–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-205-214>

**D. V. Karkotski, A. N. Malashin, S. A. Chumakov, Y. G. Koval**

*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

## **METHODOLOGY FOR ASSESSING THE POWER OF THE PRIMARY SOURCE OF THE SYSTEM OF AUTONOMOUS ELECTRICAL SUPPLY WITH ACCOUNT OF THE PREDICTED LOAD GRAPHICS**

**Abstract.** When developing new or upgrading existing energy-intensive mobile objects (MO), the main way to ensure the quality parameters of the supply voltage is no worse than in the state grid, overestimation of the primary source (PS) power is 1.5–2 times relative to the maximum power of all electrical energy consumers (EEC) software.

The consequence of the existing approach to determine the power of PS are: overestimation of the mass and dimensions of the autonomous power supply system (APSS) by 30–70 %, which significantly reduces speed characteristics, cross-country performance and battery autonomy of MO, as well as worsen the economics of the APSS; the workload of the PS APSS is not more than 35–55 % of the nominal capacity, which leads to a reduction in their service lives.

Thus, it is impossible to take into account the peculiarities of the actual current consumption of individual EEC and the impact of their joint operation on specific PS APSS, which leads to additional financial costs and an increase in development time, as well as to the risk of failure during the testing of both the APSS and the equipment connected to it.

The proposed approach for estimating the PS power of electric energy in APSS MO allows determining the full power of the EEC in terms of limited information about the EEC taking into account the nature of the load graph, as well as the magnitude and form of current consumption. As a result of analytical calculations according to the above methodology, the PS power can be reduced by 13–45 %, depending on the nature of the load, while maintaining the quality indicators of the supply voltage within acceptable limits.

The considered methods for determining the power of the PS APSS will make it possible to determine the limitations for solving the problem of structural-parametric synthesis of the APSS and the algorithm for determining the power of the PS when developing a new or upgrading the existing APSS MO. This will reduce the weight and size parameters of the APSS, thereby increasing the speed characteristics, maneuverability and software permeability of MO, as well as the autonomous operation time and efficiency of the APSS operation.

**Keywords:** autonomous power supply systems, primary source power, total power, supply voltage quality, load graph

**For citation:** Karkotski D. V., Malashin A. N., Chumakov S. A., Koval Y. G. Methodology for assessing the power of the primary source of the system of autonomous electrical supply with account of the predicted load graphics. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 205–214 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-205-214>

**Введение.** Система автономного электроснабжения (САЭС) – неотъемлемая часть автономного подвижного объекта (ПО), без которой его функционирование невозможно. Задачей САЭС как функциональной системы является бесперебойное обеспечение электрической энергией с требуемым качеством во всех режимах работы функциональной аппаратуры и силовых агрегатов ПО. Специфика систем автономного электроснабжения заключается в ограниченности их мощности.

*Целью работы* является исследование влияния работы источника ограниченной мощности (имитация САЭС ПО) на нелинейную нагрузку (имитация системы вторичного электропитания ПО), а также определение мощности первичного источника САЭС.

**Исследование влияния работы источника ограниченной мощности на нелинейную нагрузку.** Как источник ограниченной мощности использовался бензиновый генератор WT-1000 «WATTPro» мощностью 1 кВт, в качестве нелинейной нагрузки применялся системный блок ПЭВМ с блоком питания мощностью 200 Вт. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения первичного источника (ПИ) составил 37 %.

Аналогичные испытания проводились в отделе электроснабжения 16 Центрального научно-исследовательского испытательного ордена Красной Звезды института Министерства обороны Российской Федерации имени маршала войск связи А. И. Белова (г. Москва, Россия), где исследовалась совместная работа серийно выпускаемой передвижной электростанции Э-351-Б, укомплектованной электроагрегатами АД-30У-Т400-1В, и имитатора нелинейной нагрузки, обеспечивающего импульсную форму кривой потребляемого тока, аналогичную форме кривой тока, потребляемого источниками вторичного электропитания ПО [2]. Результаты испытаний показали, что при сравнимых значениях мощностей САЭС переменного тока (15 кВА) и импульсной (нелинейной) нагрузки (7,5 кВА) коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения первичного источника (ПИ) составил 48 %, что превышает на 37 % допустимое значение, установленное ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

**Оценка мощности первичного источника САЭС путем установления максимально потребляемого тока или входного сопротивления потребителей электрической энергии.** При разработке новых или модернизации существующих энергоемких ПО основным способом обеспечения заданных параметров качества питающего напряжения (ГОСТ 13109-97) является завышение мощности ПИ в 1,5–2 раза по отношению к максимальной мощности всех потребителей электрической энергии (ПЭЭ) ПО [2, 3]:

$$P_{\text{ПИ}} = (1,5 \div 2) \sum_{i=1}^n P_{\text{ПЭЭ max}_i}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ПИ}}$  – активная мощность ПИ, Вт;  $P_{\text{ПЭЭ max}_i}$  – максимальная активная мощность  $i$ -го ПЭЭ согласно техническому описанию (ТО), Вт;  $n$  – количество ПЭЭ ПО.

Поскольку информация о мощности ПЭЭ, как правило, неизвестна, составляющие выражения (1) оцениваются тремя способами:

1) в соответствии с формулой

$$P_{\text{ПЭЭmax}_i} = U_i I_{\text{max}_i}, \quad (2)$$

где  $U_i$  – питающее напряжение  $i$ -го ПЭЭ, В;  $I_{\text{max}_i}$  – максимальный ток входного (сетевое) предохранителя в  $i$ -м ПЭЭ ПО, А;

2) методом измерения входного сопротивления ПЭЭ  $R_{\text{ПЭЭ}_i}$  и расчета мощности ПЭЭ по выражению

$$P_{\text{ПЭЭ}_i} = \frac{U_i^2}{R_{\text{ПЭЭ}_i}}, \quad (3)$$

3) методом измерения  $I_{\text{max}_i}$  для последующего расчета  $P_{\text{ПЭЭmax}_i}$  согласно (2).

Следствием существующего подхода определения мощности ПИ являются:

завышение массы и габаритов САЭС на 30–70 %, что существенно снижает скоростные характеристики, показатели проходимости и длительность автономной работы ПО, а также ухудшают экономичность САЭС [1];

загруженность ПИ САЭС не более чем 35–55 % от номинальной мощности, что приводит к сокращению их сроков службы.

Таким образом, невозможно учесть особенности реального токопотребления отдельных ПЭЭ и влияние их совместного функционирования на конкретные ПИ САЭС, что приводит к дополнительным финансовым затратам и увеличению сроков разработки, а также к риску отказа в процессе испытаний как САЭС, так и подключаемого к ним оборудования [2, 3, 10].

**Оценка мощности первичного источника САЭС путем расчета полной мощности потребителя электрической энергии.** Анализ опыта построения САЭС в «большой» энергетике показал, что все способы определения мощности ПИ сводятся к расчету полной мощности ПЭЭ. Это позволяет учесть величину и форму токопотребления в соответствии с РД 5Р.6168-92 «Судовые электроэнергетические системы. Методы расчета электрических нагрузок и определения необходимой мощности генераторов электростанций», а также [6, 8, 9]. В представленном виде они не могут быть применены при проектировании САЭС из-за дефицита информации о параметрах ПЭЭ.

Для решения этой проблемы авторами предлагается методика, которая позволяет определять *мощность ПИ электрической энергии в САЭС ПО с учетом характера графика нагрузки (ГН), а также величины и формы токопотребления.*

В случае, когда *известен коэффициент мощности отдельного ПЭЭ*, оценку полной мощности ПИ проводят на основе информации о номинальной активной мощности, указанной в ТО на ПЭЭ.

Выражение для расчета полной потребляемой мощности имеет вид

$$S_{\text{ПЭЭ}_i} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{ПЭЭ}_i} k_{\text{П}_i} k_{\text{И}_i}}{k_{\text{М}_i}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{ПЭЭ}_i}$  – номинальная мощность  $i$ -го ПЭЭ согласно ТО, Вт;  $k_{\text{П}_i}$  – кратность пускового тока  $i$ -го ПЭЭ согласно ТО;  $k_{\text{И}_i}$  – коэффициент использования, характеризующий соотношение потребляемой мощности  $i$ -го ПЭЭ к номинальной;  $k_{\text{М}_i}$  – коэффициент мощности  $i$ -го ПЭЭ согласно ТО.

Анализ технических характеристик ПЭЭ ПО свидетельствует о том, что в ТО в большинстве случаев не указаны необходимые параметры для расчета полной мощности ПЭЭ.

С этой целью все ПЭЭ ПО подразделены на следующие группы:

- 1) активная нагрузка (осветительные и нагревательные приборы);
- 2) активно-реактивная нагрузка (приводное оборудование, системы кондиционирования);
- 3) нелинейная нагрузка (аппаратура, имеющая в своем составе источники вторичного электропитания).

В случае, когда ПЭЭ относятся ко 2-й группе, полную мощность ПЭЭ следует определить согласно выражению [3]

$$S_{\text{ПЭЭ}_i} = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} = \frac{P_{\text{ПЭЭ}_i}}{\cos \varphi_i}, \text{ ВА}, \quad (5)$$

где  $P_i$  – активная мощность  $i$ -го ПЭЭ, Вт;  $Q_i$  – реактивная мощность  $i$ -го ПЭЭ, вар;  $\cos \varphi_i$  – принимается для конкретного ПЭЭ в пределах 0,7–0,9.

В случае, когда ПЭЭ относятся к 3-й группе, полную мощность отдельных ПЭЭ следует определить согласно выражению [3, 11]

$$S_{\text{ПЭЭ}_i} = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2 + D_i^2} = \frac{P_{\text{ПЭЭ}_i} \sqrt{1 + k_{\text{нс}U_i}^2} \sqrt{1 + k_{\text{нс}I_i}^2}}{\cos \varphi_i}, \text{ ВА}, \quad (6)$$

где  $D_i$  – мощность искажения  $i$ -го ПЭЭ, ВА;  $k_{\text{нс}U_i}$  – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $i$ -го ПЭЭ;  $k_{\text{нс}I_i}$  – коэффициент искажения синусоидальности кривой тока  $i$ -го ПЭЭ.

Для более точного установления полной мощности ПЭЭ или в случае, когда не представляется возможным определить тип ПЭЭ, расчет полной мощности ПЭЭ проводится через гармонический состав тока и напряжения системы САЭС–ПЭЭ по реализациям кривых мгновенных значений тока и напряжения, потребляемого ПЭЭ от сети безграничной мощности, согласно выражению

$$S_{\text{ПЭЭ}} = \sqrt{\left( \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos(\varphi_n) \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin(\varphi_n) \right)^2} + \frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (u_m(t) i_n(t) - i_m(t) u_n(t))^2 dt, \quad (7)$$

где  $T$  – период напряжения основной частоты;  $U_n, I_n$  – амплитудные значения гармонических составляющих напряжения на выходных зажимах фазы САЭС и тока нагрузки соответственно;  $u_n(t), i_n(t)$  – мгновенные значения гармонических составляющих напряжения и тока;  $\varphi_n$  – разность фаз между  $n$ -ми гармоническими составляющими напряжения на выходных зажимах фазы САЭС и тока нагрузки.

В результате полная потребляемая мощность ПО рассчитывается согласно выражению

$$S_{\text{ПО}} = P_{\text{ПЭЭ}_I} + S_{\text{ПЭЭ}_II} + S_{\text{ПЭЭ}_III}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{ПЭЭ}_I}$  – суммарная активная мощность ПЭЭ ПО 1-й группы, Вт;  $S_{\text{ПЭЭ}_II}$  – суммарная полная мощность ПЭЭ ПО 2-й группы, ВА;  $S_{\text{ПЭЭ}_III}$  – суммарная полная мощность ПЭЭ ПО 3-й группы, ВА.

В случае, когда в ТО на ПЭЭ не приводятся параметры, необходимые для расчета полной мощности, то  $k_m$  определяется экспериментальным путем для соответствующих групп ПЭЭ при электроснабжении ПО от источника ограниченной мощности [3].

Приведенные формулы расчета потребляемой мощности ПО позволяют точнее рассчитать мощность ПИ благодаря тому, что были учтены величина и форма токопотребления ПЭЭ в режиме работы ПО от источника ограниченной мощности.

На основании общепринятой практики проектирования САЭС мощность ПИ определяется с 10%-ным запасом от полученного значения полной потребляемой мощности ПО согласно выражению

$$S_{\text{ПИ}} = 1,1 \frac{S_{\text{ПО}}}{\eta}, \quad (9)$$

где  $\eta$  – к.п.д., учитывающий потери в кабельной линии САЭС.

**Оценка мощности первичного источника САЭС с учетом прогнозируемого графика нагрузки.** Расчет мощностей ПЭЭ в соответствии с рассмотренными способами приводит к выбору ПИ с многократно завышенной мощностью по отношению к фактически потребляемой. Это связано с тем, что большинство САЭС никогда не функционируют на полную потребляе-

мую мощность ПО, что подтверждается экспериментальными ГН и ожидаемой технологической схемой работы ПО на этапе проектирования. К примеру, одновременно не будут работать кондиционер с отопителем и т. п. Поэтому авторы предлагают корректировать оцененную мощность ПИ путем построения прогнозируемого ГН, что позволит наиболее точно обосновать мощность ПИ на этапе проектирования.

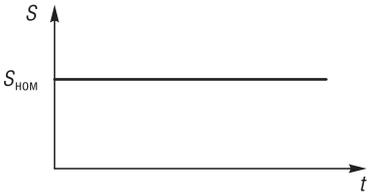
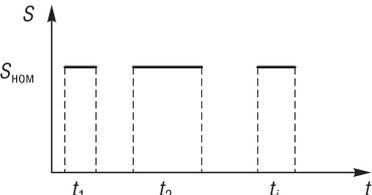
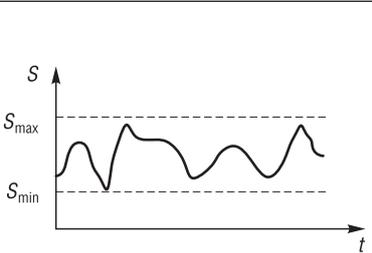
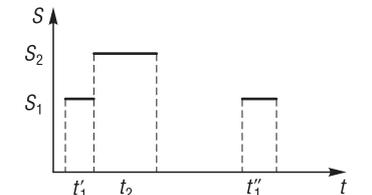
Построение прогнозируемого ГН ПО осуществляется на основании алгоритма и длительности функционирования отдельного ПЭЭ ПО.

Не всегда при модернизации ПО величина мощности ПЭЭ и характер электропотребления остаются прежними. Так, в случае замены ПЭЭ, алгоритма их функционирования или при проектировании новых ПО расчет прогнозируемого ГН должен осуществляться на основе статистических данных таблиц электрических нагрузок, составленных в результате анализа агрегатных листов САЭС или информации о потребляемой мощности ПЭЭ или ПО в целом согласно аппаратному журналу.

При расчете ГН ПО следует разгруппировать потребителей на ПЭЭ с переменной мощностью потребления и практически постоянной за цикл их функционирования. Представителями ПЭЭ переменной мощности являются электропривод, электроинструмент, элементы системы жизнеобеспечения ПО и т. п. К ПЭЭ постоянной мощности следует отнести осветительные приборы, аппаратуру обработки информации и т. п.

Способы расчета групповых ГН при одновременном функционировании нескольких ПЭЭ ПО и индивидуальных ГН при работе отдельных ПЭЭ представлены в таблице.

**Режимы функционирования отдельных ПЭЭ ПО**  
**The modes of operation of individual EEC MO**

Режим функционирования ПЭЭ	Временная диаграмма ГН отдельного ПЭЭ	Выражения для расчета ГН
Непрерывная работа с постоянной нагрузкой		$m(S) = S_{\text{ном}}$ $D(S) = 0$
Периодическая работа с постоянной нагрузкой в течение $t$ часов в сутки		$t = \sum t_i$ $m(S) = S_{\text{ном}} \frac{t}{T}$ $D(S) = \frac{S^2 t (T - t)}{T^2}$
Непрерывная работа с переменной нагрузкой		$m(S) = \frac{S_{\text{min}} + S_{\text{max}}}{2}$ $D(S) = \frac{(S_{\text{max}} - S_{\text{min}})^2}{12}$ (с равномерной плотностью) $D(S) = \frac{(S_{\text{max}} - S_{\text{min}})^2}{36}$ (по нормальному закону)
Периодическая работа с дискретными ступенями нагрузки $S_i$ в течение $t_i$ часов каждая		$t_1 = t'_1 + t''_1$ $m(S) = \frac{\sum S_i t_i}{T}$ $D(S) = \frac{\sum S_i^2 t_i (T - t_i)}{T^2}$

Однако таких характеристик, как математическое ожидание и дисперсия, недостаточно для описания внутренней структуры ГН в качестве нестационарного случайного процесса, так как они не отражают, насколько ГН носит резкопеременный или плавно изменяющийся характер. Поэтому для увеличения точности расчетов при проектировании САЭС применяется автокорреляционная функция, которая характеризует степень зависимости между сечениями ГН. Но расчет ГН таким способом возможен только при наличии вероятностных показателей функционирования ПЭЭ ПО, что затруднительно ввиду многообразия способов применения ПЭЭ и предназначения ПО.

Информация о величине потребляемой мощности и длительности функционирования отдельных ПЭЭ или ПО в целом носит статистический характер в виде числовых последовательностей временных рядов и представляется матрицей вида [8]

$$S(l, k) = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1k} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2k} \\ \dots & S_{zj} & \dots & \dots \\ S_{l1} & S_{l2} & \dots & S_{lk} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $k$  – количество реализаций  $S$  на рассматриваемом временном интервале;  $l$  – количество значений, представляющих одну реализацию  $S$  на рассматриваемом временном интервале.

Под временным интервалом для плавно изменяющегося суточного ГН принимается длительность в 0,5; 1 или 2 ч, а в случае резкопеременного ГН – временной интервал, кратный минимальной длительности неизменной величины мощности.

Тогда расчетные выражения для оценки математического ожидания, дисперсии и нормированной автокорреляционной функции ГН принимают вид:

$$m_S(t) = \frac{1}{k} \sum_{z=1}^k S_{tz}, \quad (11)$$

$$D_S(t) = \frac{1}{k-1} \sum_{z=1}^k [S_{tz} - m_S(t)]^2, \quad (12)$$

$$\rho_S(t_1; t_2) = \frac{1}{(k-1)\sigma_S(t_1)\sigma_S(t_2)} \sum_{z=1}^k [S_{t_1z} - m_S(t_1)][S_{t_2z} - m_S(t_2)], \quad (13)$$

где  $\sigma_S(t)$  – среднеквадратическое отклонение значения ГН в момент времени  $t$ .

С целью упрощения построения ГН период функционирования ПО следует разбивать на характерные этапы: развертывание, свертывание, работа по предназначению и т. п., которые определяются однородностью токопотребления. На основании этого случайный процесс  $S(t)$  называется стационарным, параметры которого для характерных этапов функционирования ПО могут быть рассчитаны согласно следующим выражениям:

$$m_S = \frac{1}{l} \sum_{t=1}^l S(t), \quad (14)$$

$$D_S = \frac{1}{l-1} \sum_{t=1}^l [S(t) - m_S]^2, \quad (15)$$

$$\rho_S(\tau) = \frac{1}{(l-1)D_S} \sum_{t=1}^{l-\tau} [S(t) - m_S][S(t+\tau) - m_S], \quad (16)$$

где  $\tau$  – длительность характерного этапа функционирования ПО.

В результате численное значение расчетной нагрузки  $S$  для характерных этапов функционирования ПО в случае нормального закона распределения можно найти в соответствии с (17):

$$S = m_S + \beta\sigma_S, \quad (17)$$

где  $\beta$  – значение стандартной нормальной случайной величины [8].

В случае неоднородности токопотребления на характерных этапах функционирования ПО периодичность работы ПЭЭ имеет следующие параметры:

- длительность работы  $i$ -го ПЭЭ на  $q$ -м характерном этапе функционирования ПО ( $\tau_{iq_{\text{раб}}}$ );
- коэффициент использования номинальной мощности  $S_{i_{\text{ном}}}$   $i$ -м ПЭЭ на  $q$ -м характерном этапе функционирования ПО ( $k_{n_i}^q$ );
- номинальная мощность  $i$ -го ПЭЭ.

Если при прогнозировании ГН рассматривать двухуровневый вид нагрузки  $i$ -го ПЭЭ, то согласно закону распределения Бернулли вероятности возможных комбинаций одновременного функционирования ПЭЭ определяются по системе выражений [9]

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{0q} = \prod_{i=1}^n \frac{\tau_{iq} - \tau_{iq_{\text{раб}}}}{\tau_{iq}} \\ p_{gq} = \frac{\tau_{gq_{\text{раб}}}}{\tau_{gq}} \prod_{i=1; i \neq g}^n \frac{\tau_{iq} - \tau_{iq_{\text{раб}}}}{\tau_{iq}} \\ p_{(xg)q} = \prod_{p=x, g} \frac{\tau_{pq_{\text{раб}}}}{\tau_{pq}} \prod_{i=1; i \neq x; i \neq g}^n \frac{\tau_{iq} - \tau_{iq_{\text{раб}}}}{\tau_{iq}}, \\ \dots \\ p_{nq} = \prod_{i=1}^n \frac{\tau_{iq_{\text{раб}}}}{\tau_{iq}} \end{array} \right. \quad (18)$$

где  $\tau_{iq}$  – длительность  $q$ -го характерного этапа функционирования ПО.

В результате величина мощности для каждой возможной комбинации ПЭЭ находится с помощью системы выражений

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{0q} = \sum_{i=1}^n S_{0i} \\ S_{gq} = k_{n_g}^q S_{g_{\text{ном}}} + \sum_{i=1}^n S_{0i} \\ S_{(xg)q} = \sum_{p \neq x, g} k_{n_p}^q S_{p_{\text{ном}}} + \sum_{i=1}^n S_{0i} \\ \dots \\ S_{nq} = \sum_{p=1}^n k_{n_p}^q S_{p_{\text{ном}}} + \sum_{i=1}^n S_{0i} \end{array} \right. \quad (19)$$

На основе анализа прогнозируемого ГН мощность ПИ определяется следующим образом:

$$S_{\text{ПИ}} = \frac{1,3S_{\text{max гр.н}}}{\eta}, \quad (20)$$

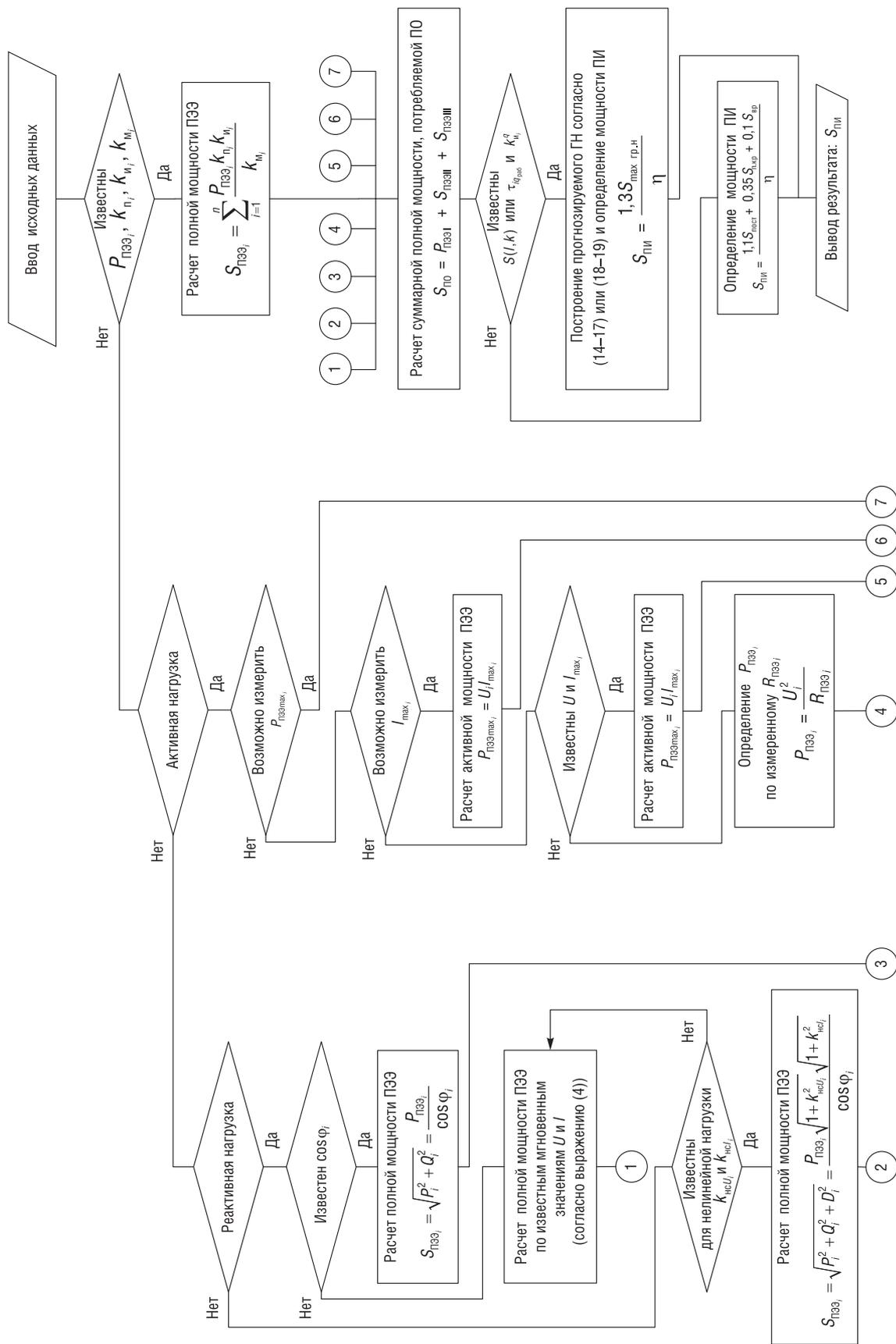
где  $S_{\text{max гр.н}}$  – максимальное значение мощности прогнозируемого ГН ПО.

В случае, когда отсутствует возможность построить прогнозируемый ГН с резкопеременным характером токопотребления, расчет мощности ПИ следует производить на основе опыта проектирования электрических машин [4]:

$$S_{\text{ПИ}} = \frac{1,1S_{\text{пост}} + 0,35S_{\text{п.кр}} + 0,1S_{\text{вр}}}{\eta}, \quad (21)$$

где  $S_{\text{пост}}$  – полная мощность постоянно включенных ПЭЭ;  $S_{\text{п.кр}}$  – полная мощность ПЭЭ, включаемых повторно-кратковременно;  $S_{\text{вр}}$  – полная мощность ПЭЭ, включаемых кратковременно.

Блок-схема алгоритма методики определения мощности ПИ представлена на рисунке.



Блок-схема алгоритма методики определения мощности ПИ  
Block diagram of the algorithm for determining the power of PS

**Заклучение.** Предложенный подход оценки мощности ПИ электрической энергии в САЭС ПО позволяет определить полную мощность ПЭЭ в условиях ограниченной информации о нем с учетом характера ГН, а также величины и формы токопотребления. Согласно приведенной методике мощность ПИ ПО может быть снижена на 13–45 % в зависимости от характера нагрузки при сохранении показателей качества питающего напряжения в допустимых пределах.

Рассмотренные способы определения мощности ПИ САЭС позволяют определить ограничения для решения задачи структурно-параметрического синтеза САЭС [5, 7, 10] и алгоритма определения мощности ПИ при разработке новой или модернизации существующей САЭС ПО. Это дает возможность снизить массогабаритные параметры САЭС, тем самым повысить скоростные характеристики, маневренные возможности и показатели проходимости ПО, а также длительность автономной работы и экономичность функционирования САЭС.

### Список использованных источников

1. Состояние и перспективы развития систем электроснабжения и средств вторичного электропитания объектов вооружения и военной техники: материалы третьего Всерос. науч.-техн. семинара: сб. докл. / М-во обороны РФ, 22 Центр. науч.-исслед. испыт. ин-т. – М., 1996. – 149 с.
2. Требования к унифицированным модулям питания для систем электроснабжения мобильных объектов [Электронный ресурс] // Научно-производственный центр «Технологическая лаборатория». – 2015. – Режим доступа: <http://www.techlab.ru/pub> – Дата доступа: 13.02.2015.
3. Чумаков, С. А. Обеспечение качества электрической энергии в системах электроснабжения автономных объектов / С. А. Чумаков, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – №2 (47). – С. 151–160.
4. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов. – М.: Энергия, 1964. – 480 с.
5. Каркоцкий, Д. В. Анализ методов оптимизации структуры автономных систем электроснабжения объектов вооружения и военной техники. Постановка задачи / Д. В. Каркоцкий, А. Н. Малашин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2015. – №1. – С. 68–76.
6. Зиновьев, Г. С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров / Г. С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 667 с.
7. Разработка методики аналитического определения мощности первичного источника электрической энергии для системы электроснабжения автономного образца вооружения: отчет о НИР / УО «Военная академия Республики Беларусь»; рук. А. Н. Малашин. – Минск, 2016. – 72 с.
8. Гужов, Н. П. Системы электроснабжения: учебник / Н. П. Гужов, В. Я. Ольховский, Д. А. Павлюченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 258 с.
9. Лазарев, И. А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов / И. А. Лазарев. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
10. Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи: отчет о НИР / «Военная академия Республики Беларусь»; рук. А. Н. Малашин. – Минск, 2018. – 247 с.
11. McGranaghan, M. Active filter design and specification for control of harmonics in industrial and commercial facilities [Electronic Resource] / M. McGranaghan. – Mode of access: <https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/active-filterdesign-specs-harmonics.pdf>

### References

1. Ministry of Defense of the Russian Federation, 22 Central Research Testing Institute. *The State and Prospects of Development of Power Supply Systems and Means of Secondary Power Supply of Weapons and Military Equipment: Collection of Reports Materials of the Third All-Russian Scientific and Technical Seminar*. Moscow, 1996. 149 p. (in Russian).
2. Requirements for unified power supply modules for power supply systems of mobile objects. *Scientific-Production Center "Technological Laboratory"*, 2015. Available at: <http://www.techlab.ru/pub> (accessed 13 February 2015).
3. Chumakov S. A., Malashin A. N., Sukhodolov Yu. V. Ensuring the quality of electric energy in the systems of power supply of autonomous objects. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2015, no. 2 (47), pp. 151–160 (in Russian).
4. Balagurov V. A., Galteev F. F., Larionov A. N. *Electric Machines with Permanent Magnets*. Moscow, Energy Publ., 1964. 480 p. (in Russian).
5. Karkotsky D. V., Malashin A. N. Analysis of methods for optimizing the structure of autonomous power supply systems for weapons and military equipment. Problem statement. *Vestnik Voennoi akademii Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2015, no. 1, pp. 68–76 (in Russian).
6. Zinoviev G. S. *Power Electronics*. 5<sup>th</sup> ed. Moscow, Yurait Publ., 2012. 667 p. (in Russian).
7. Malashin A. N. (hands). *Development of methods for the analytical determination of the power of the primary source of electrical energy for the power supply system of an autonomous sample of armament: report on research and development work of the Military Academy of the Republic of Belarus*. Minsk, 2016. 72 p. (in Russian).

8. Guzhov N. P., Olkhovsky V. Ya., Pavlyuchenko D. A. *Power Supply Systems*. Novosibirsk, Publishing house of the Novosibirsk State Technical University, 2008. 258 p. (in Russian).

9. Lazarev I. A. *Synthesis of the Structure of Power Supply Systems of Aircraft*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 256 p. (in Russian).

10. Malashin A. N. (hands). *Technical appearance of a promising system of power supply to field and mobile communication centers: report on research and development work of the Military Academy of the Republic of Belarus*. Minsk, 2018. 247 p. (in Russian).

11. McGranaghan M. *Active filter design and specification for control of harmonics in industrial and commercial facilities*. Available at: <https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/active-filterdesign-specs-harmonics.pdf>

### Информация об авторах

*Каркоцкий Дмитрий Валерьевич* – преподаватель, кафедра электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: karkotskidmitry@gmail.com

*Чумаков Сергей Алексеевич* – заместитель начальника кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chsa.2408@gmail.com

*Колчин Евгений Витальевич* – начальник цикла кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ihop52@bk.ru

*Коваль Юрий Георгиевич* – инженер-конструктор, отдел механики (сектор расчетов), ОАО «ВОЛАТАВТО» (ул. Кульман, 2-1, 220013, Минск Республика Беларусь). E-mail: koval-8891@rambler.ru

*Малашин Андрей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь)

### Information about the authors

*Dmitry V. Karkotski* – Teacher, Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karkotskidmitry@gmail.com

*Sergey A. Chumakov* – Deputy Head of Department, Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chsa.2408@gmail.com

*Yauheni V. Kolchyn* – Head of Department Chair, Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ihop52@bk.ru

*Yury G. Koval* – Design Engineer, Department of Structural Analysis, JSC “VOLATAVTO” (2-1, Kulman Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: koval-8891@rambler.ru

*Andrey N. Malashin* – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Professor of the Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus)