

УДК 621.3.072.85

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-126-131

Математическое обеспечение автоматических систем выравнивания мощностей модульных источников питания

А.В. Юдин, Е.А. Елисеичев, В.В. Юдин

Рассмотрен алгоритм управления модулями источника питания вакуумных электропечей по выращиванию искусственных монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса. Сложностью реализации подхода, когда из модулей путем их параллельного включения собирается источник нужной мощности, является неидентичность модулей и соединяющих их токопроводящих шин. В результате часть модулей работают в недогруженном режиме, а часть — с перегрузкой. Следовательно, помимо стабилизации суммарной мощности, выдаваемой источником, система автоматического управления должна минимизировать разность мощностей между модулями.

В основу работы алгоритма, обеспечивающего симметричный режим работы модулей, положено моделирование процессов в электротехническом комплексе, состоящем из модулей питания и системы токоподводящих шин, с учетом их параметров — активного сопротивления, индуктивности и взаимной индуктивности. Алгоритм реализован в среде MatLab. Результаты тестирования алгоритма показали снижение разницы мощностей между модулями источника питания более, чем в два раза.

Ключевые слова: модульные источники питания, выравнивание мощностей, взаимные индуктивности токоподводов, алгоритм оптимизации.

Для цитирования: Юдин А.В., Елисеичев Е.А., Юдин В.В. Математическое обеспечение автоматических систем выравнивания мощностей модульных источников питания // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 126—131. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-126-131.

Mathematical Support of Automatic Power Equalization Systems for Modular Power Sources

A.V. Yudin, E.A. Eliseichev, V.V. Yudin

An algorithm for controlling the modules of a power supply source of vacuum electric furnaces intended for growing artificial monocrystals of leucosapphire according to the Kyropoulos method is considered. Since the modules from which a source with the required capacity is assembled by connecting them in parallel are not exactly identical with one another, and so are the current conducting buses used to interconnect them, a situation may occur in which some of the modules are underloaded, while others are overloaded. Therefore, in addition to stabilizing the total power produced by the source, the automatic control system must minimize the power difference among the modules. An algorithm ensuring balanced operation of the modules is developed, which is based on modeling the processes in an electrical system consisting of power supply modules and current supply buses that take into account their parameters — resistance, inductance, and mutual inductance. The algorithm has been implemented in the MatLab environment. The algorithm testing results have shown that the power difference among the power supply modules is decreased by more than a factor of two.

Key words: modular power sources, power equalization, mutual inductances of current leads, optimization algorithm.

For citation: Yudin A.V., Eliseichev E.A., Yudin V.V. Mathematical Support of Automatic Power Equalization Systems for Modular Power Sources. Bulletin of MPEI. 2020;5:126—131. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-126-131.

Введение

В настоящее время существует тенденция замены источников питания на базе трансформаторов промышленной частоты на импульсный вариант. С целью снижения стоимости их выполняют в виде модулей мощностью 10...15 кВт, из которых собирают источник нужной мощности путем параллельного включения. Сложность реализации такого подхода заключается в неидентичности модулей и токопроводящих шин, соединяющих их. В результате часть модулей работает в недогруженном режиме, а часть — с перегрузкой. В [1] проведен анализ способов распределения нагрузки в модульных системах бесперебойного питания, а также возможностей расширения функционала и повышения КПД за счет равномерного распределения нагрузки,

автоматического резервирования источников и реализации адаптивной к нагрузке системы. В частности, показано, что выравнивание токов модулей с помощью реостатов или дросселей ведет к значительным потерям энергии в них. В [2] рассмотрена распределенная система питания с промежуточной шиной, развязка которой осуществляется с помощью диодов. Но такой подход применим только для относительно небольших величин токов. Активные методы выравнивания также имеют ряд недостатков. Так, в [3] предложена система распределения нагрузки между преобразователями, использующая принцип обратной связи. В ней токи, потребляемые инверторами, измеряются и поддерживаются на заданном уровне с помощью локальных ПИД-регуляторов. Недостатком подобной системы яв-

ляется опасность потери устойчивости, кроме того, не учитываются взаимные влияния модулей друг на друга, что может значительно снизить точность стабилизации тока [4].

Особенно сильно наблюдается снижение точности в программных системах автоматического управления, где изменение мощности (или тока) идет по заранее заданной программе (в форме кусочно-линейной функции). В этом случае, с целью повышения точности поддержания мощности, требуется увеличивать коэффициенты ПИД-регуляторов, что создает опасность потери устойчивости. Указанная проблема имеет достаточно сложное решение. В [5] даны подходы к согласованному управлению многоканальными термическими системами. Для уменьшения негативного воздействия перекрестных связей между каналами введены корректирующие звенья, параметры которых определяются физическими процессами в объекте управления. В [6] изучена двухконтурная система подчиненного регулирования модулями, в [7] предложено специальное схемное решение для балансировки напряжения модульного накопителя энергии для контактной микросварки, а в [8] рассмотрены схемотехнические решения для построения универсальных аппаратов регулирования, защиты и коммутации переменного-постоянного тока с модульной архитектурой.

В то же время элементы токоподводов обладают достаточно стабильным активно-индуктивным сопротивлением, которое может быть учтено, что позволяет рассчитать корректирующий сигнал на тот или иной модуль [9].

Постановка задачи

Задача выравнивания мощностей модульных источников питания может быть сведена к получению расчетного соотношения, связывающего мощность каждого из модулей с электрическими параметрами токоподводов.

Рассмотрим электротехнический комплекс, схема которого представлена на рис. 1. В его состав входит совокупность из n модулей питания с ЭДС e_1, e_2, \dots, e_n , нагруженных каждый на свою нагрузку с активным сопротивлением r_1, r_2, \dots, r_n . Примером подобного комплекса служит установка выращивания искусственных монокристаллов лейкосапфира [10, 11]. В ее состав входит высокотемпературный нагреватель, представляющий собой решетчатую конструкцию из вольфрамовых прутков — нагревательных элементов (НЭ), расположенных по наружной поверхности цилиндрического вольфрамового тигля.

Несмотря на простоту конструкции, в данной системе существует заметное электромагнитное взаимодействие [12]. В процессе работы токами, протекающими через нагрузки, создаются магнитные поля, что отражается на схеме совокупностью коэффициентов взаимной индукции m_{ij} , где $i, j \in [1, n]$. Элементы с единичными индексами соответствуют собственным паразитным индуктивностям НЭ и шинопроводов.

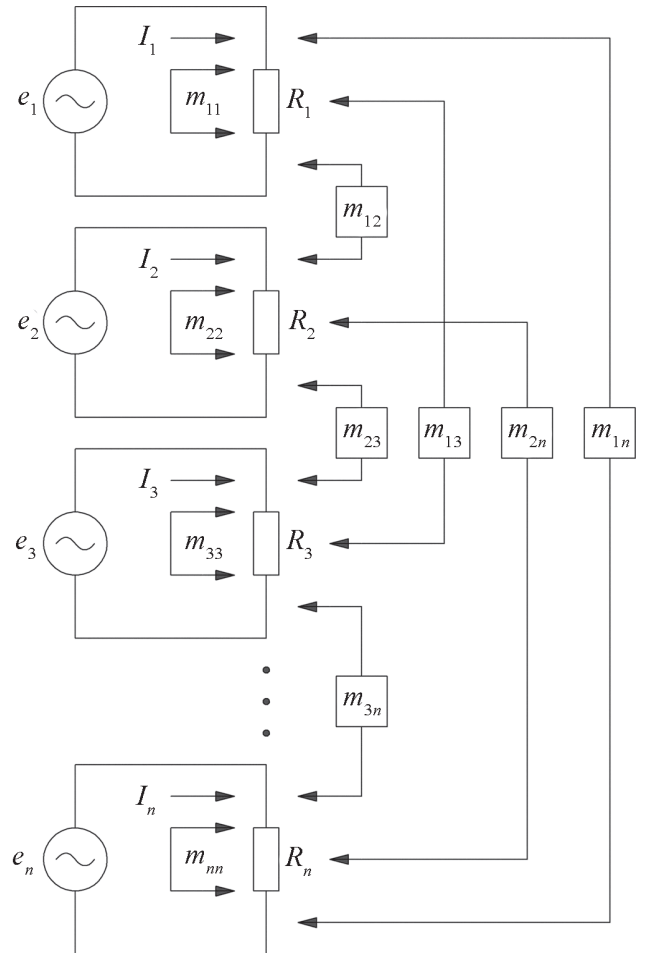


Рис. 1. Схема модульного комплекса питания

Для решения поставленной задачи воспользуемся матричным методом расчета электрической цепи (ЭЦ) [13]. В матричной форме процессы, протекающие в подобном комплексе, описываются формулой:

$$E = M \frac{dI}{dt} + RI, \tag{1}$$

где R, M — матрицы активных сопротивлений и взаимных индуктивных связей; E, I — векторы ЭДС и токов.

Метод решения и допущения

С целью упрощения записи уравнений выберем одинаковую нумерацию контуров и ветвей электрической цепи, получим:

$$E = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix}; I = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_n \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & r_n \end{pmatrix};$$

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{pmatrix}.$$

В процессе регулирования в цепи каждого из НЭ действует ЭДС с параметрами, зависящими от управляющих сигналов. Разложим ЭДС в ряд Фурье и в качестве допущения оставим в разложениях постоянные составляющие $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0n}$ и амплитуды $E_{11}, E_{01}, \dots, E_{1n}$ гармоник с частотой ω , положив, что:

$$E = E_0 + E_1 e^{j\omega t}, \tag{2}$$

где E_0, E_1 — векторы постоянных составляющих по модулям и амплитуд первых гармоник,

$$E_0 = \begin{pmatrix} E_{01} \\ E_{02} \\ \dots \\ E_{0n} \end{pmatrix}; E_1 = \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{12} \\ \dots \\ E_{1n} \end{pmatrix}.$$

Откликом ЭЦ на такое воздействие является совокупность постоянных составляющих тока $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0n}$ и амплитуд их гармоник $I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1n}$.

Таким образом, ток в ЭЦ определяется как:

$$I = I_0 + I_1 e^{j\omega t}. \tag{3}$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим выражение:

$$E_0 + E_1 e^{j\omega t} = RI_0 + j\omega MI_1 e^{j\omega t} + RI_1 e^{j\omega t}. \tag{4}$$

Приравняв в (4) члены с одинаковыми экспоненциальными множителями, получим, что ток для ЭЦ описывается выражениями:

$$I_0 = R^{-1}E_0; \tag{5}$$

$$I_1 = (j\omega M + R)^{-1}E_1. \tag{6}$$

Мощности в нагрузках P_1, P_2, \dots, P_n содержат составляющие, обусловленные постоянными $P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0n}$ и гармоническими $P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1n}$ составляющими, вследствие чего образуются векторы

$$P_0 = \begin{pmatrix} P_{01} \\ P_{02} \\ \dots \\ P_{0n} \end{pmatrix} = RI_0 * I_0; P_1 = \begin{pmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ \dots \\ P_{0n} \end{pmatrix} = RI_1 * \tilde{I}_1, \tag{7}$$

и с учетом (7) общая мощность выглядит как:

$$P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix} = P_0 + P_1 = RI_0 * I_0 + RI_1 * \tilde{I}_1, \tag{8}$$

где «*», «~» — операции поэлементного умножения и формирования комплексно-сопряженного вектора.

С учетом (5), (6), (8) получим формулу для мощностей постоянных составляющих:

$$P_0 = R(R^{-1}E_0) * (R^{-1}E_0) = \begin{pmatrix} \frac{E_{01}^2}{r_1} \\ \frac{E_{02}^2}{r_2} \\ \dots \\ \frac{E_{0n}^2}{r_n} \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Для мощностей гармонических составляющих получим выражение:

$$P_1 = R(R^{-1}E_1 + (j\omega M)^{-1}E_1) * (R^{-1}E_1 - (j\omega M)^{-1}E_1). \tag{10}$$

Выполним умножение комплексно-сопряженных выражений в (10):

$$P_1 = RE_1^2 (R^{-2} + \omega^{-2}M^{-2}). \tag{11}$$

Проведем над (11) ряд преобразований, а именно переведем R внутрь суммы, а затем умножим на R/R :

$$P_1 = E_1^2 (R^{-1} + R\omega^{-2}M^{-2}) = \frac{R}{R} E_1^2 (R^{-1} + R\omega^{-2}M^{-2}) = \frac{E_1^2}{R} (1 + R^2\omega^{-2}M^{-2}). \tag{12}$$

С учетом принятых соглашений по структуре матриц, входящих в выражение (12):

$$P_1 = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}^2}{r_1} \left[1 + \left(\frac{r_1}{\omega(M_{11} + M_{12} + \dots + M_{1n})} \right)^2 \right] \\ \frac{E_{12}^2}{r_2} \left[1 + \left(\frac{r_2}{\omega(M_{21} + M_{22} + \dots + M_{2n})} \right)^2 \right] \\ \dots \\ \frac{E_{1n}^2}{r_n} \left[1 + \left(\frac{r_n}{\omega(M_{n1} + M_{n2} + \dots + M_{nn})} \right)^2 \right] \end{bmatrix}.$$

Таким образом, из (9) — (11) следует, что:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{E_{01}^2}{r_1} + \frac{E_{11}^2}{r_1} \left[1 + \frac{r_1^2}{\omega^2 M^2(1,:)} \right] \\ \frac{E_{02}^2}{r_2} + \frac{E_{12}^2}{r_2} \left[1 + \frac{r_2^2}{\omega^2 M^2(2,:)} \right] \\ \dots \\ \frac{E_{0n}^2}{r_n} + \frac{E_{1n}^2}{r_n} \left[1 + \frac{r_n^2}{\omega^2 M^2(n,:)} \right] \end{bmatrix}, \tag{13}$$

где $M(k,;)$ — все элементы k -ой строки матрицы M в знаменателе (13).

Представим мощность на НЭ как:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{E_{01}^2 + E_{11}^2 q_1}{r_1} & \frac{E_{12}^2 q_2}{r_2} & \dots & \frac{E_{0n}^2 + E_{1n}^2 q_n}{r_n} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где

$$q_1 = 1 + \frac{r_1^2}{\omega^2 M^2(1,:)}; \quad q_2 = 1 + \frac{r_2^2}{\omega^2 M^2(2,:)}; \quad q_n = 1 + \frac{r_n^2}{\omega^2 M^2(n,:)}$$

— коэффициенты, характеризующие влияние паразитных индуктивностей.

Полученная зависимость (14) мощности постоянной составляющей и составляющей, обусловленной первой гармоникой ЭДС и параметров ЭЦ, может быть использована для коррекции управляющих кодов для модулей. Для этого достаточно рассчитать идеализированное и реальное состояния комплекса и выработать корректирующее воздействие.

Рассмотрим вариант коррекции на примере комплекса, смонтированного из трех самостоятельных силовых модулей. Активное сопротивление НЭ составляет 1 мОм, собственная индуктивность — 1 мкГн, в каждом силовом модуле постоянная составляющая напряжения — 10 В, а напряжение первой гармоники — 1 В. В идеализированном случае взаимная индуктивность между НЭ отсутствует. Матрица M имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} 1 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix}.$$

Распределение мощностей по каждому силовому модулю будет одинаковым и составит 11132 Вт на каждый модуль.

Изменим индуктивности токоподводов, а именно, на 20% увеличим общую индуктивность первого модуля и на 20% уменьшим индуктивность второго. Матрица индуктивных связей M будет выглядеть следующим образом:

$$M = \begin{pmatrix} 1,2 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0,8 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix}.$$

Распределение мощностей в этом случае изменится и составит 7216 Вт — для первого, 15616 Вт — для второго и 11132 Вт — для третьего модулей.

Выравнивание мощностей реализуется на основе анализа распределения мощностей по (14). Для это-

го формируется идеализированная гиперповерхность мощностей $P_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$ для заданного количества уровней регулирования m , также рассчитывается гиперповерхность мощностей с учетом реальных параметров токоподводов и их взаимного влияния $P_M(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Поэлементное вычитание многомерного массива P_0 из P_M позволяет получить гиперповерхность отклонений ΔP .

Рассмотрим пример для случая из трех модулей и 16 дискретных уровней дискретизации. В начальном состоянии коды управления равны для всех модулей $x_1 = x_2 = x_3 = 8$.

На рис. 2, а, б представлен срез гиперповерхностей для рассматриваемого примера по коду управления первым модулем x_1 .

Поскольку максимальное значение по вертикальной оси составляет порядка 10^4 (до 90 кВт), а разница мощностей не превышает 1 кВт (см. рис. 2, а), то кажется, что характеристики совпадают. На рис. 2, б, изображена разница в укрупненном масштабе.

Из гиперповерхности отклонений выделяют значения кодов управления, отвечающих требованию допустимого отклонения суммарной мощности модулей от требуемой номинальной мощности всего источника. На рисунке 3 дана поверхность для трех модулей и при допустимом отклонении мощности $\Delta P_{\max} = 0,01$ кВт.

Из данных рис. 3 видно, что нужное значение суммарной мощности можно получить различными способами, но при этом не во всех случаях будет обеспечено равномерное распределение мощностей между модулями. Поэтому из данного множества допустимых комбинаций кодов управления выбирается комбинация, соответствующая наименьшему отклонению

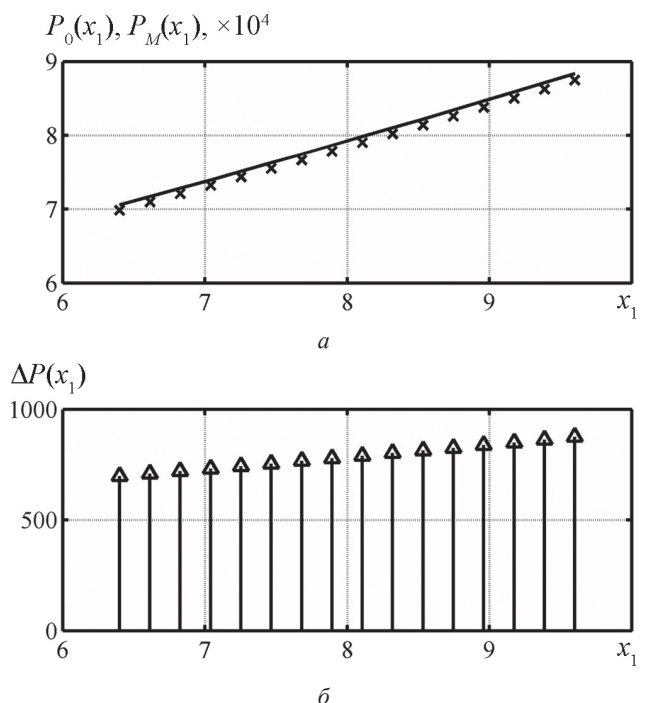


Рис. 2. Идеализированная (а) и реальная регулировочная (б) характеристики для первого модуля питания

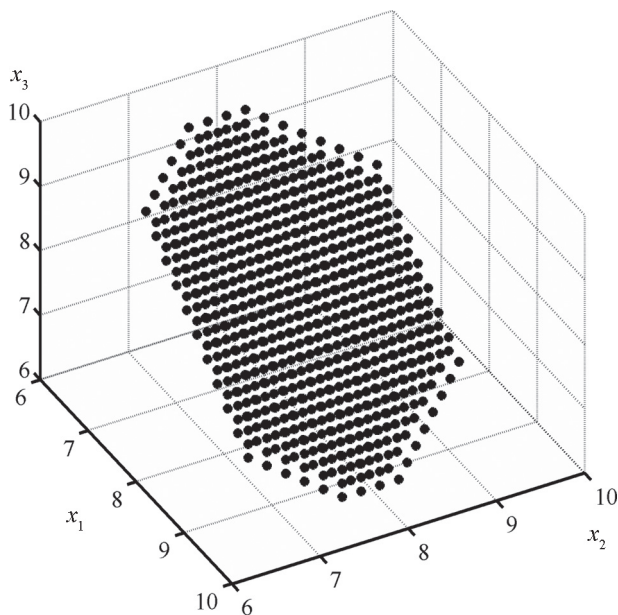


Рис. 3. Поверхность возможных комбинаций управления

Литература

1. **Щукин В.Г.** О способах распределения нагрузки между параллельно работающими инверторами // Практическая силовая электроника. 2017. № 2 (66). С. 44—48.
2. **Иванов Д., Кривченко И.** Модульная система питания для телекоммуникационных приложений // Компоненты и технологии. 2014. № 6. С. 32—33.
3. **Астапович Ю.М., Митяшин, Н.П., Билюков Р.А., Калистратов Н.А.** Автоматическое распределение нагрузки между параллельно работающими агрегатами // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. С. 197.
4. **Мирошник И.В.** Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб.: Питер, 2005.
5. **Юдин А.В.** Компенсация опосредованного влияния зон регулирования в многозонных объектах управления // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 6. С. 22—27.
6. **Кабилов В.А., Семенов В.Д.** Двухконтурная система подчиненного регулирования // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2019. Т. 1. № 1—1. С. 173—177.
7. **Кожушко Ю.В., Бондаренко А.Ф.** Балансировка напряжения модульного накопителя энергии источника питания для контактной микросварки // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. 2017. № 4—5. С. 15—23.
8. **Резников С.Б. и др.** Универсальные аппараты регулирования, защиты и коммутации переменного постоянного тока с модульной архитектурой для систем электроснабжения полностью электрифицированных самолетов // Практическая силовая электроника. 2014. № 2 (54). С. 15—20.

мощностей модулей. Для этих целей удобна функция вычисления среднеквадратического отклонения. Полный текст программы приведен в [14].

После выполнения алгоритма выдается управляющая комбинация $x_1 = 9$, $x_2 = 8$, $x_3 = 8$, обеспечивающая среднеквадратический разброс мощностей между модулями в 209 Вт, в то время как исходная комбинация дает разброс в 474 Вт.

Заключение

Пример реализации алгоритма показал снижение разницы мощностей между модулями более чем в два раза, что доказывает его потенциальную эффективность. Следует отметить, что она зависит от степени дискретизации по коду управления. Чем больше количество ступеней дискретизации, тем меньше разброс мощностей, но тем выше требования к вычислительным мощностям. В связи с этим практическая реализация алгоритма на локальных контроллерах систем управления маловероятна. Более перспективна его реализация в рамках клиент-серверной конфигурации.

References

1. **Shchukin V.G.** O Sposobakh Raspredeleniya Nagruzki Mezhdru Parallel'no Rabotayushchimi Invertorami. Prakticheskaya Silovaya Elektronika. 2017;2 (66):44—48. (in Russian).
2. **Ivanov D., Krivchenko I.** Modul'naya Sistema Pitaniya dlya Telekommunikatsionnykh Prilozheniy. Komponenty i Tekhnologii. 2014;6:32—33. (in Russian).
3. **Astapovich Yu.M., Mityashin, N.P., Bilyukov R.A., Kalistratov N.A.** Avtomaticheskoe Raspredelenie Nagruzki Mezhdru Parallel'no Rabotayushchimi Agregatami. Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya. 2013;1: 197. (in Russian).
4. **Miroshnik I.V.** Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. Lineynye Sistemy. SPb.: Piter, 2005. (in Russian).
5. **Yudin A.V.** Kompensatsiya Oposredovannogo Vliyaniya Zon Regulirovaniya v Mnogozonnykh Ob'ektakh Upravleniya. Avtomatizatsiya i Sovremennye Tekhnologii. 2009;6:22—27. (in Russian).
6. **Kabirov V.A., Semenov V.D.** Dvukhkoturnaya Sistema Podchinennogo Regulirovaniya. Sbornik Izbrannykh Statey Nauchnoy Sessii TUSUR. 2019;1;1—1: 173—177. (in Russian).
7. **Kozhushko Yu.V., Bondarenko A.F.** Balansirovka Napryazheniya Modul'nogo Nakopitelya Energii Istochnika Pitaniya dlya Kontaktnoy Mikrosvarki. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature. 2017;4—5: 15—23. (in Russian).
8. **Reznikov S.B. i dr.** Universal'nye Apparaty Regulirovaniya, Zashchity i Kommutatsii Peremennogo-postoyannogo Toka s Modul'noy Arkhitekturoy dlya Sistem Elektrosnabzheniya Polnost'yu Elektrifitsirovannykh Samoletov. Prakticheskaya Silovaya Elektronika. 2014;2 (54):15—20. (in Russian).

9. Манин А.В., Юдин А.В., Елисеичев Е.А. Блоч-но-модульный импульсный источник питания для высокотемпературного нагревателя с функцией контроля паразитных индуктивностей // Электронная техника. Серия 2. «Полупроводниковые приборы». 2017. № 1 (244). С. 37—44.

10. Пат. № 2555481 РФ. Установка для выращивания монокристаллов сапфира методом Киропулоса / А.В. Бородин, К.Н. Смирнов, ДБ. Ширяев // Бюл. изобрет. 2015. № 19.

11. Пат. № 141911 РФ. Шахтная вакуумная печь сопротивления / А.В. Белов и др. // Бюл. изобрет. 2014. № 17.

12. Юдин А.В. Электромагнитная модель многокомпонентного высокотемпературного нагревателя // Вестник ИГЭУ. 2011. № 5. С. 37—39.

13. Петров Ю.С., Масков С.П., Галкина О.Ю. Матричный анализ электрических цепей с взаимной индуктивностью // Труды СКГМИ (ГТУ). 2015. № 22. С. 113—121.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616468. Расчет кодов управления для выравнивания мощностей модульного источника питания / А.В. Юдин, Е.А. Елисеичев.

9. Manin A.V., Yudin A.V., Eliseichev E.A. Blochno-modul'nyy Impul'snyy Istochnik Pitaniya dlya Vysokotemperaturnogo Nagrevatelya s Funktsiyey Kontrolya Parazitnykh Induktivnostey. Elektronnyaya Tekhnika. Seriya 2. «Poluprovodnikovye Pribory». 2017;1 (244):37—44. (in Russian).

10. Pat. № 2555481 RF. Ustanovka dlya Vyrashchivaniya Monokristallov Sapfira Metodom Kiropulosa. A.V. Borodin, K.N. Smirnov, DB. Shiryayev. Byul. izobret. 2015;19. (in Russian).

11. Pat. № 141911 RF. Shakhtnaya Vakuumnaya Pech' Soprotivleniya. A.V. Belov i dr. Byul. Izobret. 2014;17. (in Russian).

12. Yudin A.V. Elektromagnitnaya Model' Mnogokomponentnogo Vysokotemperaturnogo Nagrevatelya. Vestnik IGEU. 2011;5:37—39. (in Russian).

13. Petrov Yu.S., Maskov S.P., Galkina O.Yu. Matrichnyy Analiz Elektricheskikh Tsepey s Vzaimnoy Induktivnost'yu. Trudy SKGMI (GTU). 2015;22:113—121. (in Russian).

14. Svidetel'stvo o Gosudarstvennoy Registratsii Programmy dlya EVM № 2019616468. Raschet Kodov Upravleniya dlya Vyravnivaniya Moshchnostey Modul'nogo Istochnika Pitaniya. A.V. Yudin, E.A. Eliseichev. (in Russian).

Сведения об авторах:

Юдин Алексей Викторович — доктор технических наук, заведующий кафедрой электротехники и промышленной электроники Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, Рыбинск, e-mail: judinav@mail.ru

Елисеичев Евгений Александрович — старший преподаватель кафедры электротехники и промышленной электроники Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, начальник сектора гражданской продукции Акционерного общества «Рыбинский завод приборостроения», Рыбинск, e-mail: eliseichev_e_a@mail.ru

Юдин Виктор Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и промышленной электроники Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, Рыбинск, e-mail: YudinVV47@mail.ru

Information about authors:

Yudin Aleksey V. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Electrical Engineering and Industrial Electronics Dept., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Rybinsk, e-mail: judinav@mail.ru

Eliseichev Evgeniy A. — Senior Lecturer of Electrical Engineering and Industrial Electronics Dept., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Head of Sector of Civil Production Joint Stock Company «Rybinsk Factory of Instrument Making», Rybinsk, e-mail: eliseichev_e_a@mail.ru

Yudin Viktor V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electrical Engineering and Industrial Electronics Dept., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Rybinsk, e-mail: YudinVV47@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 11.01.2020

The article received to the editor: 11.01.2020