

УДК 62-523.6

DOI: 10.30987/article_5cb58f51d8b1e2.80454148

А.В. Юдин, Е.А. Елисеичев, В.В. Юдин

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С КОНТРОЛЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА

Рассмотрена система регулирования переменного напряжения, учитывающая изменение спектрального состава. Предложен критерий близости спектров, основанный на понятии расстояния между сигналами. Разработан алгоритм работы системы управления регулятором, обеспечивающий минимальные изменения в спектре при необ-

ходимости изменения на нагрузке или при изменении напряжения в сети.

Ключевые слова: система управления, регулятор переменного напряжения, электротехнология, спектр, критерий близости, алгоритм управления.

A.V. Yudin, E.A. Yeliseychev, V.V. Yudin

ALTERNATING VOLTAGE CONTROL SYSTEM WITH SPECTRAL STRUCTURE CONTROL

The purpose of the work is development of the algorithm for the operation of a system to control alternating voltage ensuring minimum changes of a voltage spectral structure. It is necessary for precision electro-technologies such as growing mono-crystals in which high-frequency constituents in spectrum result in the uneven release of induced power into a melt.

The investigation methods are based on a computer simulation of alternating voltage control processes, for the analysis of a spectral structure there is used discrete Fourier transformation. The mathematical support developed for the system of control is realized in a matrix form.

A spectrum nearness criterion based on the idea of the distance between signals is offered. The algo-

rithm of the system work for regulator control ensuring minimum changes in the spectrum whenever necessary to change a load or at voltage changes in the circuit is developed.

The testing of the algorithm offered confirms its working capacity. Its realization requires considerable expenditures for initial data storage that confines a realization sphere of the control system by a type of industrial computers.

Key words: control system, alternating voltage regulator, electrotechnology, spectrum, nearness criterion, control algorithm.

Введение

При реализации той или иной электротехнологии используется источник питания, к которому предъявляется ряд требований к КПД и точности регулирования. Для повышения КПД стремятся регулировать переменное напряжение без его выпрямления. Точность регулирования обеспечивается применением автоматических систем регулирования. При этом особых требований к спектру сформированного напряжения, как правило, не предъявляется.

Исключение составляет технология выращивания монокристаллов лейкосапфира методом Киропулуса. Так, в [1] показано, что на установке «Апекс» в режиме роста на частоте первой гармоники спек-

тра 50 Гц удельная мощность, выделяемая в расплаве, составляет 33 Вт/м³. Аналогично для третьей гармоники (150 Гц) – 25 Вт/м³. Для пятой гармоники это значение составляет 6 Вт/м³ соответственно. При этом общая подводимая к расплаву мощность составляет примерно 25000 Вт/м³. Индуцированные мощности достаточно малы по сравнению с общей подводимой мощностью, но и требования к точности поддержания температуры на фронте кристаллизации очень высоки. Кроме того, высокочастотные составляющие в спектре мощности нагревателя по мере проникновения в расплав поглощаются в большей степени, чем низкочастотные, что приводит к неравномерному вы-

делению индуцированной мощности в расплав по мере удаления от нагревателя и еще большему искривлению фронта кристаллизации. Все это требует учета изменения спектрального состава при регулировании напряжения на нагревателе.

В настоящее время при проектировании систем управления наметилась тенденция к повышению степени их интеллектуализации. Применяются численные алгоритмы настроек регуляторов [2], син-

тез регуляторов производится с учетом конструктивных и физических особенностей объектов управления [3], применяются сложные алгоритмы поиска оптимальных решений [4]. Не остаются в стороне и системы управления силовыми установками [5]. С учетом обозначенных тенденций рассмотрим подходы к построению интеллектуальной системы регулирования переменного напряжения.

Расстояние между спектрами

Прежде всего необходимо определить критерий качества работы такой системы. Введем понятие расстояния между сигналами (спектрами). Рассмотрим два

процесса, характеризующиеся изменениями параметров $x(t)$ и $y(t)$ с периодом T_R . Определим расстояние между ними в виде следующего функционала:

$$D(x, y) = \sqrt{\frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} [x(t) - y(t)]^2 dt}. \quad (1)$$

Из (1) следует

$$D(x, y) = \sqrt{\frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} x^2(t) dt - \frac{2}{T_R} \int_0^{T_R} x(t)y(t) dt + \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} y^2(t) dt}. \quad (2)$$

Первое и третье слагаемые в (2) соответствуют действующим значениям процессов

$$x_d = \sqrt{\frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} x^2(t) dt}, \quad (3)$$

$$y_d = \sqrt{\frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} y^2(t) dt}. \quad (4)$$

Из (2), (3) и (4) следует

$$D^2(x, y) = x_d^2 + y_d^2 - \frac{2}{T_R} \int_0^{T_R} x(t)y(t) dt. \quad (5)$$

Предложенный критерий имеет следующие особенности:

1. Идентичным процессам, когда выполняется условие $x(t) = y(t)$, соответствует нулевое значение критерия:

$$D(x, x) = 0.$$

2. При отсутствии первого процесса критерий равен действующему значению второго процесса и наоборот:

$$D(0, y) = y_d \quad \text{и} \quad D(x, 0) = x_d.$$

3. Не зависит от порядка следования аргументов:

$$D(x, y) = D(y, x).$$

Представим (5) в следующем виде:

$$D^2 = x_d^2 + y_d^2 - 2x_d y_d \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} \frac{x(t)y(t)}{x_d y_d} dt. \quad (6)$$

Полученное соотношение (6) соответствует теореме косинусов для пространства функций:

$$D^2 = x_d^2 + y_d^2 - 2x_d y_d \cos(\gamma). \quad (7)$$

Здесь γ – угол между функциями, определяемый формулой

$$\cos(\gamma) = \cos(x, y) = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} \frac{x(t)y(t)}{x_d y_d} dt. \quad (8)$$

Как следует из (7), для процессов с заданными значениями мощностей (при фиксированных уровнях x_d и y_d) угол γ может выступать в качестве критерия близости процессов.

Он имеет следующие особенности:

1. Определяется безразмерными относительными уровнями параметров и сам является безразмерной величиной:

$$\cos(x, y) = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} \left[\frac{x(t)}{x_d} \right] \left[\frac{y(t)}{y_d} \right] dt.$$

2. По своей форме он соответствует выражению для коэффициента корреляции двух случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями. Поэтому его

значения принадлежат диапазону $[-1, 1]$. С учетом особенности задачи, ориентированной на близкие законы изменения $x(t)$ и $y(t)$, получим

$$0 \leq \cos(x, y) \leq 1.$$

Большому значению критерия соответствует большая степень близости процессов. Нулевое значение критерия свидетельствует об отсутствии связи между процессами.

3. Для тождественных и пропорциональных процессов критерий равен единице:

$$\cos(x, x) = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} \frac{x^2(t)}{x_d^2} dt = \frac{1}{x_d^2} \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} x^2(t) dt = 1, \tag{9}$$

$$\cos(x, ax) = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} \frac{x(t)ax(t)}{x_d ax_d} dt = \frac{1}{x_d^2} \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} x^2(t) dt = 1, \tag{10}$$

где a – коэффициент пропорциональности.

Рассмотренный критерий рассчитан на применение к сигналам во временной области. В то же время любому периодическому сигналу может быть поставлен в соответствие определенный частотный спектр. Распространим ранее рассмотренные результаты на спектры напряжения, считая величины x и y векторами, содержащими спектры сигналов $x(t)$ и $y(t)$.

Параметры $x(t)$ и $y(t)$ реального технологического процесса при этом заменя-

ются совокупностями N дискретных значений $x=[x_1 x_2 \dots x_N]$ и $y=[y_1 y_2 \dots y_N]$, соответствующих фиксированным моментам времени $t=[t_1 t_2 \dots t_N]$, где все значения вектора t принадлежат интервалу $[0, T_R]$.

В том случае, когда все моменты времени распределены на интервале равномерно с шагом

$$\Delta t = T_R/N, \tag{11}$$

критерий (8) примет вид

$$\cos(x, y) = \frac{1}{T_R} \sum_{k=1}^N \frac{x_k y_k}{x_d y_d} \frac{T_R}{N} = \frac{1}{x_d y_d} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k y_k \right). \tag{12}$$

Воспользуемся матричными формами записи. Для сомножителя в круглых скобках (12) имеем

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k y_k = \frac{1}{N} xy^T. \tag{13}$$

По аналогии для действующих значений из (3) и (4) получим

$$x_d = \sqrt{\frac{xx^T}{N}}, \quad y_d = \sqrt{\frac{yy^T}{N}}. \tag{14}$$

С учетом (13) и (14) из (12) найдем

$$\cos(\gamma) = \cos(x, y) = \frac{xy^T}{\sqrt{xx^T yy^T}}. \tag{15}$$

Воспользуемся дискретным преобразованием Фурье для формирования векторов X и Y , содержащих комплексные амплитуды гармоник [6]. При условии, что

исходные данные представлены в виде вектора-строки, преобразование примет вид

$$X^T = Ax^T, Y^T = Ay^T \text{ или } X = xA^T, Y = yA^T, \tag{16}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{N}} & e^{-j\frac{4\pi}{N}} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-1)} \\ 1 & e^{-j\frac{4\pi}{N}} & e^{-j\frac{8\pi}{N}} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{N}2(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-1)} & e^{-j\frac{2\pi}{N}2(N-1)} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-1)^2} \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Из (16) можно выразить

$$x^T = A^{-1}X^T, \quad y^T = A^{-1}Y^T. \tag{18}$$

Подставив (18) в (15), получим

$$\cos(\lambda) = \frac{X(A^T)^{-1}A^{-1}Y^T}{\sqrt{X(A^T)^{-1}A^{-1}X^T Y(A^T)^{-1}A^{-1}Y^T}} \tag{19}$$

или

$$\cos(\lambda) = \frac{XaY^T}{\sqrt{XaX^T YaY^T}}, \tag{20}$$

где

$$a = (A^T)^{-1}A^{-1}. \tag{21}$$

Тогда из (6) с учетом (21) найдем

$$\cos(\lambda) = \frac{xA^T a(yA^T)^T}{\sqrt{xA^T a(xA^T)^T (yA^T)a(yA^T)^T}} = \frac{xA^T aAy^T}{\sqrt{xA^T aAx^T yA^T aAy^T}}. \tag{22}$$

Таким образом, получим следующее выражение косинуса через спектр:

$$\cos(\lambda) = \frac{xBy^T}{\sqrt{xBx^T yBy^T}}, \tag{23}$$

где

$$B = A^T aA \tag{24}$$

или, с учетом (7),

$$B = A^T aA = A^T(A^T)^{-1}A^{-1}A. \tag{25}$$

Алгоритм управления

Возможность применения полученного критерия определяется реализуемым способом регулирования переменного напряжения. В настоящее время развиваются системы с импульсным регулированием [7; 8], разработаны математические модели подобных систем. Рассмотрим случай регулирования переменного напряжения, при котором задается время начала модуляции (открытие силового ключа t_n) и время окончания модуляции (закрытие силового ключа t_k) [9]. Такой способ регулирования

требует применения полностью управляемых ключей (IGBT-транзисторов), но дает возможность оптимизации режимов управления. Рассмотрим два случая: 1) $t_n = 3$ мс и $t_k = 8$ мс (рис. 1а); 2) $t_n = 3,3$ мс и $t_k = 9$ мс (рис. 1б). В обоих случаях действующее значение напряжения одинаково и составляет 7,6 В, но спектральный состав напряжения при этом, как показано на рисунке, отличается (степень близости спектров по критерию (23) составляет 0,94).

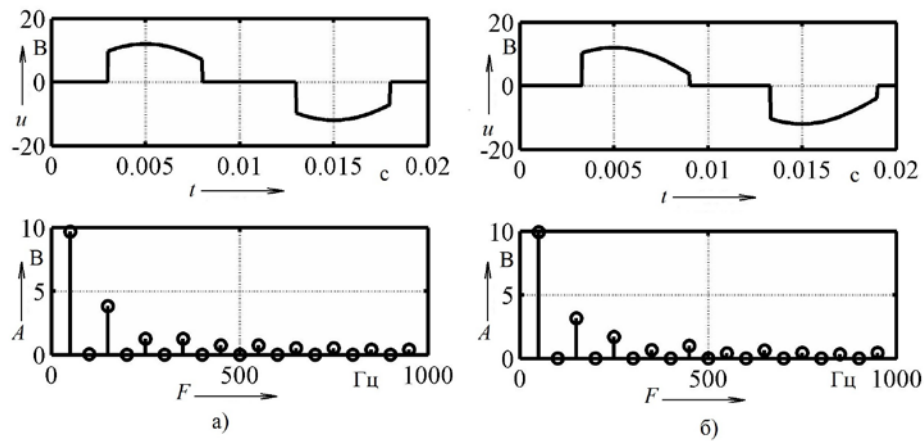


Рис. 1. Различные спектры при одном уровне действующего значения напряжения:
 а - $t_n = 3$ мс и $t_k = 8$ мс; б - $t_n = 3,3$ мс и $t_k = 9$ мс

Циклическим перебором всех возможных сочетаний t_n и t_k может быть построена поверхность действующих значений, представленная на рис. 2. Может быть использован и более сложный алгоритм поиска точки на параметрической поверхности, например изложенный в [10]. Причем поверхность построена для фиксированного значения входного напряжения. В качестве такого значения целесообразно принять номинальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора. При изменении амплитуды входного напряжения форма выходного напряжения не изменяется, поскольку не меняются моменты коммутации. То есть соотношение между спектральными составляющими сигнала не изменяется, все гармоники изменяются

пропорционально изменению входного напряжения. Это дает основание утверждать, что с учетом теоремы Парсеваля действующее значение напряжения также изменится пропорционально. Другими словами, при изменении входного напряжения поверхность (рис. 2) деформируется пропорционально. Это легко показать с помощью простого модельного эксперимента. Для этого достаточно рассчитать поверхности при различных уровнях амплитуды и сравнить их. Так, например, если рассчитать поверхности для амплитуд 12 и 10 В и последнюю умножить на масштабный коэффициент $K=12/10$, то разница между значениями поверхностей не превысит 10^{-14} .

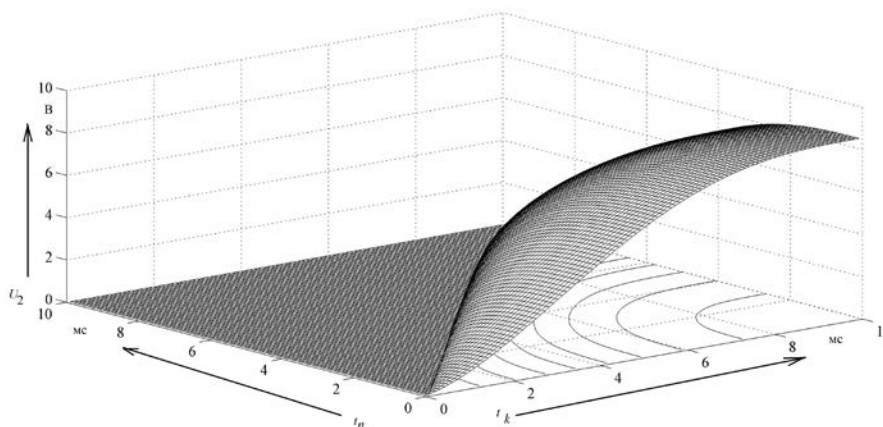


Рис. 2. Номинальная поверхность действующих значений

Аналогичные поверхности для амплитуд 1, 3 и 5 гармоник представлены на рис. 3.

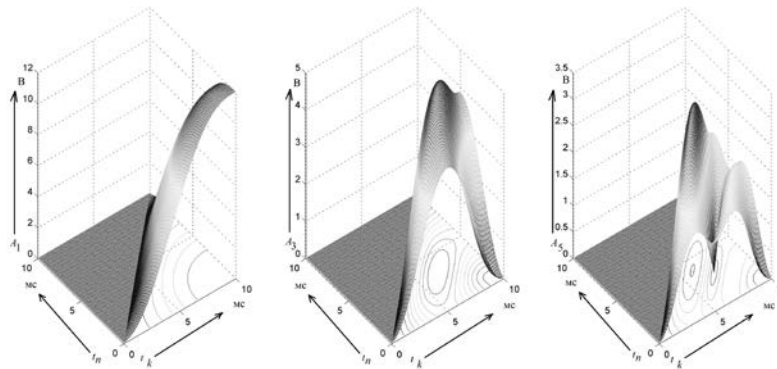


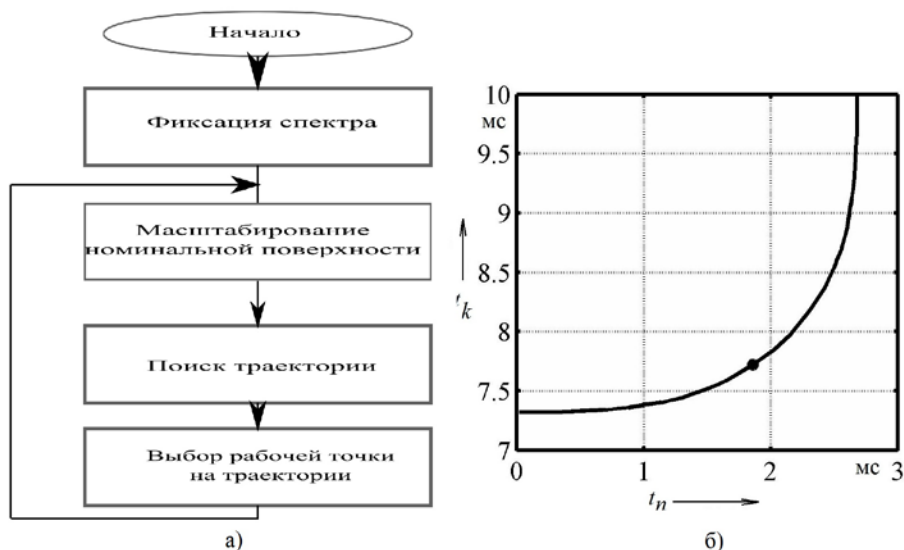
Рис. 3. Поверхности амплитуд гармоник

Поскольку необходимость стабилизации спектра при регулировании связана с определенным технологическим этапом выращивания монокристаллов, а именно с переходом от режима подбора температуры (затравление) к режиму роста, то и запуск алгоритма целесообразно производить именно в этот момент. Оператор, запуская в системе управления режим роста, дает команду на измерение и фиксацию спектрального состава напряжения, который в дальнейшем будет поддерживаться САР. Здесь же определяется стартовая траектория стабилизации и рабочая точка на ней. Общий алгоритм работы системы приведен на рис. 4а.

Алгоритм работы системы регулирования сводится к отысканию набора координат, соответствующего заданному значению действующего напряжения на по-

верхности (траектория стабилизации напряжения). Сделать это можно циклическим перебором индексов I и J , ранее рассчитанных значений действующего напряжения U_2 и отбором удовлетворяющих условию попадания в заданный допуск по напряжению. Задание допуска необходимо, поскольку построенная зависимость напряжения от моментов времени коммутации является дискретной и точное совпадение искомого значения с расчетным маловероятно.

Графически результат работы программы для случая $U_2 = 8$ В при допуске 1 мВ и номинальном значении $U_1 = 12$ В отражен на рис. 4б. На нем также отражена произвольно заданная рабочая точка с координатами $t_n = 1,83$ мс и $t_k = 7,72$ мс. Для рабочей точки фиксируется спектральный состав.

Рис. 4. Алгоритм работы системы (а) и стартовая рабочая траектория ($U_2 = 8$ В и $U_1 = 12$ В) (б)

При необходимости перехода на другой уровень напряжения, например на 8,1 В, производится нахождение нового набора координат. На рис. 5а приведен результат работы алгоритма для такого случая. Для этого набора координат перебираются все возможные варианты спектрального состава и сравниваются с ис-

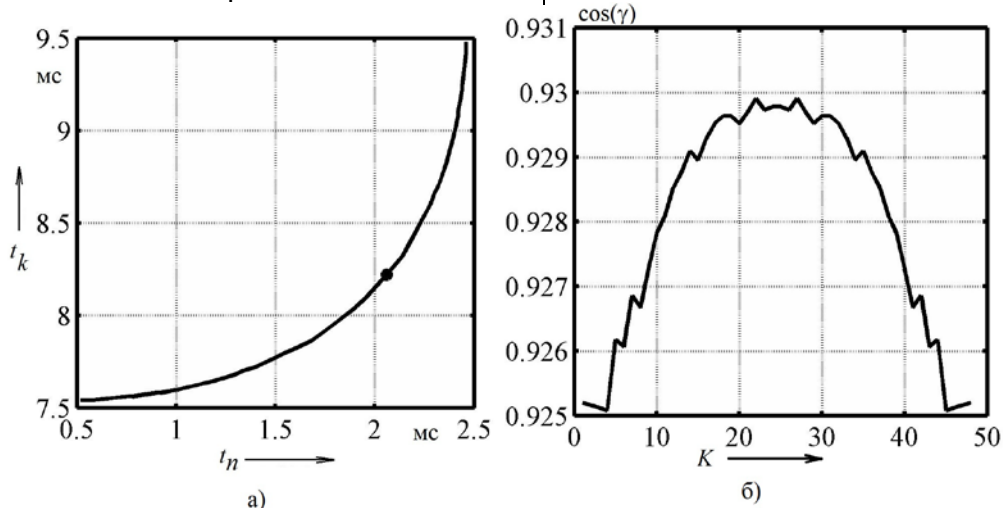


Рис. 5. Выбранная рабочая траектория для $U_2 = 8,1$ В и $U_1 = 12$ В (а) и критерий близости спектров (б)

При необходимости стабилизации напряжения на нагревателе при изменении входного напряжения U_1 алгоритм работы не изменяется. Изменяется лишь масштаб-

Заключение

Приведенный пример подтверждает работоспособность предложенного алгоритма, причем точность его работы определяется разрешающей способностью номинальной поверхности. Хорошие результаты достигаются при разрешении по вре-

ходным спектром по раннее рассмотренному критерию близости. В полученной зависимости (рис. 5б) отыскивается максимальное значение. Для рассмотренного примера это точка с порядковым номером 25, характеризующаяся параметрами $t_n = 2,06$ мс и $t_k = 8,22$ мс.

ный коэффициент, который применяется к номинальной поверхности при поиске рабочей траектории.

мени не менее 500 дискрет. Это требует существенных затрат на хранение исходных данных, что ограничивает сферу реализации системы управления классом промышленных компьютеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Юдин, А.В. Оценка искривления фронта кристаллизации в расплаве сапфира по спектральному составу мощности нагревателя / А.В. Юдин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева: сб. науч. тр. – Рыбинск, 2011. – № 1 (19).
- Рыжков, О.С. Использование численных алгоритмов для поиска компромиссных настроек регулятора для регулирования объектов с переменными параметрами / О.С. Рыжков // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 23-я междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. - 2017. - С. 223.
- Коваль, В.А. Синтез регулятора для объекта управления с переменным коэффициентом теплопроводности, описываемого в цилиндрической системе координат / В.А. Коваль, О.Ю. Торгашова, А.В. Чернова, А.А. Самарский // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2015. – Т. 4. – № 1 (81). - С. 125-131.
- Леонов, Ю.А. Поиск оптимальных технологических процессов с использованием алгоритмов эвристического поиска / Ю.А. Леонов, Е.А. Леонов, А.С. Зуева, А.С. Сазонова // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 4 (57). - С. 122-127.
- Андриянов, А.И. Активный силовой фильтр последовательного типа с усовершенствованной системой управления / А.И. Андриянов, А.А. Анисимов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. – № 6. - С. 39-46.
- Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2009. - 577 с. - (Б-ка профессионала).

7. Брылина, О.Г. Регуляторы переменного напряжения с частотно-широотно-импульсной модуляцией / О.Г. Брылина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. - 2012. - № 16 (275). - С. 26-30.
 8. Нажимов, А.В. Моделирование системы управления регулятором переменного напряжения / А.В. Нажимов // Современные наукоемкие технологии. - 2008. - № 2. - С. 54.
 9. Юдин, В.В. Моделирование процессов регулирования мощности в энергетических установках / В.В. Юдин, А.В. Юдин, А.В. Манин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. - 2010. - № 1 (16). - С. 151-156.
 10. Николаев, П.М. Алгоритм поиска точки на параметрической поверхности, ближайшей к заданной точке, для задач контроля точности изготовления изделий / П.М. Николаев // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 3 (43). - С. 135-137.
1. Yudin, A.V. Assessment of crystallization line curvature in sapphire melt based on spectral structure of heater power / A.V. Yudin // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk: Proceedings*. - Rybinsk, 2011. - No.1 (19).
 2. Ryzhkov, O.S. Numerical algorithm use for search of regulator compromise tuning for adjustment of objects with variable parameters / O.S. Ryzhkov // *Radioelectronics, Electrical Engineering Power Engineering: the XXIII-d Inter. Scientif.-Tech. Conf. of Students and Post Graduate Students*. - 2017. - pp. 223.
 3. Koval, V.A. Synthesis of regulator for object of control with alternating factor of thermal conductivity described in cylindrical system of coordinates / V.A. Koval, O.Yu. Torgashov, A.V. Chernova, A.A. Samarsky // *Bulletin of Samara State Technical University*. - 2015. - Vol.4. - No.1(81). - pp. 125-131.
 4. Leonov, Yu.A. Search of optimum engineering processes using algorithms of heuristic search / Yu.A. Leonov, E.A. Leonov, A.S. Zueva, A.S. Sazonova // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2017. - No.4(57). - pp. 122-127.
 5. Andriyanov, A.I. Active power filter of sequential type with updated system of control / A.I. Andriyanov, A.A. Anisimov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2017. - No.6. - pp. 39-46.
 6. Diyakonov, V.P. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. *Signal Processing and Filter Design* / V.P. Diyakonov. - M.: SOLON-Press, 2009. - pp. 577. - (Professional's Library).
 7. Brylina, O.G. Alternating voltage regulator with frequency-width-pulse modulation / O.G. Brylina // *Bulletin of South-Urals State University. Power Engineering*. - 2012. - No.16 (275). - pp. 26-30.
 8. Nazhimov, A.V. Modeling of control system with alternating voltage regulator / A.V. Nazhimov // *Modern Science Intensive Technologies*. - 2008. - No.2. - pp. 54.
 9. Yudin, V.V. Modeling of power control processes in power plants / V.V. Yudin, A.V. Yudin, A.V. Manin // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technological Academy of Rybinsk*. - 2010. - No.1(16). - pp. 151-156.
 10. Nikolaev, P.M. Algorithm of point search on parametric surface closest to point specified, for problems of accuracy control at product manufacturing / P.M. Nikolaev // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2014. - No.3(43). - pp. 135-137.

Статья поступила в редколлегию 10.12.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Киричек Ф.В.

Статья принята к публикации 22. 03. 19.

Сведения об авторах:

Юдин Алексей Викторович, зав. кафедрой «Электротехника и промышленная электроника» Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, e-mail: JudinAV@mail.ru.

Елисеичев Евгений Александрович, ассистент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Рыбинского государственного авиационного

Yudin Alexey Victorovich, Head of the Dep. "Electrical Engineering and Industrial Electronics", Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk, e-mail: JudinAV@mail.ru.

Yeliseichev Evgeny Alexandrovich, Assistant of the Dep. "Electrical Engineering and Industrial Elec-

tronic", Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk, e-mail: eliseichev_e_a@mail.ru.

Юдин Виктор Васильевич, профессор кафедры «Электротехника и промышленная электроника» Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева, e-mail: YudinVV47@mail.ru.

Yudin Victor Vasilievich, Prof. of the Dep. "Electrical Engineering and Industrial Electronics", Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk, e-mail: YudinVV47@mail.ru.