

УДК 621.365.4

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-87-93

## Разработка бесконтактной системы управления регулятором температуры вакуумной печи сопротивления

Д.А. Гапонова, В.П. Рубцов, А.В. Щербаков, А.С. Булгаков

Рассмотрены регуляторы температуры вакуумных печей сопротивления. Проанализированы существующие регуляторы, перечислены их достоинства и недостатки. Предложена функциональная схема регулятора с бесконтактным переключением выводов обмоток трансформатора и обратными связями по току и температуре. Описан принцип действия устройства, приведены временные диаграммы напряжения на нагрузке, дана методика моделирования работы исполнительных элементов регулятора — тиристоров, подключенных к различным секциям обмоток трансформатора и системы импульсно-фазового управления.

Разработана математическая модель регулятора в пакете программ Matlab Simulink, которая позволяет учитывать нелинейную зависимость сопротивления нагревателей от температуры. С помощью модели исследована работа системы с пропорционально-интегральным регулятором температуры, позволяющим изучать наиболее тяжелые переходные процессы пуска печи. В предложенном техническом решении сигналом обратной связи является сумма двух сигналов — сигнала обратной связи и суммы сигналов с датчиков тока и температуры, что позволяет упростить схему.

Получены временные зависимости токов и напряжений на участках схемы, а также изучены процессы управления нагревом печи. Показаны особенности и преимущества разработанной системы.

*Ключевые слова:* вакуумная печь сопротивления, регулятор температуры, бесконтактная система управления, ограничение тока.

*Для цитирования:* Гапонова Д.А., Рубцов В.П., Щербаков А.В., Булгаков А.С. Разработка бесконтактной системы управления регулятором температуры вакуумной печи сопротивления // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 87—93. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-87-93.

## Development of a Contactless Control System for the Vacuum Resistance Furnace Temperature Regulator

D.A. Gaponova, V.P. Rubtsov, A.V. Shcherbakov, A.S. Bulgakov

Temperature regulators of vacuum resistance furnaces are considered. Existing temperature regulators are analyzed, and their advantages and drawbacks are pointed out. A functional diagram of a temperature regulator with contactless switching of the transformer winding taps and with current and temperature feedbacks is proposed. The device operating principle is outlined, the load voltage timing diagrams are presented, and a technique for simulating the operation of the regulator actuators implemented by means of thyristors connected to different transformer winding sections and their pulse-phase control system is described.

The temperature regulator mathematical model is developed in the Matlab Simulink software package, which makes it possible to take into account the nonlinear dependence of the heaters resistance on temperature. The model is applied for investigating operation of the system with a proportional-integral temperature controller, which allows the heaviest transients in the furnace startup modes to be studied. According to the proposed technical solution, the control system overall feedback is produced as the sum of the feedback signal and the sum of signals from the current and temperature sensors, an approach that allows the control system configuration to be simplified.

Time dependences of currents and voltages in different circuit parts have been obtained, and the furnace heating control processes have been studied. The specific features and advantages of the developed system are shown.

*Key words:* vacuum resistance furnace, temperature regulator, contactless control system, current limitation.

*For citation:* Gaponova D.A., Rubtsov V.P., Shcherbakov A.V., Bulgakov A.S. Development of a Contactless Control System for the Vacuum Resistance Furnace Temperature Regulator. Bulletin of MPEI. 2019;2:87—93. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-87-93.

## Введение

В электрических печах сопротивления преобразование электрической энергии происходит в нагревателях, работающих в тяжелых температурных условиях. Их срок службы намного ниже, чем у остальных элементов конструкции печи [1].

Материалами для нагревателей в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления (ВПС) служат тугоплавкие металлы (тантал, вольфрам, молибден и их сплавы) или материалы на основе углерода (графит, углеродистые композитные материалы), основной особенностью которых является зависимость удельного электрического сопротивления от температуры [2]. В связи с этим электрическое сопротивление нагревателей из тугоплавких металлов при нагреве и охлаждении меняется в 10...15 раз, а, следовательно, во столько же раз меняется и ток, протекающий по нагревателю при неизменном напряжении. Подобный бросок тока отрицательно сказывается на сроке службы нагревательного элемента. На практике применяют различные способы ограничения тока нагревателей при изменении температуры [3, 4].

## Регулирование температуры вакуумной печи сопротивления

Традиционно для питания вакуумных печей сопротивления используют тиристорный регулятор напряжения. В пусковом режиме, когда сопротивление нагревателя мало, для ограничения тока приходится работать с большими углами открывания тиристоров, что ведет к снижению коэффициента мощности. Другим распространенным способом является применение пони-

жающего трансформатора с переключением ступеней напряжения [5]. Печь включают на пониженном напряжении и постепенно его увеличивают по мере роста температуры. Это делают для того, чтобы ограничить выделяемую в нагревателе мощность и, как следствие, продлить срок службы нагревателя. Однако, у данного способа есть существенный недостаток: для питания вакуумных печей сопротивления большой мощности требуется трансформатор с большим числом ступеней, чем у серийных трансформаторов, поэтому необходимы специальные трансформаторы, отличающиеся высокой стоимостью.

Предложено новое техническое решение для регулирования мощности нагревателя с ярко выраженной зависимостью сопротивления нагревателя от температуры, основанное на бесконтактном переключении выводов обмоток трансформатора [6, 7]. Функциональная схема регулятора приведена на рис. 1.

На первичную обмотку трансформатора  $w_1$  подается сетевое напряжение  $U$ . Вторичная обмотка трансформатора разделена на две секции  $w_2'$  и  $w_2''$ . К обмотке  $w_2''$  подключен тиристорный преобразователь, а другая секция соединена с нагрузкой. В цепь нагрузки включен датчик тока (ТТ). Для измерения температуры печи используется датчик температуры (ДТ). Сигналы с датчиков тока (ТТ) и температуры (ДТ) суммируются, что позволяет упростить систему, благодаря выполнению одним регулирующим устройством (РУ) двух функций: регулирования температуры и ограничения тока печи. Суммарный сигнал поступает на регулирующее устройство, сравнивающее задающий сигнал  $\Theta_3$  и сигнал обратной связи с выхода сумматора  $\Theta_\Sigma$  и вырабатывающее управляющее воздействие, поступаю-

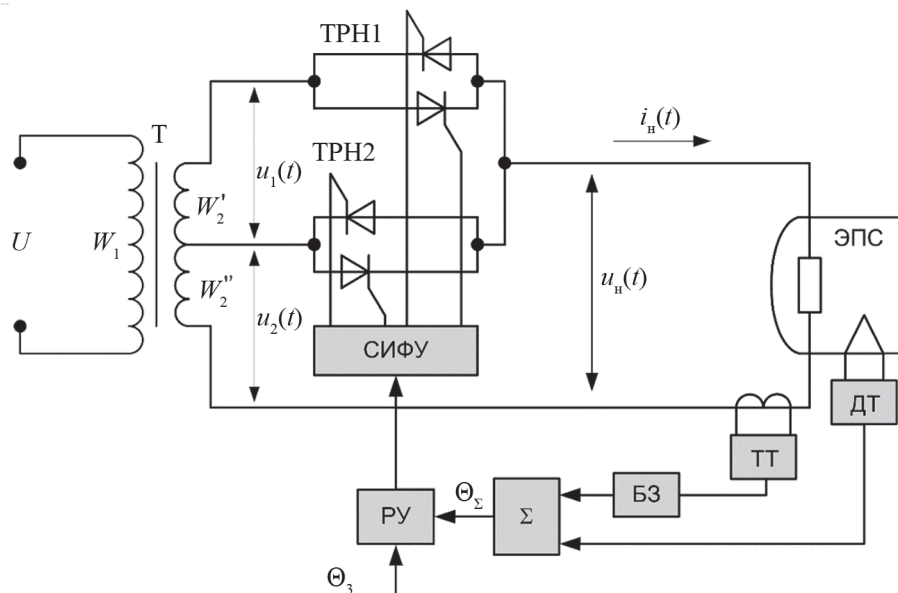


Рис. 1. Функциональная схема регулятора температуры вакуумной печи сопротивления с комбинированным управлением:

ТРН1, ТРН2 — тиристорные регуляторы напряжения; СИФУ — система импульсно-фазового управления; РУ — регулирующее устройство;  $\Sigma$  — сумматор; ТТ, ДТ — датчики тока и температуры; БЗ — блок зоны нечувствительности; Т — трансформатор; ЭПС — печь сопротивления;  $U$  — напряжение

щее на вход системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

Временная диаграмма напряжения (рис. 2) иллюстрирует процессы регулирования напряжения на нагрузке. Тиристорные регуляторы ТРН1 и ТРН2 с помощью системы импульсно-фазового управления поочередно подключают секции трансформатора с регулируемым углом  $\alpha$ . В интервалы времени, когда один из тиристоров ТРН<sub>2</sub> открыт, напряжение на нагрузке равно  $u_2(t)$ , в следующий интервал времени напряжение на нагрузке равно  $u_1(t) + u_2(t)$ . При таком управлении тиристорами обеспечивается меньшее искажение формы напряжения, следовательно, увеличивается коэффициент мощности.

### Постановка задачи

На рисунке 3 приведена схема модели бесконтактной системы управления вакуумной печью сопротивления, разработанная в пакете Simulink Matlab [8, 9]. Тиристорные регуляторы напряжения ТРН1 и ТРН2 представлены в модели в виде блоков *Switch – Switch3*, для имитации закрытия тиристоров при приложении обратного напряжения используются блоки *Relay*, *Relay1*, *Relay3*, *Relay4*. Система импульсно-фазового управления дана в виде блоков *Repeating Sequence*, сумматора *Add* и блока *Relay2*. Входной управляющий сигнал подается в СИФУ через положительный вход сумматора. Для того, чтобы тиристоры регулятора ТРН1 открывались только при приложении прямого напряжения, в ТРН1 введены блоки умножения *Product* и *Product1*. Аналогичные по назначению блоки присутствуют в ТРН2. Секции вторичной обмотки трансформатора заданы в модели блоками *Sine wave* и *Sine wave1*. Приняты амплитудные значения напряжения на одной секции вторичной обмотки  $u_1(t)$  — 22 В, а на другой  $u_2(t)$  — 7,4 В. Для учета особенностей работы схемы рис. 1 в представленной модели мгновен-

ное значение напряжения нагрузки  $u_n(t)$  вычисляется суммированием сигналов с блоков *Switch – Switch3*, а мгновенное значение тока нагрузки — блоком *Divide*, причем в качестве делимого выступает  $u_n(t)$ , а в качестве делителя — сопротивление нагревателя, которое является функцией его температуры.

Для расчета мощности, подаваемой на нагреватель, проводится возведение во вторую степень тока нагревателя в блоке *Product7*, а затем умножение полученного значения на сопротивление нагревателя. Затем величина  $p_n(t)$  подается на вход блока *Transfer fcn2*, который введен для учета инерционности нагревательного элемента печи. Выходная величина блока — температура нагревателя  $T_n$  нужна для расчета его сопротивления по данным [10, 11]. Для этого в модель введена функция  $R_n(T_n)$ , представленная на рис. 3 звеном *Fcn1* и описываемая выражением:

$$R_n(T_n) = \left( 3 \cdot 10^{-14} T_n^2 + 2 \cdot 10^{-10} T_n - 2 \cdot 10^{-8} \right) \frac{l_n N}{S_n} + R_{тп},$$

где  $l_n$  — длина секции нагревателя, м;  $N$  — число секций нагревателя, шт;  $S_n$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $R_{тп}$  — сопротивление токоподводов печи.

Для рассматриваемого случая длина нагревателя — 0,7 м, количество секций — 6, площадь поперечного сечения —  $2,8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>, сопротивление токоподводов — 0,02 Ом. Рассчитанное сопротивление необходимо для расчета мгновенных значений тока печи и мощности нагревателя.

Постоянная времени нагрева печи учитывается элементом *Transfer Fcn3*, а постоянная времени термомпары (датчика температуры ДТ) — блоком *Transfer Fcn5*. Для получения действующего значения тока нагревателей в модель введены блоки *Abs* и *Transfer Fcn1*. Сигнал с датчика тока ТТ поступает на сумматор  $\Sigma$  через блок зоны нечувствительности БЗ (токовая

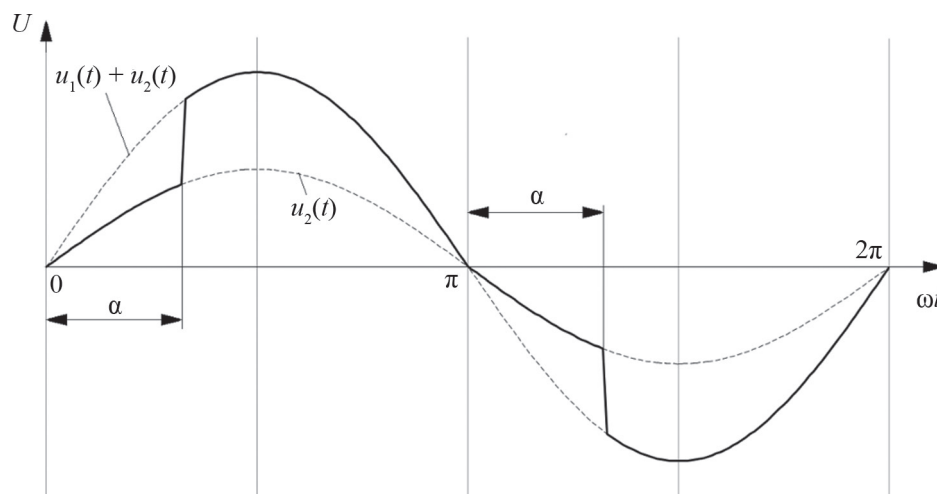


Рис. 2. Временная диаграмма напряжения на нагрузке (сплошная линия)

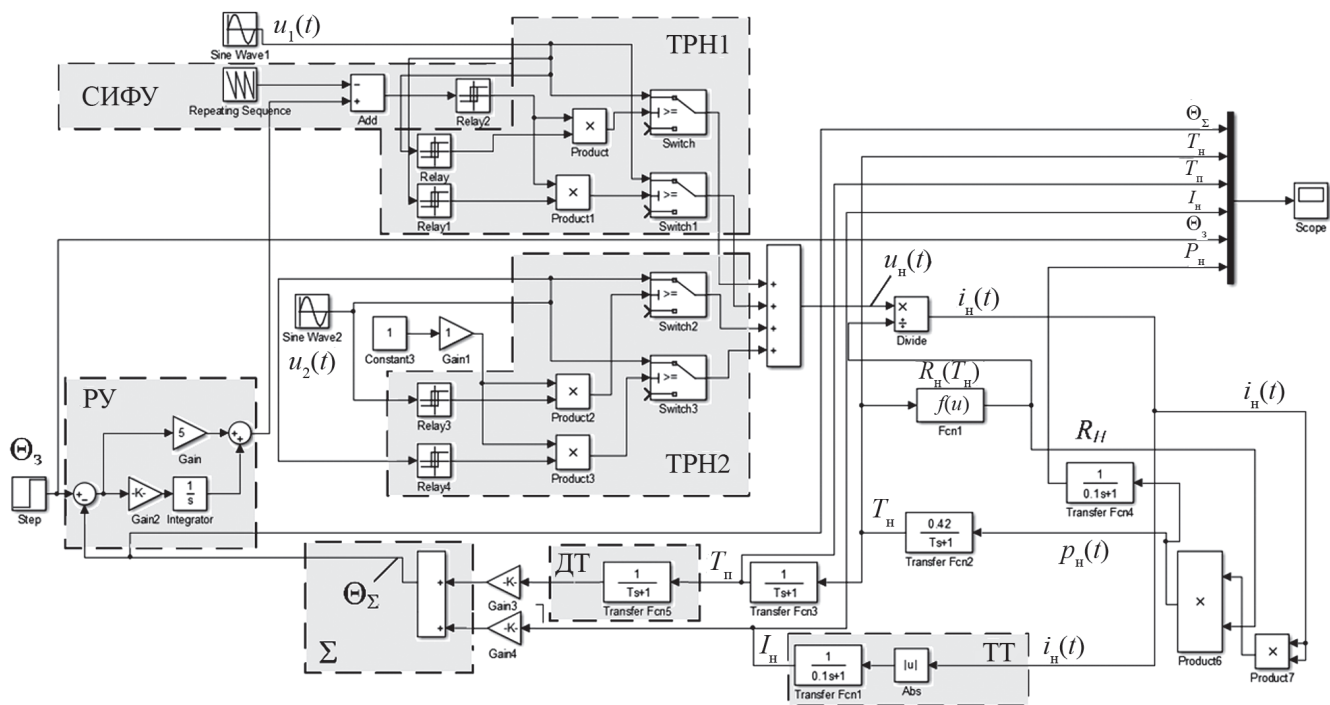


Рис. 3. Модель бесконтактной системы управления ВПС

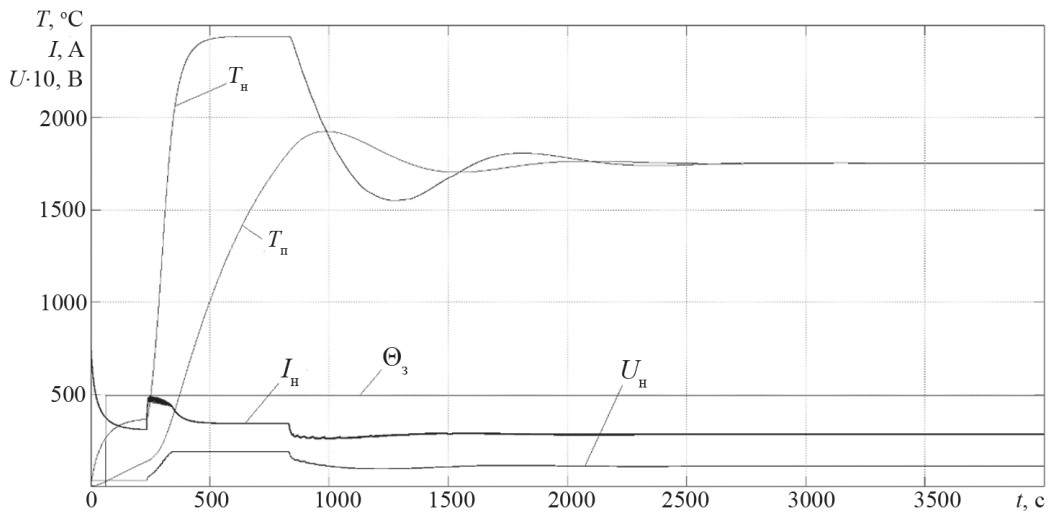
отсека), а от датчика температуры ДТ непосредственно суммарный сигнал обратной связи  $\Theta_\Sigma$  идет на регулирующее устройство, где сравнивается с сигналом задания  $\Theta_3$ . Регулирующее устройство содержит пропорциональный (блок *Gain*) и интегральный (блоки *Gain2*, *integrator*) элементы. Выход регулирующего устройства связан с управляющим входом СИФУ. Для регистрации необходимых для исследования сигналов введен блок *Scope*.

### Исследование регулятора температуры с комбинированным управлением

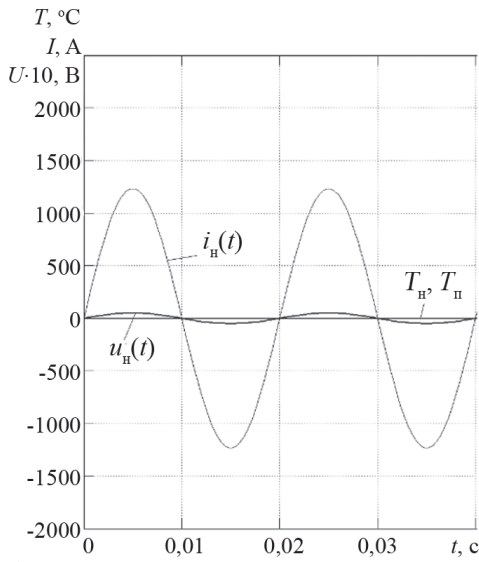
Исследование регулятора температуры проводили для печи СНВЭ 1.3.1/16, максимальная температура которой составляет 1600 °С, мощность печи — 16 кВт, материал нагревателей — вольфрам, напряжение на вторичной обмотке — 29,4 В.

На рисунке 4, а представлены осциллограммы действующих значений токов  $I_H$ , напряжений  $U_H$ , температуры нагревателей печи  $T_H$  и самой печи  $T_\Pi = 1600$  °С. В начальный момент времени при уставке  $\Theta_3 = 0$  ток  $i_H(t)$  принимает максимальное значение (рис. 4, б), это связано с тем, что сопротивление нагревателя минимально, но по мере его прогрева сопротивление растет и ток снижается. До момента подачи сигнала управления ( $t = 60$  с) тиристоры блока ТРН1 закрыты и ток нагрузки протекает от обмотки  $w_2''$  через блок ТРН2. В результате к нагрузке прикладывается минимально возможное напряжение ( $u_H(t)$ , рис. 4, б). В следующий момент времени по истечении 60 с на вход ПИ-регулятора подается сигнал уставки, и система пере-

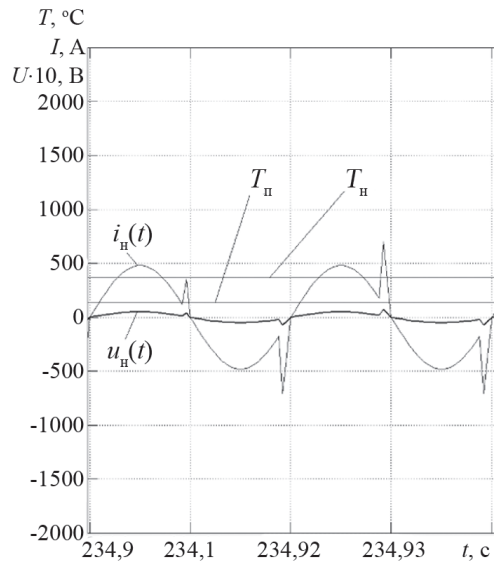
ходит к режиму совместного управления температурой и током. Несмотря на это, до момента времени 234,9 с, формы кривых напряжения и тока не меняются. Обе величины сохраняют вид синусоиды, при этом амплитуда тока падает, а амплитуда напряжения растет из-за роста сопротивления нагревателя. Тиристоры регулятора ТРН1, по-прежнему, закрыты. Это связано с тем, что отрицательная обратная связь по току препятствует формированию сигнала управления, который мог бы обеспечить открытие тиристоров ТРН1. При снижении тока до значения 316 А управляющий сигнал ( $\Theta_3 - \Theta_\Sigma$ ) увеличивается, а роль канала обратной связи по температуре соответственно возрастает. Как следует из рис. 4, в, с этого момента времени начинают открываться тиристоры ТРН1, а система переходит к режиму регулирования температуры. При этом до  $t = 334$  с ток продолжает ограничиваться на значении около 500 А (см. рис. 4, а). После этого система работает в режиме максимальной мощности (рис. 4, з). Тиристоры блока ТРН1 полностью открыты, действующее значение напряжения на нагревателях поддерживается равным 29,4 В. Из-за инерционности процесса по достижении  $t = 825$  с температура печи превышает требуемую, и система снижает напряжение. В дальнейшем система ведет себя как традиционный ПИ-регулятор температуры и к моменту времени 3500 с принимает установившееся значение 1550 °С. В этом режиме (рис. 4, д) угол управления тиристорами  $\alpha$  ТРН1 составляет примерно 45°, так как необходимо только поддержание температуры печи. Исследования работы системы проводили в диапазоне температур, характерном для ва-



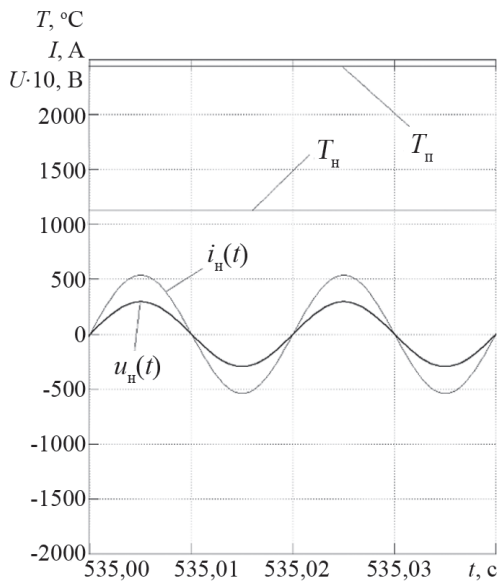
a



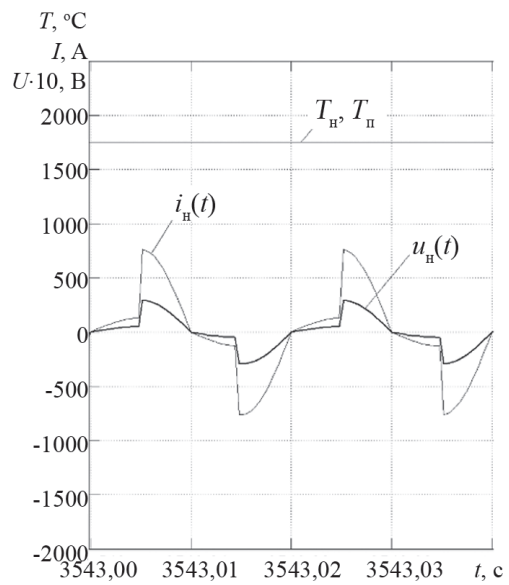
б



в



г



д

Рис. 4. Осциллограммы сигналов токов, напряжений и температур

куумных ЭПС (1200...1800 °С). Форма зависимостей сигналов, приведенных на рис. 4, а также описанные алгоритмы работы системы, являются характерными для всего упомянутого диапазона.

### Заключение

Разработана бесконтактная система управления регулятором температуры вакуумной печью сопротивления, которая обеспечивает ограничение тока в пусковом режиме печи, а также регулирование температуры посредством фазоимпульсного управления тиристорными модулями.

Предложена математическая модель системы управления, учитывающая нелинейную зависимость

сопротивления нагревателей от температуры, которая позволяет анализировать не только процессы нагрева и охлаждения нагревателей печи, но и формы кривых тока и напряжения нагревателей при фазоимпульсном управлении ключами, коммутирующими секции вторичной обмотки трансформатора.

Сигналом обратной связи является сумма сигналов с датчиков тока и температуры, что позволяет упростить систему.

Установлено, что предложенная система управления обеспечивает работу печи в четырех различных режимах: ограничения пускового тока, регулирования температуры с ограничением тока, максимальной мощности и поддержания требуемой температуры.

### Литература

1. Митяков Ф.Е., Горячих Е.В. Исследование влияния переключения ступеней напряжения трансформатора на работу регуляторов температуры в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // Электротехника. 2013. № 7. С. 33—37.
2. Мармер Э.Н. Материалы для высокотемпературных вакуумных установок. М.: Физмалит, 2007.
3. Электрооборудование и автоматика электротермических установок / под ред. А.П. Альтгаузена и др. М.: Энергия, 1978.
4. Митяков Ф.Е., Горячих Е.В. Влияние ограничения тока нагревателей на работу регуляторов температуры в высокотемпературных вакуумных печах сопротивления // Вестник МЭИ. 2012. № 2. С. 80—84.
5. Лейканд М.С. Вакуумные электрические печи (сопротивления и индукционные). М.: Энергия, 1975.
6. Электрические и электронные аппараты / под ред. Ю. К. Розанова. М.: Информэлектро, 2001.
7. Пат. № 153309 РФ. Регулятор температуры электропечи сопротивления / В.П. Рубцов, А.В. Щербаков // Бюл. изобрет. 2015. № 19.
8. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2013.
9. Дьяконов В.П. Matlab и Simulink для радиоинженеров. М: ДМК Пресс, 2016.
10. Desal P.D., Chu T.K., James H.M., Ho C.Y. Electrical Resistivity of Selected Elements // J. Phys .Chem. Ref. Data. 1984. V. 13. No. 4. Pp. 1069—1096.
11. National Institute of Standards and Technology [Официальный сайт] <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/NSRDS/nbsnrsds8.pdf> (дата обращения 10.10.2018).

### References

1. Mityakov F.E., Goryachikh E.V. Issledovanie Vliyaniya Pereklyucheniya Stupeney Napryazhenie Transformatora na Rabotu Regulyatorov Temperatury v Vysokotemperaturnykh Vakuumnykh Pechakh Soprotivleniya. Elektrotehnika. 2013;7:33—37. (in Russian).
2. Marmer E.N. Materialy dlya Vysokotemperaturnykh Vakuumnykh Ustanovok. M.: Fizmalit, 2007. (in Russian).
3. Elektrooborudovanie i Avtomatika Elektrotermicheskikh Ustanovok. Pod red. A.P. Al'tgauzena i dr. M.: Energiya, 1978. (in Russian).
4. Mityakov F.E., Goryachikh E.V. Vliyanie Ograniчениiya Toka Nagrevateley na Rabotu Regulyatorov Temperatury v Vysokotemperaturnykh Vakuumnykh Pechakh Soprotivleniya. Vestnik MEI. 2012;2:80—84. (in Russian).
5. Leykand M.S. Vakuumnye Elektricheskie Pechi (Soprotivleniya i Induksionnye). M.: Energiya, 1975. (in Russian).
6. Elektricheskie i elektronnye Apparaty. Pod red. Yu. K. Rozanova. M.: Informelektro, 2001. (in Russian).
7. Pat. № 153309 RF. Regulyator Temperatury Elektropечи Soprotivleniya. V.P. Rubtsov, A.V. Shcherbakov. Byul. izobret. 2015;19. (in Russian).
8. German-Galkin S.G. Virtual'nye Laboratorii Poluprovodnikovyykh Sistem v Srede Matlab-Simulink. SPb.: Lan', 2013. (in Russian).
9. D'yakonov V.P. Matlab i Simulink dlya Radioinzhenеров. M: DMK Press, 2016. (in Russian).
10. Desal P.D., Chu T.K., James H.M., Ho C.Y. Electrical Resistivity of Selected Elements. J. Phys .Chem. Ref. Data. 1984;13;4:1069—1096.
11. National Institute of Standards and Technology [Ofits. Sayt] <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/NSRDS/nbsnrsds8.pdf> (Data Obrashcheniya 10.10.2018).

**Сведения об авторах:**

**Гапонова Дарья Александровна** — инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: dgaponva@mail.ru

**Рубцов Виктор Петрович** — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: RubtsovVP@mpei.ru

**Щербаков Алексей Владимирович** — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru

**Булгаков Андрей Сергеевич** — студент НИУ «МЭИ», e-mail: andbull@mail.ru

**Information about authors:**

**Gaponova Daria A.** — Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: dgaponva@mail.ru

**Rubtsov Viktor P.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: RubtsovVP@mpei.ru

**Shcherbakov Aleksey V.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru

**Bulgakov Andrey S.** — Student of NRU MPEI, e-mail: andbull@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 13.11.2017

**The article received to the editor:** 13.11.2017