



АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИНКУБАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

А.А.Варенов, В.П. Зенцов, Н.А. Малёв

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Резюме: Исследованы тепловые процессы в инкубационной камере, разработаны рекомендации по управлению температурой в этой прецизионной системе на основе синтеза корректирующих устройств, позволяющих повысить качество её функционирования.

Ключевые слова: функциональная схема, передаточная функция, процесс регулирования, моделирование линейной непрерывной системы.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-101-108

Для цитирования: А.А.Варенов, В.П. Зенцов, Н.А. Малёв Анализ динамических процессов в системе стабилизации температуры в инкубационной камере // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 101-108. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-101-108.

DYNAMIC PROCESSES ANALYSIS IN THE TEMPERATURES STABILIZATION SYSTEM, IN THE INCUBATION CHAMBER

A.A. Varenov, V.P. Zentsov, N.A. Malyov

Kazan State Power Engineering University

Abstract: Thermal processes in incubation chamber were investigated. From the investigations, the recommendations were developed for controlling the temperature in this precision system based on the synthesis of correcting devices, allowing one to improve its functional quality.

Keywords: Functional scheme, transfer function, process regulation, modeling of linear continuous system.

For citation: A.A. Varenov, V.P. Zentsov, N.A. Malyov Dynamic processes analysis in the temperatures stabilization system, in the incubation chamber // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 101-108. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-101-108.

Поддержание постоянной температуры в замкнутом объеме является важной задачей во многих производственных процессах. Теплообмен при этом характеризуется значительной инерционностью, т.к. для мгновенного изменения температуры необходимо затрачивать бесконечно большую энергию [1–3]. Распространенным источником тепловой энергии является электронагреватель, преобразующий электрическую энергию в тепловую.

На рис. 1 показана функциональная схема системы автоматического регулирования (САР) температуры в инкубационной камере (ИК) [6].

Исследуемая САР относится к разряду прецизионных систем. Динамические процессы в этой системе описываются уравнениями:

$$\text{сравнивающее устройство } \Delta U(t) = U_0 - E(t);$$

$$\text{усилительное устройство } U(t) = K_y \Delta U(t);$$

$$\text{тиристорный блок питания } U_{\text{тр}}(t) = K_{\text{тр}} U_y(t);$$

$$\text{нагревательный элемент } T_{\text{н}} \dot{\Theta}_{\text{н}}(t) + \Theta_{\text{н}}(t) = K_{\text{н}} P_{\text{н}}(t) + \Theta_{\text{к}}(t);$$

$$\text{инкубационная камера } T_{\text{к}} \dot{\Theta}_{\text{к}}(t) + \Theta_{\text{к}}(t) = K_{\text{н}} \Theta_{\text{н}}(t) + K_0 \Theta_0(t);$$

$$\text{термопара } T_{\text{т}} \dot{E}(t) + E(t) = K_{\text{т}} \Theta_{\text{к}}(t),$$

где $\Theta_{\text{н}}$, $\Theta_{\text{к}}$, Θ_0 – температуры нагревателя, камеры и окружающей среды соответственно;

E – эдс термопары; $P_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{R}$ – мощность, потребляемая нагревателем ($U_{\text{н}}$ – напряжение, прикладываемое к нагревателю, а R – его сопротивление); K_y , $K_{\text{тр}}$, $K_{\text{н}} = \frac{1}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}}}$,

$K_{\text{к}} = \frac{K_{\text{тн}} S_{\text{н}}}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}} + K_{\text{то}} S_0}$, $K_0 = \frac{K_{\text{то}} S_0}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}} + K_{\text{то}} S_0}$, $K_{\text{т}}$ – коэффициенты передачи усилителя, блока управления тиристорами, нагревателя, инкубационной камеры по управляющему воздействию $U_{\text{н}}$, инкубационной камеры по возмущающему воздействию Θ_0 и термопары соответственно;

$T_{\text{н}} = \frac{C_{\text{н}} m_{\text{н}}}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}}}$, $T_{\text{к}} = \frac{C_{\text{к}} m_{\text{к}}}{K_{\text{тн}} S_{\text{н}} + K_{\text{то}} S_0}$, $T_{\text{т}} = \frac{C_{\text{т}} m_{\text{т}}}{K_{\text{тт}} S_{\text{т}}}$ – постоянные времени

нагревателя, камеры и термопары соответственно; $C_{\text{н}}$, $C_{\text{к}}$, $C_{\text{т}}$ – удельные теплоемкости; $m_{\text{н}}$, $m_{\text{к}}$, $m_{\text{т}}$ – массы; $K_{\text{тн}}$, $K_{\text{то}}$, $K_{\text{тт}}$ – коэффициенты теплоотдачи нагревателя, внутренних стен камеры и термопары; $S_{\text{н}}$, S_0 , $S_{\text{т}}$ – площади поверхности этих элементов.

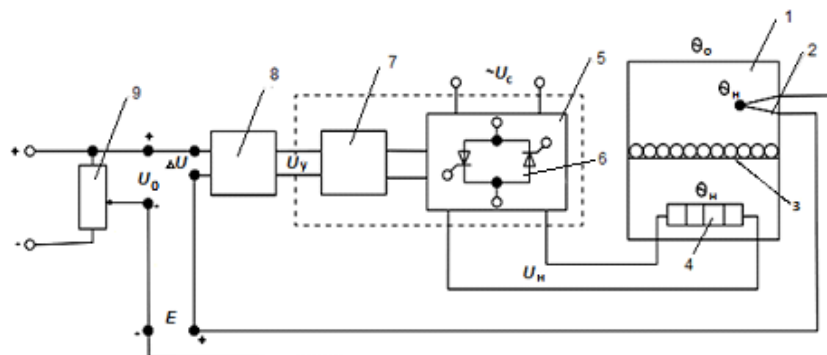


Рис. 1. Функциональная схема САР температуры в инкубационной камере:

- 1 – ИК; 2 – термопара; 3 – лоток для яиц; 4 – нагреватель; 5, 6 – тиристорный блок питания;
7 – блок управления тиристорами; 8 – усилитель; 9 – задающее устройство

После записи приведенных уравнений в изображении по Лапласу с использованием источников [3, 4, 5, 8] запишем передаточные функции элементов САР:

$$W_y(s) = \frac{U_y(s)}{\Delta U(s)} = K_y - \text{усилитель};$$

$$W_{\text{тр}}(S) = \frac{U_{\text{н}}(S)}{U_{\text{у}}(S)} = K_{\text{тр}} - \text{блок управления тиристорами;}$$

$$W_{\text{ну}}(S) = \frac{\Theta_{\text{н}}(S)}{P_{\text{н}}(S)} = \frac{K_{\text{н}}}{T_{\text{н}}S + 1} - \text{нагреватель по управлению;}$$

$$W_{\text{нв}}(S) = \frac{\Theta_{\text{н}}(S)}{\Theta_{\text{к}}(S)} = \frac{1}{T_{\text{н}}S + 1} - \text{нагреватель по возмущению;}$$

$$W_{\text{т}}(S) = \frac{E(S)}{\Theta_{\text{к}}(S)} = \frac{K_{\text{т}}}{T_{\text{т}}S + 1} - \text{термопара;}$$

$$W_{\text{ку}}(S) = \frac{\Theta_{\text{к}}(S)}{\Theta_{\text{н}}(S)} = \frac{K_{\text{к}}}{T_{\text{к}}S + 1} - \text{ИК по управлению;}$$

$$W_{\text{кв}}(S) = \frac{\Theta_{\text{к}}(S)}{\Theta_0(S)} = \frac{K_0}{T_{\text{к}}S + 1} - \text{ИК по возмущению.}$$

Мощность нагревателя $P_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{R}$ является нелинейной функцией напряжения.

Учитывая, что изменения напряжения $U_{\text{н}}$ в процессе регулирования небольшие, проведена линеаризация этой функции разложением в ряд:

$$P_{\text{н}}(U_{\text{н}}) = P_{\text{н}}(U_{\text{н0}}) + \frac{1}{1!} \left(\frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \right) (U_{\text{н}} - U_{\text{н0}}) + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2P_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}^2} \right) (U_{\text{н}} - U_{\text{н0}})^2 + \dots,$$

откуда

$$P_{\text{н}}(U_{\text{н}}) - P_{\text{н}}(U_0) = \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \Delta U_{\text{н}} \text{ или } \Delta P_{\text{н}} = \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} \Delta U_{\text{н}}.$$

$$\text{Учитывая } \frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} = \frac{d \left(\frac{U_{\text{н}}^2}{R} \right)}{dU_{\text{н}}} = \frac{2U_{\text{н}}}{R}, \quad \text{при } U_{\text{н}} = U_{\text{н0}} \quad \text{получим}$$

$$\frac{dP_{\text{н}}}{dU_{\text{н}}} = \frac{2U_{\text{н0}}}{R} = K_p.$$

Таким образом, $\Delta P_{\text{н}} = \frac{2U_{\text{н0}}}{R} \Delta U_{\text{н}} = K_p \Delta U_{\text{н}}$ является уравнением в отклонениях

переменных, в котором удержаны только составляющие первого порядка малости и опущены составляющие более высокого порядка, что является допустимым для инженерных расчетов. Передаточные функции элементов САР позволяют построить структурную схему динамической модели (ССДМ) [2], показанную на рис. 2. Свернув внутренний замкнутый контур с положительной обратной связью [9], получим передаточную функцию разомкнутой некоррелированной системы:

$$W(S) = \frac{K_{\text{у}} K_{\text{тр}} K_{\text{р}} K_{\text{н}} (T_{\text{н}}S + 1) K_{\text{к}} K_{\text{т}}}{(T_{\text{н}}S + 1) [(T_{\text{к}}S + 1)(T_{\text{н}}S + 1) - K_{\text{к}}]} =$$

$$\frac{K}{[(T_{\text{к}}S + 1)(T_{\text{н}}S + 1) - K_{\text{к}}]} = \frac{B(S)}{D(S)},$$

где $K = K_{\text{у}} K_{\text{тр}} K_{\text{р}} K_{\text{н}} K_{\text{к}} K_{\text{т}}$ – коэффициент передачи разомкнутой некоррелированной системы.

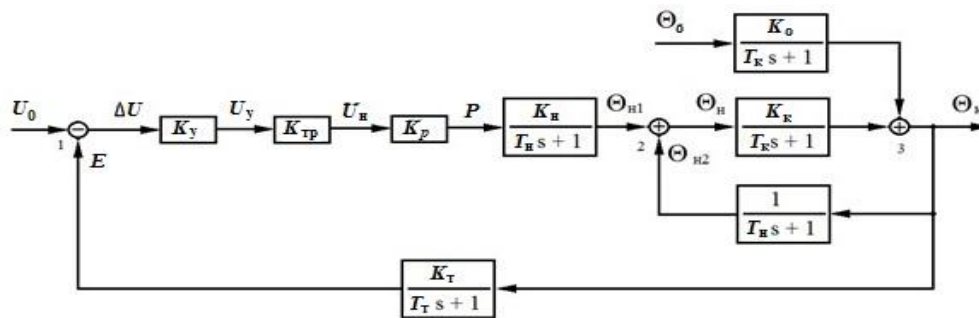


Рис. 2. Структурная схема динамической системы модели
Характеристический многочлен замкнутой системы $A(S) = B(S) + D(S)$ или

$$A(S) = T_n T_k T_t S^3 + (T_n T_k + T_n T_t + T_k T_t) S^2 + (T_n + T_k - T_t T_k) S + (1 + K) = a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0,$$

где

$$\begin{aligned} a_3 &= T_n T_k T_t > 0, \\ a_2 &= (T_n T_k + T_n T_t + T_k T_t) > 0 \\ a_1 &= T_n + T_k - T_t T_k > 0 \\ a_0 &= 1 + K > 0. \end{aligned}$$

Оценка устойчивости САР по критерию Гурвица ($\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$) для физически реализуемых параметров показывает, что система является устойчивой и обладает большими запасами устойчивости, что подтверждается графиками логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ), показанными на рис. 3. Из полученных ЛЧХ следует, что запас устойчивости по амплитуде составляет 95,3 дБ, тогда как запас устойчивости по фазе сложно оценить, в силу сравнительно небольшого значения общего коэффициента передачи системы на порядок меньшего единицы и, как следствие, отсутствия точки пересечения ЛАЧХ с осью 0 дБ.

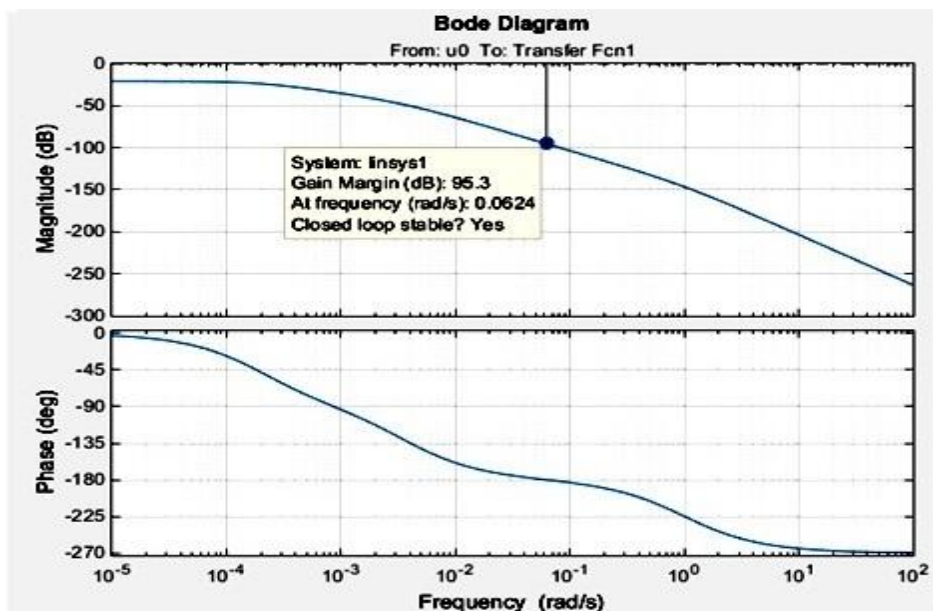


Рис. 3. ЛЧХ САР температуры

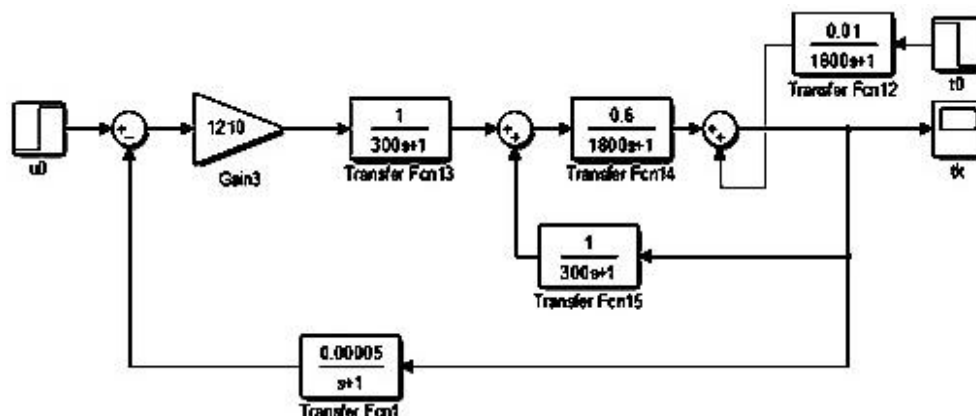


Рис. 4. Схема моделирования САР температуры в среде *MatlabSimulink*

В связи с этим научная задача, решаемая в работе, сводится к анализу временных характеристик системы регулирования температуры в инкубационной камере с последующей выработкой рекомендаций по применению соответствующих способов коррекции, позволяющих улучшить показатели качества переходных процессов.

Результат моделирования некоррелированной системы в соответствии со схемой моделирования в среде *MatLabSimulink* [7] (рис. 4) при заданных параметрах показан на рис. 5. Из него следует, что температура в ИК достигает своего установившегося значения $38,2^{\circ}\text{C}$ за $3 \cdot 10^4$ с.

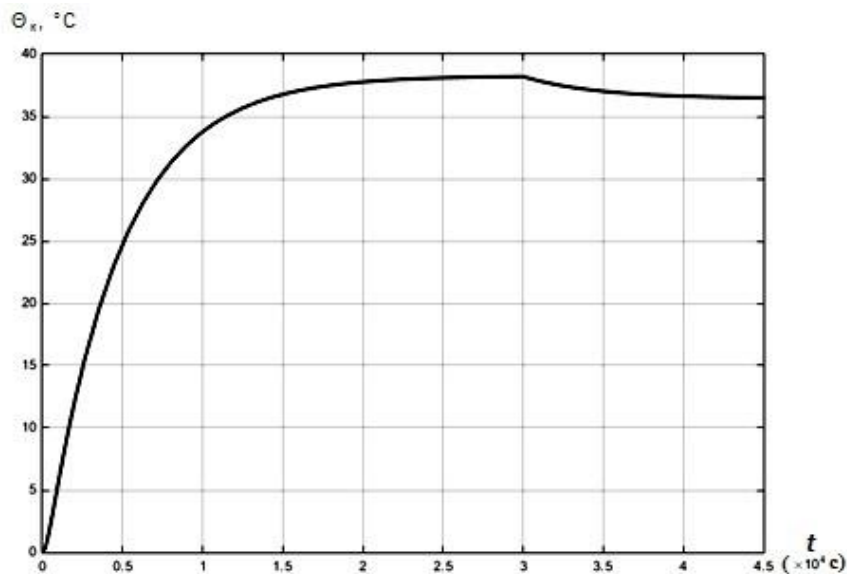


Рис. 5. Переходная характеристика системы по задающему воздействию

Из графика видно, что в системе имеет место ошибка по возмущению и при температуре окружающей среды $\Theta_0 = -40^{\circ}\text{C}$ абсолютное значение ошибки составляет $1,7^{\circ}\text{C}$. Кроме того, САР температуры обладает существенной инерционностью и малым быстродействием, что также является весомым недостатком некоррелированной системы.

Моделирование нелинейной САР температуры в инкубаторе показало, что графики переходных процессов не имеют принципиальных отличий по сравнению с

линеаризованной системой, что говорит о корректности принятого выше допущения. На рис. 6 показана зависимость мощности нагревателя от времени.

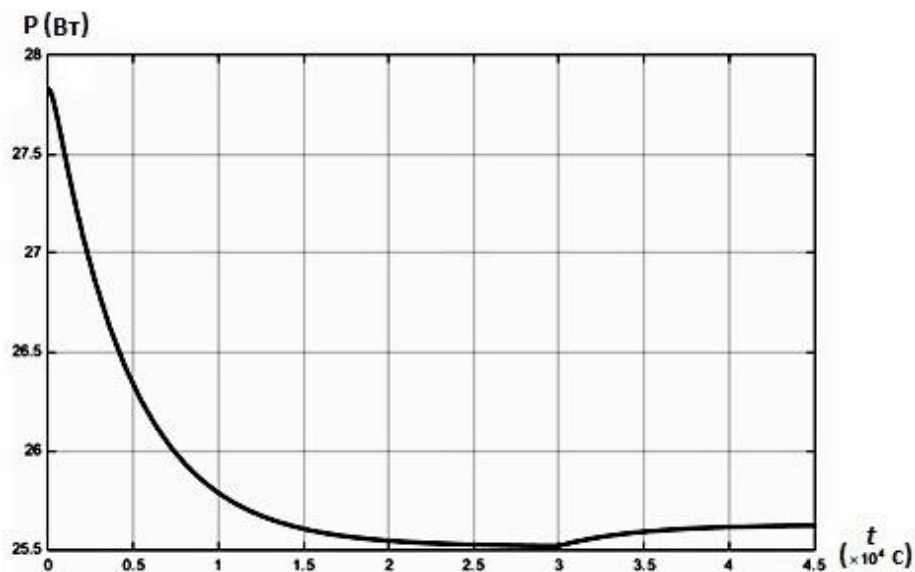


Рис.6. График зависимости мощности нагревателя от времени

Из графика следует, что в момент запуска системы потребляемая на нагрев мощность составляет 27,83 Вт, постепенно устанавливаясь к значению 25,5 Вт. При воздействии возмущения в виде изменения температуры окружающей среды наблюдается некоторое увеличение мощности до величины 25,62 Вт.

Таким образом, исследуемая система регулирования температуры в инкубаторе является чувствительной к возмущающим воздействиям, а время достижения установившегося состояния составляет около 8 часов. С учетом перечисленных особенностей некоррелированной САР возникает задача синтеза коррелирующих устройств, позволяющих повысить качество функционирования системы.

Литература

1. Бахмуров А.В., Гильфанов К.Х., Гольбрайх Л.Я. Совершенствование алгоритма управления объектом теплоэнергетики на основе интеллектуального контроллера // Энергетика Татарстана. 2013. С.42–46.
2. Варенов А.А., Якимов Н.Д., Ерашова Ю.Н. Инженерная модель теплового режима в индивидуальном доме // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 3-4. С.22–28.
3. Варенов А.А. Структура и динамическая модель электропривода с импульсным управлением для беспилотного летательного аппарата мониторинга энергообъектов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С.78–83.
4. Варенов А.А., Малев Н.А. Гибридный регулятор напряжения релейного типа в системе бесперебойного электроснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 7-8. С.47–53.
5. Варенов А.А., Малев Н.А., Погодицкий О.В. Аналоговый и цифровой регуляторы автоматической системы стабилизации частоты // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 5-6. С. 120–129.
6. Математическое моделирование систем автоматического регулирования: Практикум по автоматике / Под ред. Карташова Б.А. М.: “Колосс”, 2006.
7. Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А. ТАУ в примерах и задачах с решениями в MATLAB. Изд. Лань, 2017. 464с.

8. WONGH.Y. Heat transfer for engineer. LONGMAN, 1977, p.166.WONG, H.Y., 1977. Heat transfer for engineer. LONDON.: LONGMAN.

9. Mehta B.R., Y. 26 November 2014. Jaganmohan Reddy. Industrial Process Automation Sistemsist Edition. Design and Implementation..Butterwrth-Heinemann.

10. Mohd Badli Ramli, Mohd Faiz, Mohd Zin. Egg Hatching Incubator Using Conveyor Rotation System// www.sciencedirect.com URL:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015/07/091.

Авторы публикации:

Варенов Александр Андреевич – профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: luna199645@mail.ru.

Зенцов Василий Павлович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: vpzen@yandex.ru.

Малёв Николай Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: maleev@mail.ru.

References

1. Bakhmurov A.V., Gilfanov K.H., Golbraikh L.Ya. Perfection of the algorithm of control of the object of heat power engineering on the basis of an intelligent controller. Power engineering of Tatarstan. 2013. P.42–46.

2. Varenov A.A, Yakimov N.D, Yerashova Yu.N. Engineering model of the thermal regime in the individual house. //Известия HIGH SCHOOL. Problems of energy. 2016. № 3-4. P.22–28.

3. Varenov A.A. Structure and dynamic model of an electric drive with pulse control for an unmanned aircraft for monitoring energy facilities.// Известия HIGH SCHOOL. Problems of energy, 2013. № 5-6. P.78–83.

4. Varenov A.A, Malev N.A. Hybrid voltage regulator of relay type in the uninterruptible power supply system // Известия HIGH SCHOOL. Problems of Power Engineering, 2013. No. 7-8. P.47–53.

5. Varenov A.A, Malev N.A, Pogoditsky O.V. Analog and digital regulators of automatic frequency stabilization system. //Известия HIGH SCHOOL. Problems of Power Engineering, 2014. № 5-6. P.120–129.

6. Ed. Kartashov B.A. Workshop on automation. Mathematical modeling of automatic control systems. М.: "The Colossus", 2006.

7. Gaiduk A.R, Belyaev V.E, Piavchenko T.A. TAU in examples and problems with solutions in MATLAB. Ed. Lan. 2017. 464p.

8. WONG H.Y. Heat transfer for engineer. LONGMAN, 1977, p.166. WONG, H.Y., 1977. Heat transfer for engineer. LONDON.: LONGMAN.

9. Mehta B.R., Y. 26 November 2014. Jaganmohan Reddy. Industrial Process Automation Sistemsist Edition. Design and Implementation .. Butterwrth-Heinemann.

8. WONGH.Y. Heat transfer for engineer. LONGMAN, 1977, p.166.WONG, H.Y., 1977. Heat transfer for engineer. LONDON.: LONGMAN.

9. Mehta B.R., Y. 26 November 2014. Jaganmohan Reddy. Industrial Process Automation Sistemsist Edition. Design and Implementation..Butterwrth-Heinemann.

10. Mohd Badli Ramli, Mohd Faiz, Mohd Zin. Egg Hatching Incubator Using Conveyor Rotation System// www.sciencedirect.com URL:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015/07/091.

Authors of the publication

Alexander A. Varenov – Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Kazan State Power Engineering University (KSPU). E-mail: luna199645@mail.ru.

Vasiliy P. Zentsov – Ph.D. (physical&mathematical), Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Kazan State Power Engineering University (KSPU), E-mail: vpzen@yandex.ru.

Nikolay A. Malev – Ph.D. (Techn.), Associate Professor, Instrument Making and Mechatronics Department, Kazan State Power Engineering University (KSPU), E-mail: maleev@mail.ru.

Поступила в редакцию

24 апреля 2018 г.