

О. Н. ЕВСЕЕНКО

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТИПОВ РЕГУЛЯТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Проведен анализ существующих типов регуляторов для тепловых объектов; представлен алгоритм выбора типа регулятора в зависимости от величины транспортного запаздывания и времени переходных процессов объекта управления. Предложен закон управления на основе ШИМ-регулирования с предсказанием для управления тепловыми объектами с распределенными параметрами с большим транспортным запаздыванием; представлены результаты управления температурой объекта с помощью ШИМ-регулирования с предсказанием.

Ключевые слова: транспортное запаздывание, П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы, предиктор Смита, двух-, трёхпозиционный регулятор, ППИ-регулятор, регулятор Ресвика, ШИМ-регулятор с предсказывающим фильтром, объект с распределенными параметрами.

Введение. На данный момент из-за повышения тарифов на газ и электроэнергию всё больше людей отказывается от централизованного теплоснабжения и переходят к индивидуальному отоплению. Сразу же возникает проблема «правильной» настройки отопительного оборудования, так как чрезмерное увеличение температуры на нагревательном элементе ведет к перегреву помещений, что влечет за собой перерасход теплового ресурса и ухудшение комфортности проживания.

В качестве закона управления в большинстве современных котельных в Украине используется кривая погодозависимого регулирования: по температуре наружного воздуха, в зависимости от мощности и типа котла, выставляется температура теплоносителя.

Недостатком такого метода является настройка параметров регулятора в ручном режиме, при котором не учитываются характеристики конкретного объекта управления. Поэтому всё больше котельных переходят к использованию промышленной автоматики с «интеллектуальными» законами управления.

Цель исследований – проанализировать существующие законы управления тепловыми объектами, работающие в реальном масштабе времени и способные предсказывать температуру на определённый промежуток времени; представить альтернативный закон управления объектами с большим транспортным запаздыванием.

Транспортное запаздывание часто встречается в технологических процессах, когда материал перемещается с определенной скоростью из одной точки в другую без какого-либо изменения его свойств и характеристик. Оно может наблюдаться при течении жидкости или газа через трубы, при движении волокна или полосы какого-либо материала (ткань, бумага, резина и др.) [1].

Время транспортного запаздывания рассчитывается по формуле (1).

$$t_0 = \frac{L_u}{v}, \quad (1)$$

где: t_0 – время транспортного запаздывания, с;

L_u – расстояние от датчика до исполнительного механизма, м;

v – скорость перемещения вещества или энергии, м/с;

Для определения динамических характеристик объекта управления на практике решают задачу идентификации. При нулевых начальных условиях на объект управления подается единичный ступенчатый сигнал. На выходе получают переходную характеристику.

Пример переходной характеристики представлен на рис. 1.

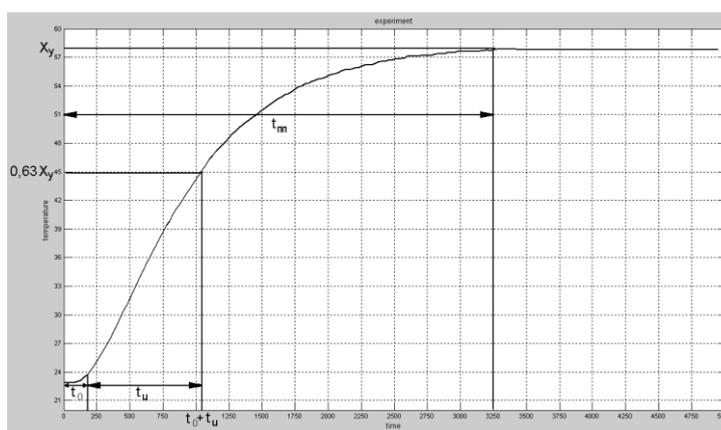


Рис. 1 – Переходная характеристика объекта управления

По переходной характеристике определяются следующие характеристики объекта управления – X_y , t_0 , t_u , K , t_{nn} , где:

X_y – установившееся значение. Максимальное значение, которое может быть достигнуто при данной мощности нагревателя;

t_u – постоянная времени объекта – время, за которое температура достигнет значения $0,63 \cdot X_y - t_0$;
 t_{nn} – время переходных процессов;
 $K = \frac{X_y}{Q}$ – динамический коэффициент усиления,
 отношение величины технологического параметра в установившемся режиме X_y к входной величине Q .

Исходя из соотношения $\frac{t_o}{t_{nn}}$ объекты делятся на (рис. 2):

1. Объекты без запаздывания: $\frac{t_o}{t_{nn}} < 0.05$;

2. Объекты с большой инерционностью и с малым запаздыванием: $0.05 < \frac{t_o}{t_{nn}} < 0.2$;

3. Объекты с существенным запаздыванием: $\frac{t_o}{t_{nn}} > 0.2$.

Исходя из соотношения $\frac{t_o}{t_{nn}}$ регуляторы можно разделить на следующие группы (рис. 2).



Рис. 2 – Выбор регулятора в зависимости от отношения времени транспортного запаздывания ко времени переходных процессов

Двухпозиционный регулятор

Данный регулятор температуры применяется для управления объектами с малым запаздыванием ($\frac{t_o}{t_{nn}} < 0.05$).

Величина гистерезиса H влияет на точность регулирования температуры. Уменьшение величины зоны гистерезиса увеличивает не только точность регулирования, но и частоту включения нагревательного элемента, что приводит к быстрому износу элементов коммутации.

Качество регулирования определяется параметрами объекта регулирования – тепловой инерцией, мощностью нагревателя и т.д.

Достоинством данного регулятора является простота в настройке и эксплуатации.

Статическая характеристика двухпозиционного регулятора приведена на рис. 3.

Алгоритм работы двухпозиционного регулятора определяется по формуле (2):

$$\begin{cases} Q = Q_{max}, t < t_0 - H \\ Q = 0, t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

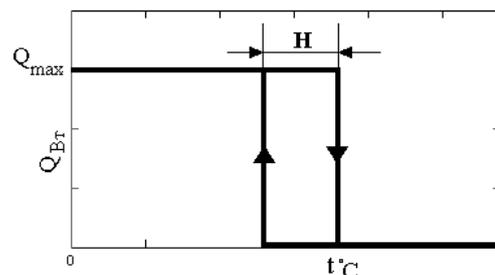


Рис. 3 – Статическая характеристика двухпозиционного регулятора

Трёхпозиционный регулятор

Трёхпозиционные регуляторы используются для систем управления уровнем веществ; переключением исполнительных механизмов; нагревания, распределения и смешивания различных потоков веществ с помощью трехходовых клапанов, кранов, смесителей, реверсивных электродвигателей, сервоприводов и др.

У трёхпозиционных регуляторов исполнительный механизм может занимать три положения: полностью открытое, нормальное (среднее) или полностью закрытое.

Данный регулятор, по сравнению с двухпозиционным регулятором, имеет более быструю реакцию системы регулирования на управляющее воздействие, высокую точность и качество регулирования.

Статическая характеристика трехпозиционного регулятора приведена на рис. 4.

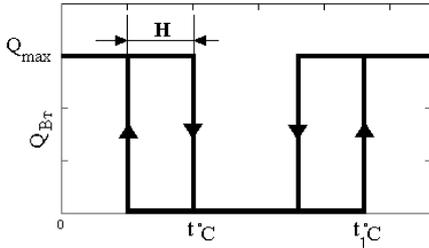


Рис. 4 – Статическая характеристика трёхпозиционного регулятора

ПИД-регулятор

ПИД-регуляторы позволяют обеспечить для объектов с малым запаздыванием и большой инерционностью ($\frac{t_o}{t_{nn}} < 0.2$) высокое качество управления с ошибкой регулирования $< 1\%$. Однако, при $\frac{t_o}{t_{nn}} > 0.2$ ПИД-регулятор обладает плохим качеством регулирования и может перейти в режим автоколебаний [2].

ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, состоящий из суммы трёх слагаемых (3).

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (3)$$

Структурная схема ПИД-регулятора представлена на рис. 5.

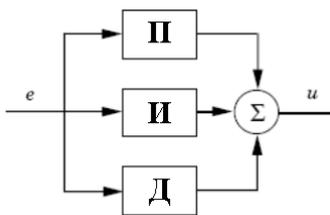


Рис. 5 – Структурная схема ПИД-регулятора

ПИД-регулятор состоит из трёх составляющих – пропорциональная (П), интегральная (И), дифференциальная (Д).

П-регулятор является одним из самых простых и распространенных алгоритмов управления. Выходной

сигнал П-регулятора пропорционален входному, с некоторым коэффициентом пропорциональности K .

Достоинством П-регулятора является простота настройки, отсутствие инерционности, высокое быстродействие.

Недостаток П-регулятора – наличие статической ошибки, из-за которой регулируемая величина не может стабилизироваться на заданном значении.

Для устранения статической ошибки к П-регулятору добавляют интегральную составляющую (И-регулятор), которая пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины.

При отсутствии внешних возмущений регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей становится равным нулю, а выходной сигнал обеспечивается интегральной составляющей [2].

Достоинством И-регулятора является отсутствие ошибки регулирования в установившемся состоянии ($\varepsilon_{уст} = 0$), а недостатками – низкое быстродействие и возможность возникновения автоколебаний в случае некорректного выбора коэффициента K_i .

Дифференциальная составляющая (Д-регулятор) предназначена для прогнозирования и противодействия будущим отклонениям. Использование Д-регулятора увеличивает быстродействие системы, но вместе с тем появляется значительное перерегулирование, что приводит к неустойчивости системы.

В зависимости от комбинаций звеньев П, И, Д возможны вариации регуляторов – ПИ, ПД, ПИД.

Предиктор Смита

Для управления объектами с отношением $\frac{t_o}{t_{nn}} > 0.2 \dots 0.5$ используют регуляторы, содержащие блоки для предсказания и устранения поведения объекта на время транспортного запаздывания t_o .

Впервые структура такого регулятора была предложена Смитом в 1957 году [3], поэтому данный регулятор в литературе называется предиктором Смита.

Цель предиктора Смита – предсказать величину сигнала на выходе объекта до того, как он там появится на самом деле.

За счет этого предсказания из модели исключается величина запаздывания, что даёт возможность прогнозирования поведения объекта до момента появления сигнала на выходе.

Структурная схема предиктора Смита представлена на рис. 6.

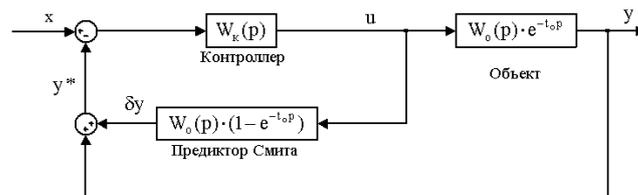


Рис. 6 – Структурная схема классического предиктора Смита

Предиктор Смита имитирует разницу между моделью процесса с зоной нечувствительности и реальным объектом. Этот корректирующий сигнал добавляется к измеренному выходному сигналу, чтобы предсказать, какой сигнал был бы на выходе, если бы не было запаздывания. Прогнозируемое значение y^* подается на контроллер $W_k(p)$, который корректирует управляющее воздействие U [4].

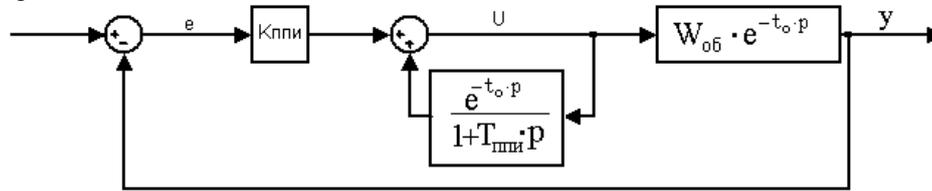


Рис. 7 – Структурная схема классического ППИ-регулятора

Предсказание ППИ-регулятора формируется путем коррекции управляющего воздействия, которое было принято, но еще не появилось на выходе из-за задержки в процессе. Выходной сигнал формируется по формуле (4).

$$U(p) = \frac{E(p)}{\lambda \cdot k_p} \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right) \cdot - \frac{U(p)}{\lambda \cdot T_u \cdot p} (1 - e^{-t_0 \cdot p}), \quad (4)$$

где λ – настраиваемый параметр
 T_u – время интегрирования

Недостатком ППИ-регулятора является высокая чувствительность к внешним возмущениям.

Регулятор Ресвика

Регулятор Ресвика (рис. 8) предназначен для устранения транспортного запаздывания, которое

ППИ-регуляторы

Предиктивный ПИ-регулятор (ППИ-регулятор) является одной из модификаций предиктора Смита [2]. Структурная схема ППИ-регулятора представлена на рис. 7.

приводит к неустойчивости замкнутых систем и затрудняет решение задачи синтеза [5].

Во внутренней положительной обратной связи регулятора Ресвика содержится звено чистого запаздывания, которое предсказывает величину выходного сигнала после изменения величины управляющего воздействия U .

Это звено моделирует динамику объекта и постоянно компенсирует реальный выходной сигнал, поэтому из основного контура исключается чистое запаздывание t_0 .

В случае неравенства запаздывания объекта t_0 и моделируемого запаздывания $t_{0,mod}$ система может выйти за границы устойчивости.

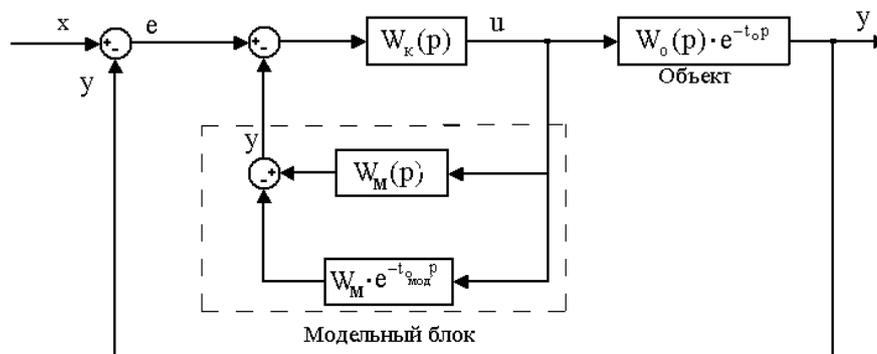


Рис. 8 – Структурная схема регулятора Ресвика

Регулятор с внутренней моделью

В качестве альтернативы существующим типам регуляторов предлагается метод с использованием ШИМ-регулятора с предсказывающим фильтром [6].

Для предсказания температуры на заданный интервал времени и выработку управляющего воздействия первоначально, как и для других методов, необходимо получить переходную характеристику объекта управления.

По полученной переходной характеристике объекта управления определяются время переходного процесса t_{mn} и время транспортного запаздывания t_0 .

Затем время переходного процесса делится на N равных интервалов длительностью t_u и снимаются переходные характеристики длительностью $j \cdot t_u$, $1 \leq j \leq N$, $j \cdot t_u < t_{mn}$.

Результаты экспериментов представлены на рис. 9.

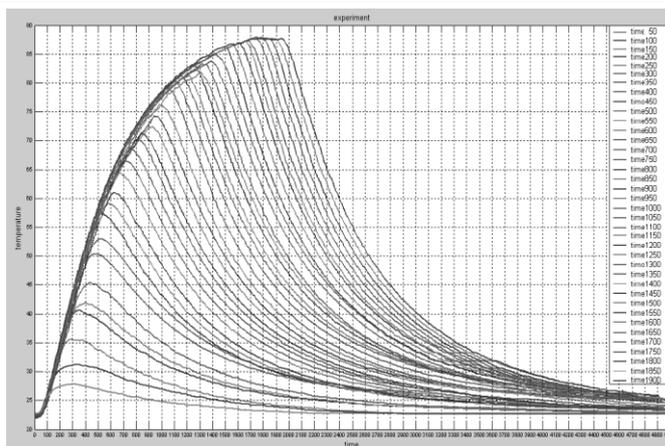


Рис 9 – Семейство характеристик длительностью $j \cdot t_u$

В точках $j \cdot t_u$, где $j \cdot t_u = 1 \cdot t_u, 2 \cdot t_u, \dots, N \cdot t_u$ – измеряется значение выходного сигнала (температуры) $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N$. По формуле (5) рассчитываются коэффициенты передачи теплового воздействия $\eta_{i,j}$ для управления тепловым полем в момент времени j .

$$\eta_{i,j} = \frac{\Delta\theta_i}{Q \cdot t_{ij}} \Big|_{t_{ij} = t_u \cdot j}, \quad (5)$$

где: $\Delta\theta_i$ – приращение температуры на i -том интервале $^{\circ}\text{C}$;

Q – мощность теплового потока, Вт;

$t_{u,j}$ – длительность j -го импульса, $1 \leq j \leq N$, с;

После запуска системы программного регулирования начинается вычисление прогнозируемого изменения температуры объекта относительно начальной температуры Θ_0 [7].

По формуле (6) в моменты времени $j \cdot t_d$, где $j \cdot t_d = 1 \cdot t_d, 2 \cdot t_d, \dots, N \cdot t_d$ рассчитывается полное отклонение прогнозируемой температуры объекта от

температуры, заданной программно – Δ , и принимается решение о включении нагревателя.

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \Delta\Theta_j^3 - \Delta\Theta_j^p + \Delta\Theta_{j-1}^3 - \Delta\Theta_{j-1}^d, \quad (6)$$

где $\Delta\Theta_j^3$ – заданная температура объекта, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta\Theta_j^p$ – предсказанная температура объекта, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta\Theta_{j-1}^d$ – текущая температура объекта, $^{\circ}\text{C}$;

t_d – период дискретизации, с;

По формуле (7) вычисляется длительность теплового воздействия на объект:

$$\{\Delta t_u\} = \frac{-\Delta}{Q \cdot [\eta]}, \quad (7)$$

где Q – мощность теплового потока, Вт;

$[\eta]$ – массив коэффициентов передачи теплового воздействия;

Результаты эксперимента по поддержанию заданной температуры представлены на рис. 10.

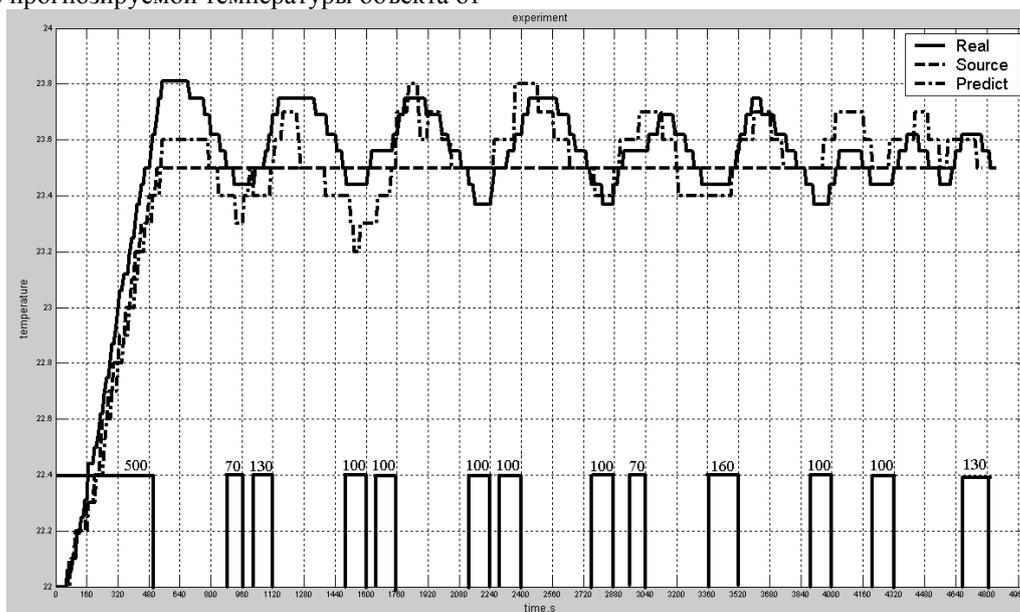


Рис 10 – Реальный эксперимент для заданного температурного режима объекта

Максимальное отклонение полученной температурной кривой от заданной составило 0,25 °С

Существует особый класс регуляторов, основанный на принципах нечеткой логики, генетических алгоритмах и нейронных сетей. Подробную информацию об их настройке и использовании можно найти в [8].

Выводы

В статье проведен обзор существующих регуляторов для тепловых объектов. Показано, что для объектов с большой величиной транспортного запаздывания следует применять регуляторы с предсказанием. Установлено, что существующие типы

Список литературы: 1. Дралюк Б. Н. Системы автоматического регулирования объектов с транспортным запаздыванием / Б. Н. Дралюк, Г. В. Синайский. – М. : Энергия, 1969. – 73 с. 2. Astrom K. J. PID Controllers Theory, Design, and Tuning / Astrom K. J., Hagglung T. – 2-nd ed. – USA, 1995. – 344 p. 3. Smith O. J. M. Close control of loops with dead time / O. J. M. Smith // Chemical Engineering Progress. – 1957. – Vol. 53. – P. 217–235. 4. Syder, J. Dead-time compensators: performance and robustness issues / Syder J., Heeg T., O'Dwyer A. // Proceedings of Process Control and Instrumentation, July 26-28 2000, Glasgow, Scotland. – Glasgow, 2000. – P. 166–171. 5. Ротач В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М. : МЭИ, 2004. – 400 с. 6. Спосіб програмного управління тепловим об'єктом з застосуванням широтно-імпульсної модуляції : пат. на корисну модель № 81276 Україна : МПК G05D 23/19 (2006.01) / Савицький С. М., Гапон А. І., Качанов П. О., Євсеєнко О. М., Вискребенцев В. О. ; заявник Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u201300059 ; заявл. 02.01.2013 ; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с. 7. Евсеенко О. Н. Получение исходных данных для проведения эксперимента по управлению температурой объекта с помощью ШИМ-модуляции и предсказывающего фильтра / О. Н. Евсеенко, С. М. Савицкий, Д. В. Сальников // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. / Чернів. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича – Чернівці, 2014. – С. 165–166. 8. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rlda.ru/Denisenko_PID_07.pdf. – Загл. с экрана.

регуляторов с предсказанием – ППИ-регулятор, регулятор Ресвика, предиктор Смита качественно обрабатывают алгоритм управления только при отсутствии внешних возмущений.

Предложен алгоритм с использованием ШИМ-регулятора и предсказывающего фильтра, где длительность управляющего воздействия определяется по величине суммарной ошибки рассогласования и массива коэффициентов передачи теплового воздействия. В данном регуляторе внешние возмущения компенсируются за счет подведения дополнительно теплового потока.

Bibliography (transliterated): 1. Drajluk B. N. Sistemy avtomaticheskogo regulirovanija ob'ektov s transportnym zapazdyvanijem / B. N. Drajluk, G. V. Sinajskij. – M. : Jenergija, 1969. – 73 p. 2. Astrom K. J. PID Controllers Theory, Design, and Tuning / Astrom K. J., Hagglung T. – 2-nd ed. – USA, 1995. – 344 p. 3. Smith O. J. M. Close control of loops with dead time / O. J. M. Smith // Chemical Engineering Progress. – 1957. – Vol. 53. – P. 217–235. 4. Syder, J. Dead-time compensators: performance and robustness issues / Syder J., Heeg T., O'Dwyer A. // Proceedings of Process Control and Instrumentation, July 26-28 2000, Glasgow, Scotland. – Glasgow, 2000. – P. 166–171. 5. Rotach V. Ja. Teorija avtomaticheskogo upravlenija / V. Ja. Rotach. – Moscow. : MJeI, 2004. – 400 p. 6. Sposib prohramnoho upravlinnya teplovym ob"yektom z zastosuvannyam shyrotno-impul'snoyi moduljatsiji : pat. na korisnu model' no 81276 Ukrainy : MPK G05D 23/19 (2006.01) / Savyts'kyj S. M., Hapon A. I., Kachanov P. O., Yevseyenko O. M., Vyskrebentsev V. O. ; zayavnyk Nats. tekhn. un-t «Khark. politekhn. in-t». – # u201300059 ; zayavl. 02.01.2013 ; opubl. 25.06.2013, Byul. no 12. – 4 s. 7. Evseenko O. N. Poluchenie ishodnyh dannyh dlja provedenija jeksperimenta po upravleniju temperaturuj ob#ekta s pomoshh'ju ShIM-moduljatsii i predskazyvajushhego fil'tra / O. N. Evseenko, S. M. Savyts'kyj, D. V. Sal'nykov // Fyzyko-tekhnologichni problemy radiotekhnichnykh prystroyiv, zasobiv telekomunikatsiy, nano- ta mikroelektroniky : materialy IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. / Cherniv. nats. un-t. im. Yu. Fed'kovycha – Chernivtsi, 2014. – P. 165–166. 8. Denisenko V. PID-reguljatory: principy postroeniya i modifikacii. Ch. 2 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.rlda.ru/Denisenko_PID_07.pdf. – Zagl. s jekrana.

Надійшло (received) 19.12.2015

Євсеєнко Олег Николаєвич – Национальний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; тел.: (063) 425-96-73; e-mail: sendmeyouemail@mail.ru.

Yevseienko Oleh Nikolaevich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate; tel.: (063) 425-96-73; e-mail: sendmeyouemail@mail.ru.