

УДК 621.396

Исследование переходных процессов в термоэлектрических системах климат-контроля с нелинейным регулированием модулями Пельтье

Суржик Д.И., Кузичкин О.Р., Бондарик К.В., Кочеткова Е.С., Трошина Е.Н.

Перспективным направлением в решении проблемы энергосбережения является использование комплексного подхода - принципа тригенерации, в котором тепловая энергия генерируется на основе термоэлектрического метода, предполагающего использование специальных модулей из термоэлементов на основе эффекта Пельтье. На основе данного метода разработана система климат-контроля, представленная структурной схемой и эквивалентной функциональной моделью. Для оценки ее соответствия определенному качеству процесса управления при переходе системы на новый режим работы проведен сравнительный анализ использования линейного и нелинейного алгоритмов управления термоэлектрическими модулями. При этом нелинейности задавались двумя звеньями насыщения, соответствующими блокам Saturation в среде MatLAB Simulink. С помощью разработанных моделей было проведено исследование работы предложенной системы климат-контроля во временной области для исследуемых режимов управления ТЭМ при различных значениях блоков насыщения, по результатам которого установлено, что использование нелинейного регулирования позволяет снизить время переходных процессов, динамическую ошибку управления и колебательность, что недостижимо при использовании традиционных линейных алгоритмов.

Ключевые слова: энергосбережение, тригенерация, климат-контроль, термоэлектрика, эффект Пельтье, автоматическое регулирование.

Введение

С каждым годом ввиду общемирового дефицита энергоресурсов и резкого увеличения их стоимости проблемы энергосбережения становятся все более актуальными [1-6]. Особенно остро они стоят в ряде отраслей [7], где для определенных объектов в обязательном порядке необходимо создание особого микроклимата производства, на обеспечение которого требуются существенные затраты энергоресурсов [8].

Решение данной проблемы во многих странах мира на данный момент сводится к установке на объектах контроля специальной энергосберегающей аппаратуры и/или технического переоснащению используемых систем энергообеспечения. Кроме того, ряд авторов отмечает перспективность использования комплексного подхода к решению задачи энергосбережения на основе принципа тригенерации [9-11], предполагающего одновременное получение электрической и тепловой энергии, что позволяет снизить энергоемкость производства и себестоимость выпускаемой продукции.

В качестве одной из основных составляющих частей для построения мно-

гофункциональных тригенеративных систем предлагается использовать термоэлектрический метод [12-17], характеризующийся рядом ключевых достоинств (экологичностью, исключительной надежностью компонентов, возможностью крайне быстрого охлаждения, высокой точностью регулировки температуры, независимостью параметров модулей от силы тяжести и ориентации в пространстве, малой чувствительностью к высоким механическим нагрузкам, отсутствием необходимости в техническом обслуживании). Данный метод основан на использовании эффекта Пельтье [18-21] (поглощении или выделении тепла при протекании постоянного электрического тока через разнородные проводники), реализуемого с помощью термоэлектрических модулей (ТЭМ).

Термоэлектрическая система климат-контроля

Использование термоэлектрического метода получения тепла и холода позволяет реализовать на его основе систему климат-контроля [12,13], управление микроклиматом с помощью которой осуществляется под действием управляющих вели-

чин в виде токов управления I_y , являющихся функционалами от желаемых значений температуры $T_{ж}$ и результатов измерений температуры с помощью датчиков $T_{д}$

$$I_{yPPnl} = f(T_{жnl}, T_{дnl}).$$

Использование гибридной системы вентиляции объектов контроля на основе конвекционного принципа охлаждения позволяет осуществлять тепло- и холодоотвод со спав термоэлектрических модулей для создания нестационарного температурного поля вида $T = f(x, y, z, t)$, где x, y, z - пространственные координаты, t - время.

Данное поле является трехмерным и нестационарным и формируется с помощью точечных источников тепла или холода, работа каждый которых описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье при наличии внутренних источников теплоты вида [22]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_V}{c\rho},$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ - коэффициент температуропроводности, λ - коэффициент теплопроводности, c - удельная теплоемкость, ρ - плотность, $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа, q_V - количество теплоты, выделяемой в единице объема среды в единицу времени.

Частным случаем данного уравнения является конвективный теплообмен [22], при котором совместно протекают процессы конвекции и теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \nabla^2 T,$$

где w_x, w_y, w_z - проекции вектора скорости на оси X, Y, Z.

На основе рассмотренного принципа разработана структурная схема термоэлектрической системы климат-контроля, представленная на рис. 1. Данная схема является простейшей и включает в себя единичный термоэлектрический модуль Пельтье (ТЭМ), регулятор его температуры (РТ), систему вентиляции (СВ) с единичным точечным источником

тепла/холода, единичный датчик температуры (ДТ) и компенсатор инерционности (КИ) для данного датчика. На схеме приняты следующие обозначения: $T_{жс}$ - желаемая температура; I_y - управляющий ток для термоэлектрического модуля Пельтье; $T_{ми}$ - температура точечного источника тепла/холода; $T_{д}$ - температура на выходе датчика температуры; $T_{дкомп}$ - температура на выходе датчика температуры после прохождения компенсатора инерционности.

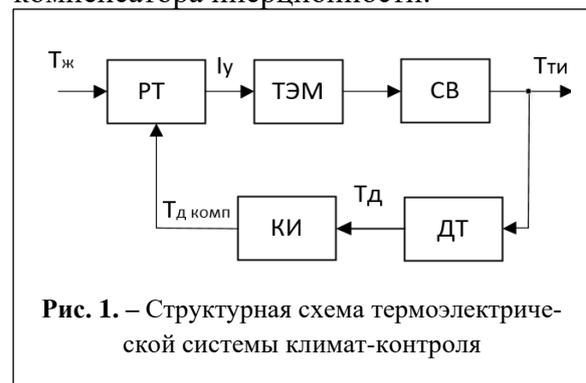


Рис. 1. – Структурная схема термоэлектрической системы климат-контроля

На основе данной схемы разработана ее эквивалентная функциональная модель – рис. 2, где приняты следующие обозначения: $T_{пом}$ - помеховое воздействие, имитирующее процессы теплообмена между окружающей средой и внешними сторонами ТЭМ; $H_{РТ}(p)$ - передаточная функция регулятора температуры (используется для снижения инерционности термоэлектрического модуля Пельтье); $H_{Аз}(p)$ - передаточная функция аperiodического звена регулятора температуры; $H_{ТЭМ}(p)$ - передаточная функция термоэлектрического модуля Пельтье; $H_{СВ}(p)$ - передаточная функция системы вентиляции; $H_{ДТ}(p)$ - передаточная функция датчика температуры; $H_{КИ}(p)$ - передаточная функция компенсатора инерционности; p - оператор Лапласа; k_I и k_P - коэффициенты передачи интегральной и пропорциональной составляющих регулятора температуры.

Передаточные функции основных структурных звеньев, а также всей системы в целом для полезного и помехового воздействий подробно представлены в [23-25].

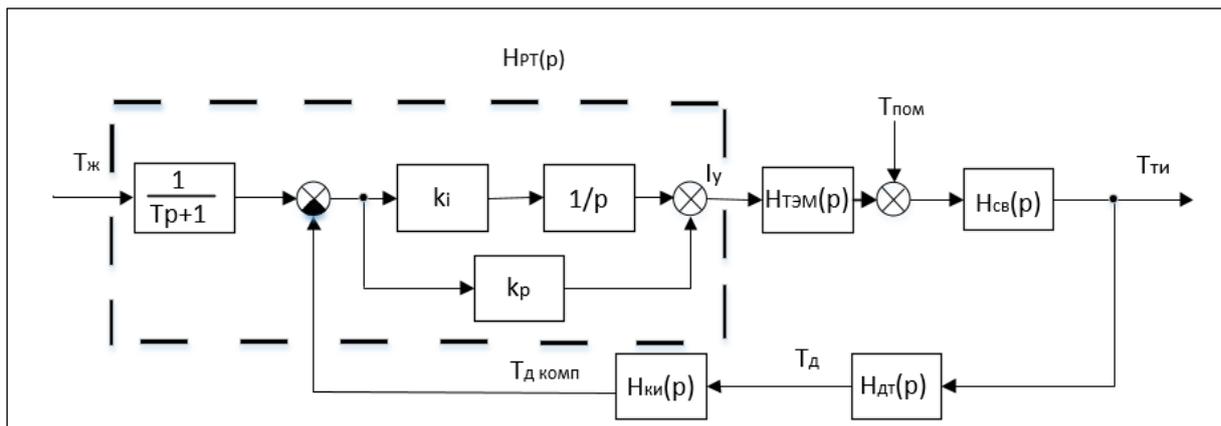


Рис. 2. – Эквивалентная функциональная модель термоэлектрической системы климат-контроля

Линейное и нелинейное регулирование термоэлектрическими модулями Пельтье в системах климат-контроля

Разрабатываемая система климат – контроля должна соответствовать определенному качеству процесса управления, которое определяется поведением системы при переходе в новый режим работы [26-28].

В данной статье для сравнительного анализа используется два типа системы климат-контроля: линейная и нелинейная, функциональные модели которых в среде MatLAB Simulink с указанием весовых коэффициентов

и передаточных функций представлены на рис. 3.

Нелинейности на рис. 3б вводятся двумя блоками Saturation (ограничения сигналов) с целью компенсации нежелательных эффектов от естественных нелинейностей ТЭМ, а также для придания системе управления улучшенных показателей качества.

Статическая характеристика данной кусочно-линейной однозначной (каждому значению входной величины x соответствует одно определенное значение выходной величины z) непрерывной нелинейности представлена на рис. 4 и аналитическая задается как

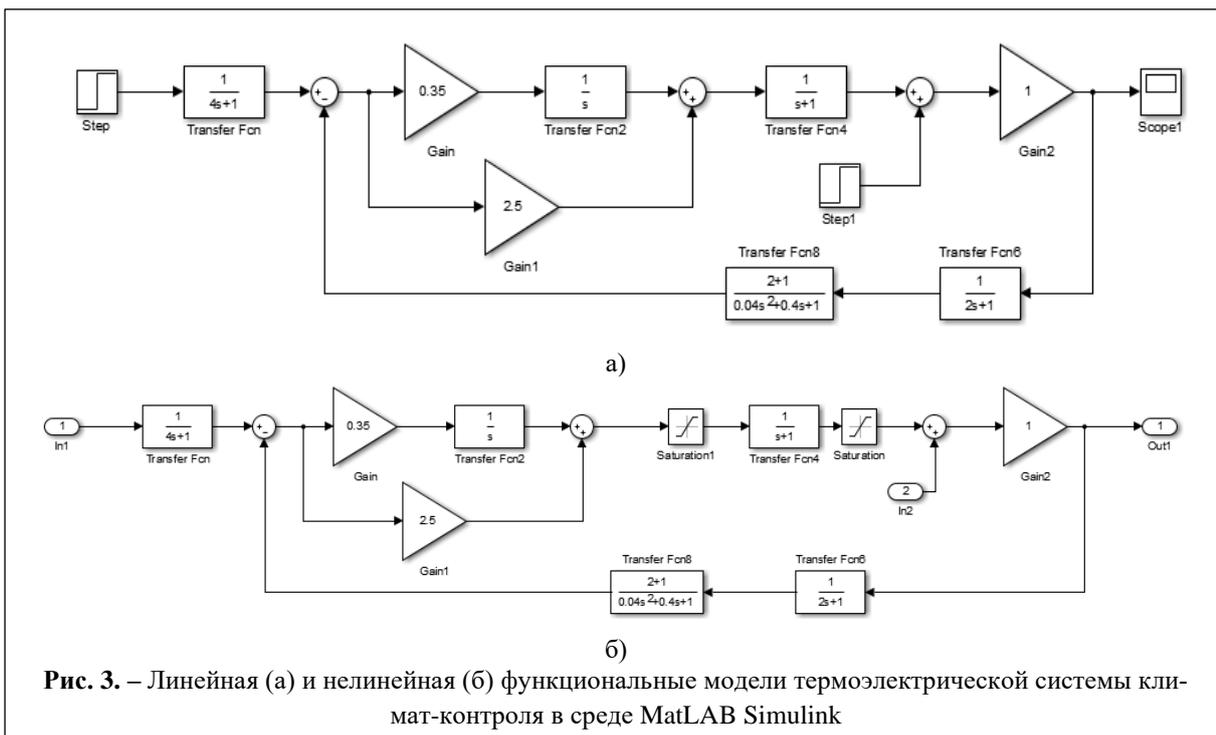


Рис. 3. – Линейная (а) и нелинейная (б) функциональные модели термоэлектрической системы климат-контроля в среде MatLAB Simulink

$$Z = \begin{cases} B & \text{at } X > b; \\ kX & \text{at } |X| \leq b; \\ -B & \text{at } X < -b. \end{cases}$$

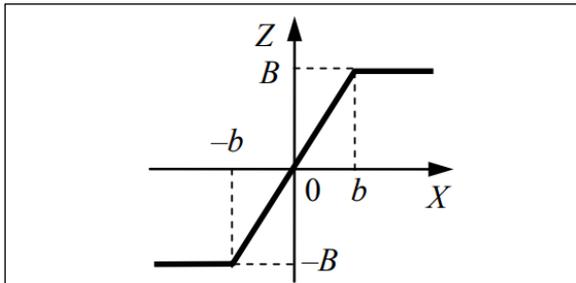


Рис. 4. – Статическая характеристика нелинейности насыщения (ограничения) сигналов

В случае, когда линейная часть системы эквивалентна фильтру нижних частот, для данных звеньев можно воспользоваться методом гармонической линеаризации, идея которой основана на использовании уравнения, получаемого отбрасыванием высших гармоник в разложении нелинейной функции в ряд Фурье. В операторной форме данное выражение имеет вид

$$z = q(A)x + q'(A) \frac{px}{\omega}$$

где $q(A) = \frac{B_1}{A}$; $q'(A) = \frac{A_1}{A}$. – коэффициенты гармонической линеаризации, определяемые для выбранного типа нелинейности как

$$q(A) = \frac{2B}{\pi b} \left[\arcsin \frac{b}{A} + \frac{b}{A^2} \sqrt{A^2 - b^2} \right];$$

$$q'(A) = 0 \text{ at } A \geq b.$$

С помощью разработанных моделей проведено исследование работы предложенной системы климат-контроля во временной области для линейного (синий цвет) и нелинейного (коричневый цвет) режимов управления ТЭМ при различных значениях блоков насыщения – рис. 5-7.

Заключение

Из полученных графиков можно сделать вывод, что использование нелинейного алгоритма управления ТЭМ позволяет придать системе климат – контроля свойства, принципиально недостижимые традиционными линейными средствами. Это проявляется в обеспечении крайне высокого быстродействия при переходных процессах (уменьшается в 2 – 20 раз), а также снижении динамической ошибки регулирования и колебательности при наличии одинаковых структурных элементов, их коэффициентов и естественных ограничений на уровни управляющих и помеховых воздействии.

Таким образом, предложенный подход к нелинейному регулированию в системах климат-контроля может служить эффективным вариантом управления ТЭМ, позволяющим

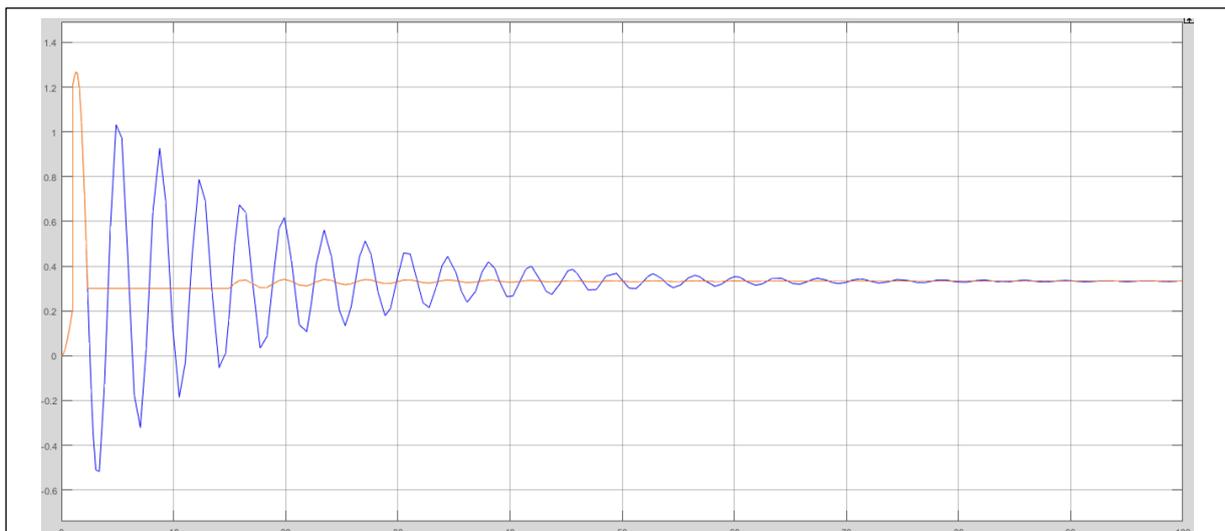


Рис. 5. – Переходной процесс термоэлектрической системы климат – контроля при коэффициентах первого блока насыщения (2; -2) и второго (0,7; -0,7)

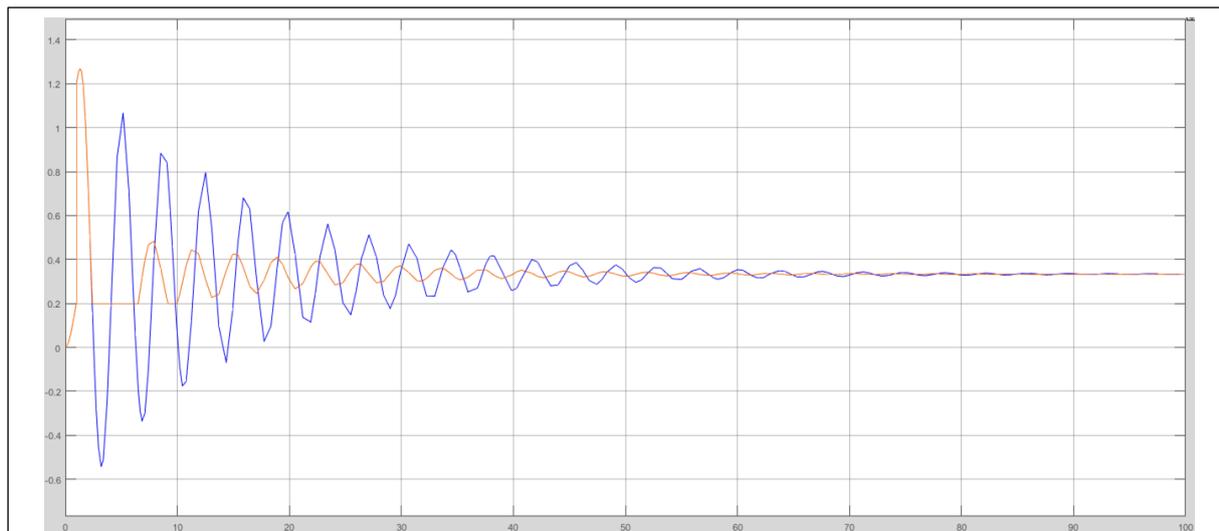


Рис. 6. – Переходной процесс термоэлектрической системы климат – контроля при коэффициентах первого блока насыщения (2; -2) и второго (0,8; -0,8)

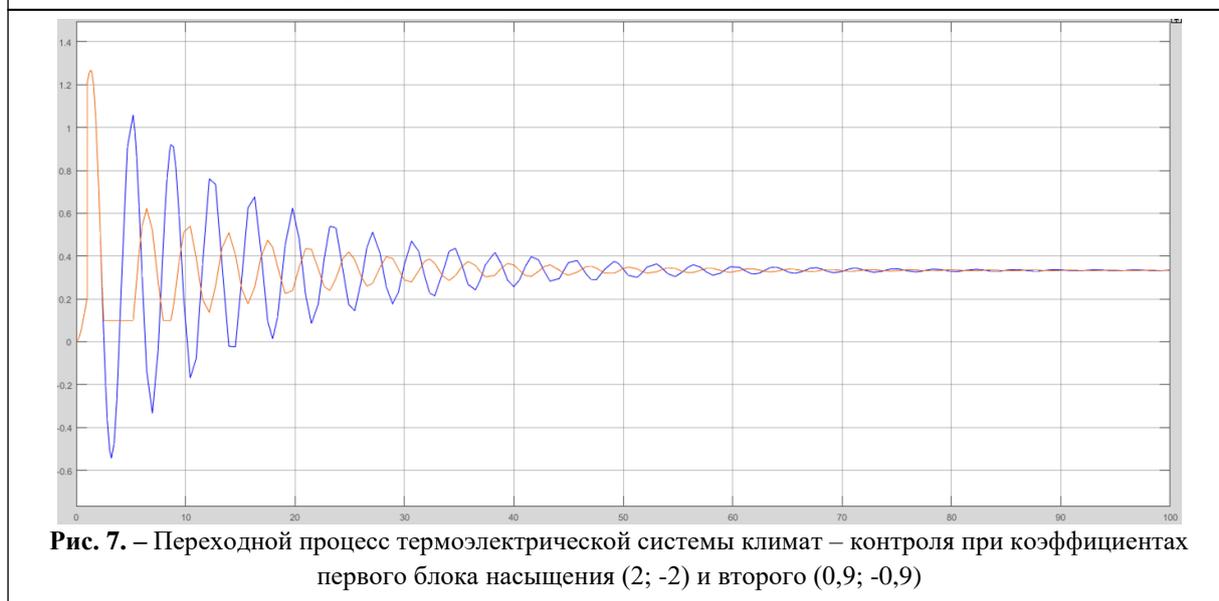


Рис. 7. – Переходной процесс термоэлектрической системы климат – контроля при коэффициентах первого блока насыщения (2; -2) и второго (0,9; -0,9)

решать задачи оптимизации и синтеза данного класса устройств с улучшенными характеристиками и показателями качества.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания-2019-1497 «Исследование и разработка комплексных энергосберегающих охлаждающих и термоэлектрических регенеративных систем».

Литература

1. 1. Danilov N.I., Shchelokov Y.M. Basics of energy saving. - Ekaterinburg.: HOU VPO UGTU-UPI. - 2006. – 564 p.

2. Berezovsky N.I., Berezovsky S.N. Kost-yukevich E.K. Energy saving technology: Textbook. - Minsk.: BIP-C Plus. - 2007. – 152 p.

3. Andrizhievskii A.A., Volodin V.I. Energy saving and energy management: Textbook. - M.: Higher school - 2005. – 294 p.

4. Samoilov M.V., Punicic V.V. Basics of energy saving: Textbook. - M.: BGEU. - 2002. – 198p.

5. Ganja V.L. Fundamentals of efficient use of energy resources: theory and practice of energy saving /Minsk.: Belarusian science. - 2007. – 451 p.

6. Eremkin A.I., Koroleva T.I., Danilin G.V. Economic efficiency of energy saving in heating, ventilation and air conditioning systems. - M.: Publishing house Of the Association of construction universities. - 2008. – 184 p.

7. Minakov I.A., Kulikov O.V., Sokolov N.I., Industry Economics APK / Under the editor ship Minakov I.A - M.: Ear. - 2004. – 464 p.

8. Vishnevsky E.P., Salin M.Yu. Microclimate at the objects of agro-industrial complex / Plumbing,

heating, air conditioning. - №8(116). – 2011. – Pp. 86-89.

9. Галимова Л.В., Славин Р.Б. Анализ эффективности энергосберегающей системы тригенерации / Холодильная техника. - №3. – 2012. – С. 16-19

10. Wang J., Wu J., Zheng C. Analysis of trigeneration system in combined cooling and heating mode / Energy and Buildings. - 2014. - No72. - Pp. 353–360.

11. Surzhik D.I., Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S. An integrated approach to the construction of energy-saving trigeneration systems for objects of the agro-industrial complex / International Journal of Engineering Research and Technology.- Volume 13, Issue 12. – 2021. – Pp. 4622-4626.

12. Surzhik D.I., Vasilyev G.S., Kuzichkin O.R., Konstantinov I.S. Construction of energy-saving cooling and thermoelectric regenerative systems based on peltier modules / International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM.- Volume 2020-August, Issue 4.1. – 2020. – Pp. 37-44(Scopus).

13. Kuzichkin O.R., Konstantinov I.S., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Principles of construction of microclimate control and management systems in agro-industrial production based on identification algorithms / Advances in Dynamical Systems and Applications. - 2021. - 16(1). - Pp. 299–311 (Scopus).

14. Anatychuk L. I. Thermoelements and thermoelectric devices. - Kiev-1979. – 768 p.

15. Bernstein A.S. Thermoelectric generators. - Moscow: Gosenergoizdat. - 1956. - 48 p.

16. Evdulov O.V. Development of devices and systems for cooling based on high-current thermoelectric energy converters, Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Makhachkala. – 2019. - 330 p.

17. Zone A.P. Determining the conditions for obtaining the maximum energy efficiency of the Peltier element / News of Southwestern state University. - 2016, №3(20). -Pp. 153-158.

18. Gnusin P.I. Study of the Peltier element efficiency in various operating modes / Video science. - №1(1). - 2016. –Pp. 20-27.

19. Ohrem V.G. Thermoelectric cooling using the Peltier effect / Applied physics. - № 5. - 2011. - Pp. 123-126.

20. Gorobets N.V., Ohrem V.G. Peltier thermoelectric cooler with additional conductive element / Applied physics. - № 4. - 2007. - Pp. 124-127.

21. Ohrem V.G. New Peltier thermoelectric coolers for deep cooling / Applied physics. - № 4. -2006. - Pp. 121-127.

22. Орлов М.Е. Теоретические основы тепло-техники. Теплообмен / М.Е. Орлов; Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 204 с.

23. Grinkevich V.A. Synthesis of a temperature controller for the Peltier element // Collection of scientific works of NSTU. – 2019. – № 1 (94). – Pp. 7-31 – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-1-7-31.

24. Grinkevich V.A. Synthesis of current regulator for Peltier element // Collection of scientific works of NSTU. – 2018. – № 3-4 (93). – Pp. 16-39 – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-16-39.

25. Grinkevich V.A. Research of a mathematical model of a thermostat based on the Peltier element / Collection of scientific papers of NSTU. – 2017. – № 3 (89). – Pp. 62-77.

26. Vasilyev G.S., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control systems for thermoelectric modules / Advances in Dynamical Systems and Applications. - Volume 15, Issue 2. – 2021. – Pp. 187-197.

27. Kuzichkin OR, Konstantinov IS, Vasilyev GS, Surzhik DI. Control of operability of Peltier modules in cooling systems based on the analysis of transient operating modes / ARCHIVES OF THERMODYNAMICS. – 2021. - Volume 42, Issue 2. – Pp. 31-42 (Scopus, Web of Science).

28. Kuzichkin Oleg R., Surzhik Dmitry I., Vasilyev Gleb S., Shcherbinina Natalya V. Algorithm for monitoring the operability of Peltier thermoelectric modules based on the identification of transients / Journal of Physics: Conference Series. -2021. - 2016(1), 012007.(Scopus).

Поступила 25 марта 2023 г.

A promising direction in solving the problem of energy saving is the use of an integrated approach of the trigeneration principle, in which thermal energy is generated based on the thermoelectric method, which involves the use of special modules from thermoelements based on the Peltier effect. Based on this method, a climate control system has been developed, represented by a block diagram and an equivalent functional model. To assess its compliance with a certain quality of the control process when the system transitions to a new operating mode, a comparative analysis of the use of linear and nonlinear control algorithms for thermoelectric modules was carried out. In this case, nonlinearities were specified by two saturation links corresponding to Saturation blocks in the MatLAB Simulink environment. Using the developed models, a study was carried out of the operation of the proposed climate control system in the time domain for the studied TEM control modes at various values of saturation blocks, the results of which established that the use of nonlinear control makes it possible to reduce the time of transient processes, dynamic control error and oscillation, which is unattainable using traditional linear algorithms.

Key words: energy saving, trigeneration, climate control, thermoelectrics, Peltier effect, automatic control.

Суржик Дмитрий Игоревич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления и контроля в технических системах Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: arzerum@mail.ru

Кузичкин Олег Рудольфович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и робототехнических систем Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ «БелГУ»).

E-mail: oldolkuz@yandex.ru

Бондарик Ксения Владимировна – научный сотрудник кафедры информационных и робототехнических систем Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ «БелГУ»).

E-mail: oldolkuz@yandex.ru

Кочеткова Елизавета Сергеевна – магистрант 3-го курса по направлению подготовки магистратуры 12.04.01 «Приборостроение» факультета информационных технологий и радиоэлектроники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: e.s.kochetkova@mail.ru

Трошина Елена Николаевна – магистрант 3-го курса по направлению подготовки магистратуры 12.04.01 «Приборостроение» факультета информационных технологий и радиоэлектроники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: troshina-alena@bk.ru