УДК 621.372

О.Р. КУЗИЧКИН, Г.С. ВАСИЛЬЕВ, Д.И. СУРЖИК, М.Д. БАКНИН
O.R. KUZICHKIN, G.S. VASILYEV, D.I. SURZHIK, M.D. BAKNIN

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ МОДУЛЕЙ ПЕЛЬТЬЕ

MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN THERMOELECTRIC SYSTEMS BASED ON PELTIER MODULES

Повышение эффективности термоэлектрических модулей (ТЭМ) на основе элементов Пельтье связано с поиском новых термоэлектрических материалов с улучшенными свойствами и применением систем автоматического управления (САУ) данными модулями. Для анализа динамических режимов САУ ТЭС предлагается использовать предложенную авторами методику на основе аппроксимации характеристик системы кусочно-линейными функциями. Методика позволяет получить обобщенные выражения переходных процессов для любого порядка исследуемой системы и произвольного характера нелинейности. На основе анализа погрешностей расчета переходного процесса показана эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: эффект Пельтье, термоэлектрический модуль, система управления, динамическая характеристика

Increasing the efficiency of thermoelectric modules (TEM) based on Peltier elements is associated with the search for new thermoelectric materials with improved properties and the use of automatic control systems (ACS) for these modules. To analyze the dynamic modes of the ACS of TEM, it is proposed to use the method proposed by the authors based on the approximation of the characteristics of the system by piecewise linear functions. The technique allows obtaining generalized expressions of transient processes for any order of the system under study and an arbitrary character of nonlinearity. Based on the analysis of errors in calculating the transient process, the effectiveness of the proposed approach is shown.

Keywords: Peltier effect, thermoelectric module, control system, dynamic characteristic

Введение

Термоэлектрические модули (ТЭМ) на основе элементов Пельтье активно используются в охладительных системах благодаря ряду достоинств: отсутствию движущих частей, высокой точности контроля температуры, возможности нагрева объекта простым переключением полярности приложенного к модулю напряжения (1-Повышение эффективности ТЭМ связано с поиском новых термоэлектрических материалов с улучшенными свойствами [7-10] и применением систем автоматического управления (САУ) [11-13]).

Конструкция ТЭМ на основе эффекта Пельтье показана на рис. 1. Устройство состоит из двух керамических пластин-изоляторов с расположенными между ними последовательно соединенными термопарами, причем каждая сторона модуля в зависимости от полярности контактирует либо p-n, либо n-p переходами.

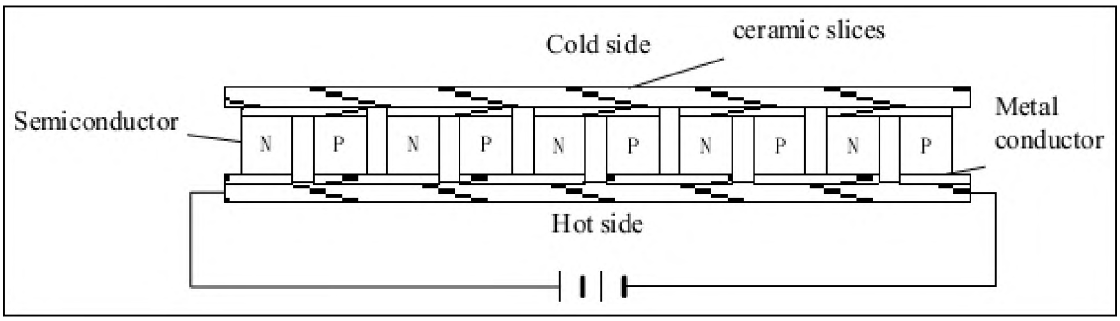

Рисунок 1 - Конструкция термоэлектрического модуля на основе эффекта Пельтье

Использование САУ необходимо, в первую очередь, для температурного контроля объектов в нестабильной среде с быстро изменяющимся тепловым потоком. Анализ и синтез термоэлектрических систем (ТЭС) существенно затрудняется из-за существенной нелинейности элемента Пельтье в широком диапазоне температур и управляющих токов [14-19]. Для анализа динамических режимов ТЭС предлагается использовать предложенную авторами методику на основе аппроксимации характеристик системы кусочно-линейными функциями [20-23]. Это позволит получить обобщенные выражения переходных процессов для любого порядка исследуемой системы и произвольного характера нелинейности.

Расчетные соотношения

Инерционность датчиков системы контроля можно описать передаточной функцией что соответствует апериодическому динамическому звену.

$$H_{n,,}(p) = \frac{T_{Д П.1}}{T_{rrni}} \frac{1}{1 + '^{nij}P}$$

где Тдп] - температуры, регистрируемые датчиками, Ттип! - истинные значения температур, формируемых точечных источниками, - коэффициент передачи звена,

$^{}_{ni}j$ - постоянная времени звена (мера инерционности датчика климата).

Для получения аналитических выражений динамических характеристик (ДХ) нелинейной САУ ТЭМ аппроксимируем нелинейную характеристику Д /∂ на основе кусочно-линейных функций [20-23]. После аппроксимации характеристика имеет вид суммы *M* линейных участков, где *M* - максимальный номер узла аппроксимации. Уравнение аппроксимирующего отрезка прямой для узла m: $/\partial_m = K m У + B m$, где *y* - параметр (амплитуда или фаза) выходного сигнала, K_m, B_m - коэффициенты аппроксимации. Коммутационные элементы полагаем идеальными (коммутируемыми без временных задержек).

Уравнение для выходного сигнала устройства на участке m $[Y_m; Y_{m+1}]$ примет вид:

$$У_m = X_m - K_y n_p M(P)(K_m У_m + B_m),$$

где x - параметр (амплитуда или фаза) входного сигнала, $M(p)$ - коэффициент передачи фильтра в цепи обратной связи, $p = d/dt$ - оператор, t - время, K_y - коэффициент передачи устройства управления (УУ), n_p - коэффициент передачи весового сумматора.

Обозначим $N_m = K_y n_p K_m$ - коэффициент регулирования цепи обратной связи,

$B^{\wedge} = K\ n\ E$ „ . Изображение по Лапласу выходного параметра на участке m примет вид:

$$У_m = X_m - M(P)(N_m У_m + B^{\wedge}_m) - \qquad (1)$$

Это линейное дифференциальное уравнение в интервале [т, т+1], представленное в операторной форме. Общее нелинейное уравнение ТЭС может быть представлено суммой уравнений (1) для всех участков аппроксимации.

Чтобы получить его аналитическое решение, представим воздействие *Xi* (t) в операторной форме: X_m (p) ^ $x_m(t)$. Кусочно-линейная аппроксимация воздействия позволяет получить операторное изображение произвольного воздействия на основе общего аналитического выражения:

$$Xm(p) \quad \frac{1}{Д, p^2} \{p x m((o)' e^{-Ph} - \sum_{j=0}^{J-1} \wedge_j e^{-p(j+Дt)} \ldots \qquad (2)$$

где *tj* - узлы аппроксимации временной функции, *J* - число узлов, A_t - шаг времени,

$= {}^{x}m\,({}^{t}j+1) - {}^{x}m\,({}^{t}j)$ - j-й коэффициент аппроксимации. В первом слагаемом изображения учтена постоянная составляющая воздействия.

Представим передаточную функцию фильтра в виде

$$M(p) = A\{p\}IB\{p\} = \wedge a i^{p} / \wedge \sum_{i=0}^{I} \sum_{i=0}^{I}, \quad (3)$$

где *at*, *Pi* - коэффициенты фильтра.

Подставим (3) в уравнение (1), которое после преобразования примет вид

$$Уш \sim -\wedge i^{a} i^{p} (\wedge {}^{B}m\ j \bullet \quad \sum_{1=0}^{I} \sum_{i=0}^{I} \sum_{i=0}^{I}$$

Произведем замену в полученном выражении оператора Лапласа *p* на дифференциал ^*dt*

$$\wedge P >^{dy} r = YP i \wedge -La \quad {}^{1}d^{i}v \quad {}^{1}{}_{d}{}^{i}Y \quad {}^{1d} \wedge {}^{y}ш\ {}^{B}m\ j \quad 2\wedge dt \quad i=0 \wedge dt\ i=0\ 'dt \quad (4)$$

Составим операторное уравнение для (4) с учетом начальных условий:

$$Ym\,^{(t)} \wedge {}^{Y}m\,(P), \; У\,Ш\,^{(t)} \wedge P^{Y}m\,(P) \sim Уш\,^{(0)}.\; У\,''m\,(t) \wedge P\wedge^{Y}m\,(P) - PУm\,(0) - V\,Ш\,(0),$$

$$У\ m\ ^{(t)} \wedge p^{Y}m\ (P) - p \sim -\wedge Уш\ ^{(0)} - p^{-2} У\ m\ ^{(0)} - \bullet\bullet\bullet$$

$$i$$

$$-Уш\ '\ ''{}^{(0)} = pYm\ (P) - L \quad ''{}^{(0)}\ P\ '' \wedge \bullet \quad K='$$

Полагаем, что все производные, кроме первой, нулевые: $;p^{(i)}{}_{m}(0) = 0,\ i > 1$. Допущение не внесет большой погрешности при расчете ДХ. Аналогично представим изображение воздействия и его производных. Тогда

$$x^{(i)}m\ ^{(t)} \wedge {}^{P}X_{ш}\ (P) - P \sim {}^{-}m\ ^{(0)} - P \sim {}^{-}У'm\ ^{(0)} - \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (4) примет вид

$$\mathbf{\sum_{i=0} L\ P\ (P) - P^{-'}Уш\ (0) - p^{-2}У\ m\ (0)] = \sum_{i=0} L\ P'\ \wedge\wedge PX_{,,}\ (P) - P^{-'}x_{,,}\ (0) - P^{-\,2}x\ '\ m\ (0)]-}$$

$$\wedge\,Г \quad \sim\backslash\ Я*\ I$$

$$-{}^{N}m\ L^{a}i\ \wedge\wedge{}^{'Y}m\ (\mathbf{P}) - P\wedge' Уш\ (0) - P-'\ m\ (0)] ----------------------- \sum_{i=0} L\ {}^{a\wedge P} \bullet$$

Из полученного уравнения выразим ^ *(p)* :

$$Y\,(\wedge)\wedge{}^{P}B(P)^{)X(}P) - {}^{B}Ш^{A}(P) + PCш\,(P) \over P\,[\,{}^{B}(P) + Nm^{A}(P)] \quad (6)$$

где $Cm\ (P) = C^{(y)}\ (P) - C^{(x)}\ (P) - C^{(G)}\ (P)$ - полином начальных условий,

$(p) = [Д(p) + (p)\ (0) + [в\wedge(p) + N\wedge A\wedge(p)\ '(0)$ - полином начальных условий отклика, $C\wedge\wedge\backslash p) = B\wedge\{p)xф)pË2\{p)x\backslash 0)$ - полином начальных условий воздействия,

$$C <^{o}'(\ P) = \begin{cases} B\wedge Aл(p), mPm_{,,}\ \wedge \\ 0,\ m = m\wedge \end{cases} \quad Вк(P) = \sum_{i=k} Pi^{p} \wedge \quad ,, \quad \bullet$$

Начальное значение воздействия и его производной на *т-м* участке определяются временным сдвигом x^(0) = x(tj^), x^(0) = x'(t^) . Для каждого текущего участка

сдвиг будет складываться из суммы длительностей переходного процесса на каждом из предыдущих участков. Обозначим *к* = 0_К-1 - номер частного решении ДХ, *К* - общее число частных решений (к = 0 соответствует *тк* = m_0 = $m_н$, к = К-1 соответствует m_{K-1} = $т_{уст}$. Таким образом, временной сдвиг частного решения ДХ определим, как

$$m_к = \sum_{к=0}^{к-1} t_{m}, \quad t_{н} = 0 \qquad (7)$$

Данный подход позволяет получить обобщенные выражения динамических режимов ТЭС для любого порядка исследуемой системы и произвольного характера нелинейности.

Моделирование

На основе разработанной методики выполнено моделирование переходной характеристики САУ ТЭМ. Принято $K_y=1$, $n_p=2$, К=1. Характеристика инерционности

цепи обратной связи контура управления ТЭС задана выражением $M(p) = (1+100p)^{1}$. Характеристика детектора, описывающего нелинейность цепи обратной связи САУ, аппроксимирована двумя или тремя прямыми. Расчетная переходная характеристика САУ ТЭМ при аппроксимации детекторной характеристики двумя и тремя линейными участками показана на рис. 2. Сплошной линией выделена составляющая, формируемая

начальным участком характеристики детектора и описываемая выражением $yi(t)$ = .

Пунктирной линией выделен последующий участок переходной характеристики, описываемый выражением $y^(t-1^) = 0{,}125 + 0{,}375e^{-0,04t}$, где t_1 = 34 с - временной сдвиг

второго частного решения. Результат расчета переходного процесса для трех участков аппроксимации Д показан штриховой линией (временные сдвиги второго и третьего частного решения (t_2 = 8,7 с; t_1 = 43 с). Из рисунка видно, что погрешность при представлении Д тремя участками существенно меньше, особенно на стадии установления.

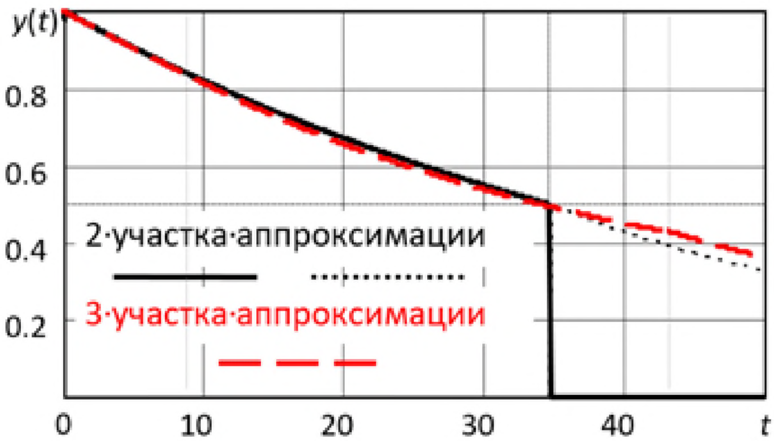

Рисунок 2 - Переходная характеристика САУ ТЭМ при аппроксимации нелинейного звена двумя и тремя линейными участками

Заключение

Разработана методика моделирования динамических процессов в нелинейных системах автоматического управления термоэлектрических модулей на основе кусочно-линейной аппроксимации. Подход позволяет получить аналитические решения динамических процессов в системах управления, справедливые для отдельных линейных участков характеристик нелинейных звеньев системы. На основе разработанной методики выполнено моделирование САУ ТЭМ с нелинейным звеном, представленным двумя и тремя линейными участками. Подход позволяет анализировать различные нелинейные термоэлектрические системы контроля, содержащие несколько каналов управления, местные и общие обратные связи, а также системы энергоснабжения на основе принципа тригенерации, основанного на одновременном получении электроэнергии (для питания электронных устройств), а также тепла и холода (для создания необходимого микроклимата помещений).

Благодарности

Статья подготовлена при поддержке государственного задания РФ 2019-1497 «Исследование и разработка комплексных энергосберегающих охлаждающих и термоэлектрических регенеративных систем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuanyuan Z., Jianlin Y., Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices, Int. J. Refrig. 35, 2012. - P. 1139-1144.
2. Hsiang-Sheng H., Ying-Che W., Yu-Wei C., Sih-Li C., Ming-Tsun K. Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment, Int. Commun. Heat Mass Transf. 37, 2010. - P. 140-146.
3. Nandy P. The characterization of a cascade thermoelectric cooler in a cryosurgery device, Cryogenics 50, 2010. - P. 759-764.
4. Hyeung-Sik C., Sangkook Y., Kwang-il W. Development of a temperature-controlled car-seat system utilizing thermoelectric device, Appl. Therm. Eng. 27 (2007) - P. 2841-2849.
5. Miranda A.G., Chen T.S., Hong C.W. Feasibility study of a green energy powered thermoelectric chip based air conditioner for electric vehicles, Energy 59 (2013) - P. 633-641
6. Dresselhaus M.S. New directions for low-dimensional thermoelectric materials, Adv. Mater. 19(2007)1043-1053.
7. Hilaal A., Seeram R. A review on the enhancement of figure of merit from bulk to nano-thermoelectric materials, Nano Energy 2 (2013) - P. 190-212.
8. Jeffrey S.G., Eric S. T. Complex thermoelectric materials, Nat. Mater. 7 (2008) - P. 105-114.
9. Sootsman J.R. New and old concepts in thermoelectric materials, Angew. Chem. Int. Ed. 48 (2009) - P. 8616-8639.
10. Ahamat M.A., Tierney M.J. Timewise temperature control with heat metering using a thermoelectric module, Appl. Therm. Eng. 31 (2011) - P. 1421-1426.
11. Lon E.B. High capacity thermoelectric temperature control system, United States Patent, 7946120B2, May 24, 2011.
12. Astrain D., Vian J.G., Albizua J. Computational model for refrigerators based on Peltier effect application, Appl. Therm. Eng. 25, 2005. - pp. 3149-3162.
13. Osawa Y., Katsura S. (2019). Variable Heat Disturbance Observer for Control of Peltier Device. IEEJ Journal of Industry Applications, 8(2), - pp. 185-191. doi:10.1541/ieejjia.8.185
14. Bartkowiak M., Mahan G.D. «Heat and Electricity Transport through Interfaces», Semiconductors and Semimetals, Vol.70, 2001. - pp.245-271.
15. Lee K.H., Kim O.J. «Analysis on the Cooling Performance of the Ther-moelectric Micro-Cooler» International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.50, 2007. - pp.1982-1992.
16. Silva L.W., Kaviany M. «Micro-Thermoelectric Cooler: Interfacial Effect on Thermal and Electrical Transport» International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.47, 2004. pp.2417-2435.
17. Гринкевич В.А. Исследование математической модели термостата на основе элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. - 2017. - № 3 (89). - С. 62-77. - DOI: 10.717212/2307-6879-2017-62-77.
18. Гринкевич В.А. Синтез регулятора тока для элемента Пельтье // Сборник научных трудов НГТУ. - 2018. - № 3-4 (93). - 16-39. - DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-16-39.
19. Kurilov I.A., Kurilov V.V., Romashov E.A., Zhiganov D.N., Vasiliev G.S., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Methods of analysis of radio devices based on functional approximation // Radio engineering and telecommunication systems. - 2014. - No. 1. - P. 35-49.

20. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S. M. Analysis of dynamic characteristics of signal converters based on continuous piecewise linear functions // Scientific and technical Bulletin of the Volga region, 2010. No. 1. Pp. 100-104.

21. Kurilov I.A., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Research of static characteristics of converters of signals with a nonlinear control device // 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)/ Proceedings. - Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 15-16, 2011. - p. 93-96. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR, IEEEXplore, http://conf.sfu-kras.ru/conf/sibcon ISBN: 978-1-4577-1069-8/11/2011 IEEE.

22. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kharchuk S.M., Surzhik D.I. Analysis of dynamic characteristics of the nonlinear amplitude-phase converter at complex input influence // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013. - Catalog Number: CFP13794-CDR. SCOPUS, IEEEXplore, ISBN: 978-1-4799-1062-5/13/2013 IEEE. - p. 6693641. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693641.

Кузичкин Олег Рудольфович
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Д.т.н., профессор, профессор кафедры информационных и робототехнических систем
E-mail: Kuzichkin@bsu.edu.ru

Суржик Дмитрий Игоревич
Муромский институт (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир
к.т.н., доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах»
E-mail: arzerum@mail.ru

Васильев Глеб Сергеевич
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
К.т.н., с.н.с. инжинирингового центра
E-mail: vasilievgleb@yandex.ru

Бакнин Максим Дмитриевич
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Аспирант, институт инженерных и цифровых технологий
E-mail: m.baknin@yandex.ru