



Луценко В.Ю.

Луценко В.Ю.<sup>1</sup>, Жагров А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Киевский национальный университет  
строительства и архитектуры,  
пр. Воздухофлотский, 31, Киев,  
03680, Украина;

<sup>2</sup>Запорожская государственная инженерная  
академия, пр. Ленина, 226,  
Запорожье, 69006, Украина



Жагров А.С.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

*В работе представлена измерительная установка и предложена новая методика экспериментального изучения периодического переходного режима работы термоэлектрического генератора. Показано, что использование периодического переходного режима работы термоэлектрического генератора позволяет значительно повысить генерируемую им мощность по сравнению со стационарным режимом. Определено значение оптимальной частоты смены внешних тепловых потоков и приведено качественное объяснение эффекта возрастания генерируемой мощности.*

**Ключевые слова:** термоэлектричество, термоэлектрический генератор, прямое преобразование энергии, переходной режим, рекуперация тепла.

*This paper presents a measuring installation and proposes a new method for experimental investigation of periodic transient mode of thermoelectric generator. It is shown that the use of periodic transient mode of thermoelectric generator allows increasing considerably the generated power as compared to steady-state mode. The value of optimal frequency of changing the external thermal fluxes is determined and a qualitative explanation of the effect of generated power increase is given.*

**Key words:** thermoelectricity, thermoelectric generators, direct energy conversion, mode transition, heat recovery.

### Введение

Появление новых материалов, совершенствование технологий их получения, экологические и энергетические проблемы в последние несколько лет стали причинами возросшего интереса к вопросам термоэлектричества. Термоэлектрические устройства (генераторы и холодильники) позволяют преобразовывать тепловую энергию в энергию электрического тока и наоборот. Возможность применения этих устройств для утилизации «тепловых отходов», отсутствие в их составе механических частей, ядовитых хладагентов,

малая инерционность и габариты указывают на перспективность развития этого направления. Однако низкий КПД термоэлектрических устройств ограничивает их широкое применение.

Временно повысить эффективность термоэлектрического устройства удастся в нестационарных режимах его работы. Например, режим импульсного охлаждения позволяет достичь в определенные моменты времени более глубокого охлаждения, что объясняется существенным отличием постоянных времени электрических и тепловых процессов, происходящих в термоэлектрическом холодильнике. Теория импульсного охлаждения развита в работах [1 – 3], в которых авторы указывают на отсутствие возможности повышения КПД для переходных режимов по сравнению со стационарным режимом.

Однако последние исследования периодических установившихся режимов работы термоэлектрических устройств обосновывают их целесообразность и перспективность [4 – 6]. В работе [4] проведен анализ двух режимов работы термоэлектрического устройства – периодического режима переключения (*P*-режим) и непрерывного синусоидального режима (*S*-режим). Особенностью *P*-режима является периодическое мгновенное изменение температуры горячего и холодного концов термоэлектрического проводника на противоположную, в то время как в *S*-режиме температура спаев изменяется непрерывно по гармоническому закону. В ходе теоретического рассмотрения авторы доказывают возможность увеличения параметра  $ZT$  ( $Z$  – термоэлектрическая добротность;  $T$  – абсолютная температура), который определяет КПД термоэлектрического устройства, на 30 % для случая охлаждения в *S*-режиме, тогда как подобного роста  $ZT$  для режимов генерации электрической энергии не ожидается. Последний вывод, скорее всего, является следствием сделанных авторами исходных допущений, в рамках которых температура спаев и, соответственно, термоЭДС в *P*-режиме изменяются мгновенно, без учета их тепловой инерционности.

В работе [6] предложена более универсальная модель, в которой тепло входит в ТЭГ и выходит из него через пластины. Численный анализ, выполненный авторами, показывает существование максимума на временной зависимости генерируемой термоЭДС, наличие которого в дальнейшем подтверждено ими и экспериментально. Несмотря на то, что рассматриваемый режим не являлся периодическим, в работе высказывается предположение о его возможной эффективности.

В данной статье приведены результаты экспериментального изучения периодических переходных режимов работы термоэлектрических генераторов на примере модуля ТЕС112703. Дальнейшие разделы содержат описание экспериментальной установки, методики эксперимента и полученные данные. Последний раздел посвящен обсуждению результатов и выводам.

### **Измерительная установка и методика эксперимента**

Экспериментальная установка включает в себя три термоэлектрических модуля М1-М3 (рис. 1). Модули М1 и М3 (ТЕС1-12708) используются в качестве нагревателя и холодильника. От внешнего источника через эти модули пропускается постоянный электрический ток. Если этот ток положительный, то грань модуля М3, соприкасающаяся с модулем М2, нагревается. Одновременно грань модуля М1, соприкасающаяся с модулем М2, охлаждается. В этом случае модуль М3 можно рассматривать как нагреватель, а модуль М1 представляет собой холодильник.

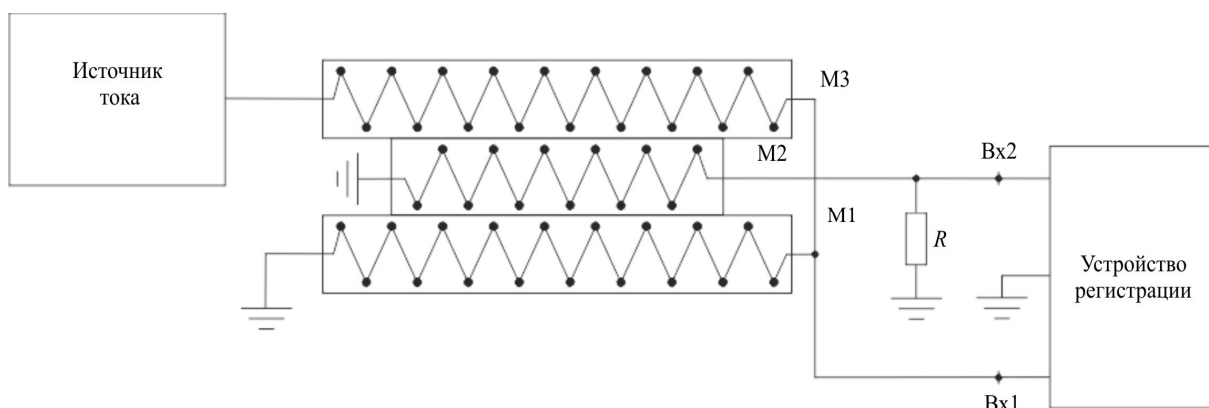


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки.

При изменении направления внешнего тока нагреватель и холодильник меняются местами. В этом случае грань модуля М3, соприкасающаяся с модулем М2, охлаждается, в то время как грань модуля М1, соприкасающаяся с модулем М2, нагревается. Модуль М2 (ТЕС112703) работает в режиме генерации электрической мощности, которая выделяется на нагрузочном сопротивлении  $R$ .

Напряжение на модуле М1 представляет собой сумму напряжения на внутреннем сопротивлении модуля  $R_{M1}$ , которое обозначим через  $U_{M1}$ , и развиваемой модулем термоЭДС  $\epsilon_{M2} \epsilon_{M1}$ . Величина  $(U_{M1} + \epsilon_{M1})$  измеряется по входу 1 устройства регистрации.

По входу 2 регистрируется напряжение на сопротивлении нагрузки  $R$ , которое обозначим  $U_R$ . Это напряжение представляет собой разность между термоЭДС на модуле М2  $\epsilon_{M2}$  и напряжением, вызванным протеканием термотока:

$$U_R = \epsilon_{M2} - I_{TH2} R_{M2},$$

где  $I_{TH2}$  – термоток термоэлектродгенератора;  $R_{M2}$  – внутреннее сопротивление модуля М2.

Внешний ток через модули М1 и М2 является периодическим с периодом, равным  $T$ . В течение времени  $T/2$  течет постоянный ток одного направления, затем направление тока изменяется на противоположное, но его величина остается такой же.

Этот периодически меняющийся направление ток, протекая через модули М1 и М3, обуславливает появление на входах 1 и 2 прибора переменных периодических напряжений, которые регистрируются прибором.

Прибор функционирует следующим образом.

В течение времени 0.04 с производится регистрация сигнала по входу 1. Затем в течение такого же интервала времени производится регистрация сигнала по входу 2 и так далее. Таким образом, по каждому из входов прибора производится регистрация сигнала каждые 0.08 с, поэтому сигналы по входу 1 и 2 сдвинуты во времени на 0.04 с.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показан один период сигнала  $(U_{M1} + \epsilon_{M1})$  для разных значений нагрузочного сопротивления  $R$  ( $R = 20 \text{ Ом}, 10 \text{ Ом}, 5 \text{ Ом}, 2.2 \text{ Ом}$  и  $1 \text{ Ом}$ ). Величина внешнего тока через модули М1 и М3 составляла 0.8 А, а период  $T = 327.68 \text{ с}$ .

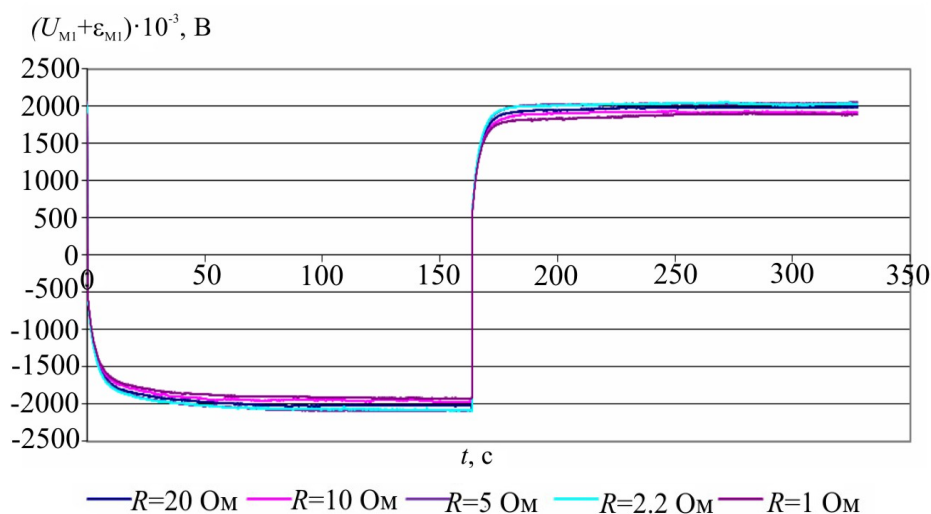


Рис. 2. Сигналы  $(U_{M1} + \varepsilon_{M1})$  для 5-ти значений сопротивления нагрузки.

Из рис. 2 следует, что изменение нагрузочного сопротивления в диапазоне  $1 \div 20$  Ом оказывает минимальное влияние на сигнал  $(U_{M1} + \varepsilon_{M1})$ . Последний факт указывает на незначительное влияние изменения тепловой нагрузки нагревателя и холодильника, в качестве которой выступает термогенератор М2.

На рис. 3 представлен один период сигнала  $U_R$  для тех же значений сопротивления нагрузки, тока через модули М1 и М3.

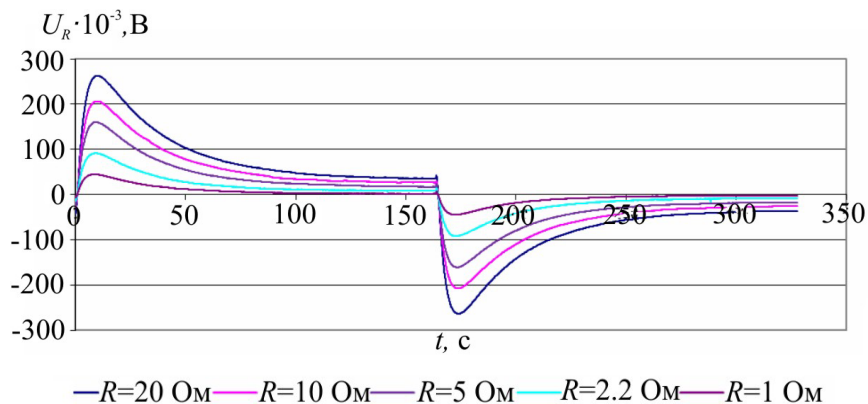


Рис. 3 Сигналы  $U_R$  для 5-ти значений сопротивления.

Отметим, что при достаточно большом значении времени протекания постоянного тока одного направления (не менее 5 мин), на сопротивлении нагрузки  $R$  устанавливается стационарное значение напряжения. Результаты измерения стационарных значений напряжения  $U_R$  при разных сопротивлениях нагрузки для положительного ( $U_{ST(+)}$ ) и отрицательного ( $U_{ST(-)}$ ) направления внешнего тока представлены в табл. 1. Также в табл. 1 представлены результаты расчета генерируемой термоэлектрогенератором в стационарном режиме мощности  $P_{ST}$  по формуле:

$$P_{ST} = \frac{\langle U_{ST} \rangle^2}{R},$$

где  $\langle U_{ST} \rangle$  средние значения стационарных напряжений, рассчитанных по значениям  $U_{ST(+)}$  и  $U_{ST(-)}$ .

Таблица 1

Характеристики работы термоэлектрического генератора (стационарный режим)

$R$ , Ом	20	10	5	2.2	1
$U_{ST(+)}$ , мВ	32.545	24.875	17.055	7.351	1.454
$U_{ST(-)}$ , мВ	-32.526	-24.884	-17.073	-7.363	-1.465
$\langle U_{ST} \rangle$ , мВ	32.54	24.88	17.06	7.36	1.46
$P_{ST}$ , мкВт	52.93	61.90	58.24	24.60	2.13

Особенностью переходного режима работы термоэлектрического генератора является наличие максимума во временной зависимости выходного напряжения. Для представленных на рис. 3 сигналов можно рассчитать среднюю за период  $T$  мощность, вырабатываемую термоэлектродгенератором по формуле

$$P_{TR} = \frac{\int_0^T \frac{U_R^2}{R} dt}{T}.$$

Результаты такого расчета приведены в таблице 2 и соответствуют току через модули М1 и М3, равному 0.8 А и периоду – 327.68 с.

Таблица 2

Характеристики работы термоэлектрического генератора (периодический переходной режим)

$R$ , Ом	20	10	5	2.2	1
$P_{TR}$ , мкВт	630.16	755.54	838.38	567.44	269.47

Приведенные в таблицах 1 и 2 данные свидетельствуют о наличии максимума полезной электрической мощности как для стационарного, так и для периодического переходного режимов работы при вполне определенном сопротивлении нагрузки, близком к 5 Ом.

Экспериментально изучена зависимость средней за период полезной мощности  $P_{TR}$  от значения периода для  $T = 20.48$  с, 40.96 с, 81.92 с, 163.84 с, 327.68 с. На рис. 4 представлена зависимость полезной мощности от периода для сопротивления нагрузки  $R$ , равного 5 Ом и внешнего тока 0.8 А.

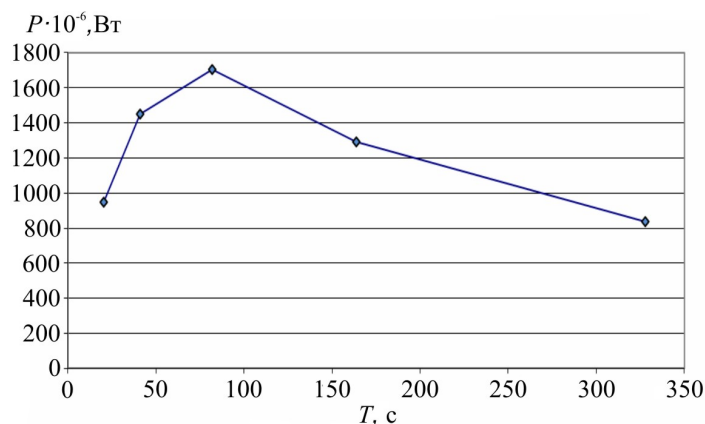


Рис. 4. Зависимость средней мощности от периода.

Анализ полученной экспериментальной зависимости генерируемой термоэлектродгенератором мощности подтверждает наличие оптимального значения периода работы генератора. В

нашем случае максимальная мощность  $P_{TR}$  ( $P_{TR} = 1704.43 \cdot 10^{-6}$  Вт) соответствует периоду  $T = 81.92$  с. Отметим, что в стационарном режиме работы при тех же температурных условиях на нагревателе и холодильнике, значение генерируемой мощности  $P_{ST}$  составляет  $58.24 \cdot 10^{-6}$  Вт.

На рис. 5 представлена зависимость сигнала  $U_R$  от времени в режиме генерирования максимальной мощности. Величина внешнего тока через модули М1 и М3 составляла 0.8 А, период  $T = 82.92$  с, сопротивление нагрузки  $R = 5$  Ом. Также на этом рисунке представлены значения стационарных напряжений  $U_R$  для отрицательного ( $U_{ST(-)}$ ) и положительного ( $U_{ST(+)}$ ) направлений тока через модули М1 и М3.

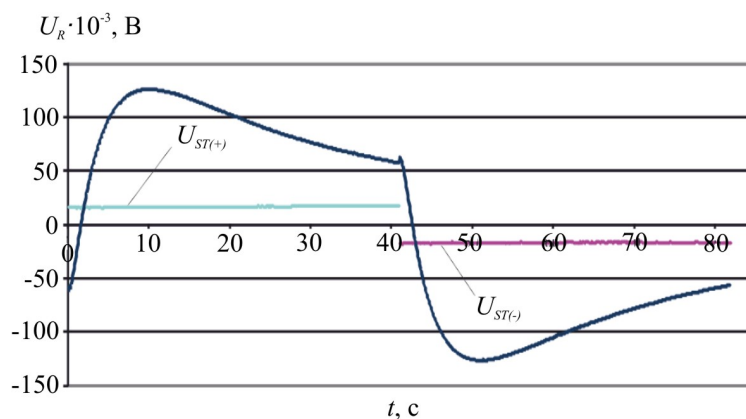


Рис. 5. Сигналы  $U_R$  в периодическом переходном и стационарных режимах.

Таким образом, сравнивая вырабатываемые термоэлектродгенератором мощности в стационарном и периодическом переходном режимах, можно утверждать, что использование периодического переходного режима приводит к увеличению мощности ( $P_{TR} / P_{ST}$ ) в  $\sim 29$  раз.

При работе теплоэлектродгенератора в стационарном режиме его тепловое сопротивление невелико. Это обусловлено значительными тепловыми потерями внутри генератора – теплота от горячей стороны модуля переходит к холодной.

При резком изменении направления тепловых потоков тепловое сопротивление модуля на какое-то время существенно увеличивается. Физически это означает, что тепловые потери уменьшаются и теплота, которая приходит в спаи полупроводниковых термопар от нагревателя, нагревает спаи до значительно большей температуры по сравнению со стационарным режимом.

Аналогично, уменьшение потерь тепловой энергии, связанных с теплопроводностью внутри модуля, приводит к тому, что холодные спаи охлаждаются до значительно меньшей по сравнению со стационарным режимом температуры. Появление дополнительной температурной разности между горячими и холодными спаями и определяет появление максимума в выходном напряжении термоэлектродгенератора.

Среднее за период значение термоЭДС в переходном режиме составляет  $85.26 \cdot 10^{-3}$  В, в то время как в стационарном режиме термоЭДС не превышает  $17.06 \cdot 10^{-3}$  В. Сравнивая эти значения термоЭДС можно предположить, что в переходном режиме эффективное значение теплопроводности уменьшается примерно в 5 раз, тем самым обеспечивая пропорциональное уменьшения связанных с теплопроводностью тепловых потерь внутри модуля.

Это качественное объяснение позволяет понять появление максимума в выходном сигнале термоэлектродгенератора и возможное увеличение генерируемой им мощности.

## Выводы

Экспериментальное изучение переходного режима работы термоэлектроегенератора подтвердило возможность существенного улучшения характеристик преобразования тепловой энергии в электрическую по сравнению со стационарным методом. Переход к периодическому переходному режиму работы термоэлектроегенератора обеспечит возможность увеличения в 20 и более раз значений генерируемой мощности.

В основе увеличения эффективности работы термоэлектроегенератора при переходе к нестационарному режиму лежит появление максимума в его выходном напряжении, что объясняется кратковременным, примерно в течение 20 с, увеличением теплового сопротивления генератора. По истечению этого времени теплое сопротивление уменьшается и восстанавливается стационарный режим генерации. Появление в переходном режиме работы временной зависимости теплового сопротивления генератора указывает на необходимость определения оптимального, с точки зрения генерирования максимальной мощности, периода работы генератора. Отдельного рассмотрения требует задача определения оптимальной скорости изменения внешних тепловых потоков. В ходе предварительных исследований установлено, что при уменьшении скорости нарастания тока через модули М1 и М3 при изменении его направления, эффект появления максимума в выходном напряжении генератора уменьшается и в конце концов исчезает.

Проведенное экспериментальное исследование свидетельствует об уменьшении тепловых потерь, связанных с теплопроводностью внутри модуля. Таким образом, можно ожидать определенное увеличение КПД генераторов, работающих в переходном режиме.

Полученные результаты указывают на перспективность дальнейших исследований и необходимость перехода к реальному нагревателю и холодильнику. В таких системах направление тепловых потоков в термоэлектроегенераторе можно будет менять механически, например, если генератор будет иметь цилиндрическую форму и периодически поворачиваться на 180 градусов между нагревателем и холодильником, имеющими полуцилиндрические впадины. Один из возможных вариантов такого ТЭГ представлен на рис. 6.

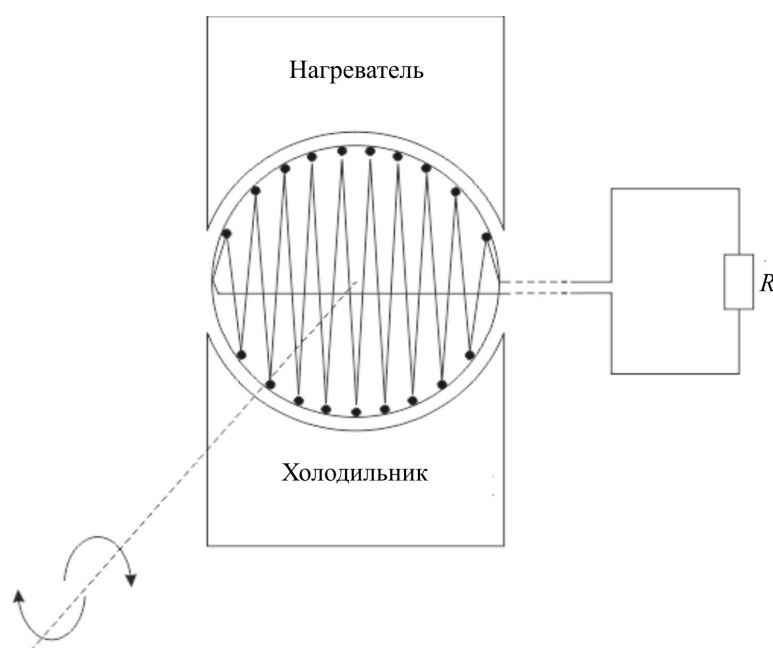


Рис. 6. Схема ТЭГ, работающего в импульсном переходном режиме.

Следует отметить, что рассмотренный в настоящей статье эксперимент выполнен при незначительной разности температур порядка единиц градусов. Если предположить, что при выполнении эксперимента на реальном и достаточно мощном ТЭГ, отмеченная выше особенность (наличие максимума в зависимости термоЭДС от времени) сохраняется, то в этом случае следует ожидать значительного увеличения вырабатываемой мощности. Конечно, в данном случае речь не идет о реальном уменьшении коэффициента теплопроводности ТЭГ. Можно только заметить, что периодическое изменение направления тепловых потоков внутри ТЭГ приводит к тому, что за счет тепловой инерции количество теплоты, которое переходит от горячих спаев к холодным существенно уменьшается.

Формально можно сказать, что предлагаемый периодический переходной режим работы ТЭГ может существенно увеличить эффективность работы ТЭГ, поэтому можно ожидать как увеличение КПД, так и вырабатываемой полезной мощности.

## Литература

1. Иорданишвили Е.К. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии. – М.: Наука, / Е.К. Иорданишвили, В.П. Бабин // 1983.– 216 с.
2. Термоэлектрическое охлаждение. – М.: АН СССР. / А.Ф. Иоффе, Л.С. Стилбанс, Е.К. Иорданишвили, Ставицкая Т.С. // 1956. – 114 с.
3. Иорданишвили Е.К. Термоэлектрические источники питания. – М.: Советское Радио./ Е.К. Иорданишвили // 1968.
4. A.A. Snarskii, I.V. Bezudnov Rotating thermoelectric device in periodic steady state. Energy Conver 2015; 94: P. 103 – 111.
5. Ming Ma, Jianlin Yu , Jiaheng Chen An investigation on thermoelectric coolers operated with continuous current pulses. Energy Conver 2015; 98: P. 275 – 281.
6. Nguyen Q. Nguyen, Kishore V. Pochiraju Behavior of thermoelectric generators exposed to transient heat. Applied Thermal Engineering 2013; 51: P. 1 – 9.

Поступила в редакцию 30.06.16.