



Луценко В.Ю.

Луценко В.Ю.¹, Жагров А.С.²

¹Київський національний університет будівництва й архітектури, пр. Повітрофлотський, 31, Київ, 03680, Україна;

²Запорізька державна інженерна академія, пр. Леніна, 226, Запоріжжя, 69006, Україна



Жагров А.С.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРІОДИЧНОГО ПЕРЕХІДНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

У роботі показано вимірювальну установку й запропоновано нову методику експериментального вивчення періодичного перехідного режиму роботи термоелектричного генератора. Зроблено висновок, що використання періодичного перехідного режиму роботи термоелектричного генератора дає змогу значно підвищити генеровану ним потужність порівняно зі стаціонарним режимом. Визначено значення оптимальної частоти зміни зовнішніх теплових потоків і наведено якісне пояснення ефекту зростання генерованої потужності.

Ключові слова: термоелектрика, термоелектричний генератор, пряме перетворення енергії, перехідний 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 generator, direct energy conversion, transient mode, heat recovery.

Вступ

Поява нових матеріалів, удосконалення технологій їх одержання, екологічні й енергетичні проблеми в останні кілька років стали причинами зростаючого інтересу до питань термоелектрики. Термоелектричні пристрої (генератори й холодильники) дають змогу перетворювати теплову енергію в енергію електричного струму й навпаки. Можливість застосування цих пристроїв для утилізації «теплових відходів», відсутність у їхній конструкції механічних частин, отруйних холодоагентів, мала інерційність і габарити вказують на перспективність розвитку цього напрямку. Однак низький ККД термоелектричних пристроїв обмежує їх широке застосування.

Тимчасово підвищити ефективність термоелектричного пристрою вдається в нестационарних режимах його роботи. Наприклад, режим імпульсного охолодження робить можливим досягти в певні моменти часу більш глибокого охолодження, що пояснюється істотною відмінністю постійних часу електричних і теплових процесів, що відбуваються в

термоелектричному холодильнику. Теорію імпульсного охолодження розвинено в роботах [1–3], у яких автори вказують на відсутність можливості підвищення ККД для перехідних режимів у порівнянні зі стаціонарним режимом.

Однак останні дослідження періодичних усталених режимів роботи термоелектричних пристроїв обґрунтовують їх доцільність і перспективність [4–6]. У роботі [4] зроблено аналіз двох режимів роботи термоелектричного пристрою – періодичного режиму перемикання (P -режим) і безперервного синусоїдального режиму (S -режим). Особливістю P -режиму є періодична миттєва зміна температури гарячого й холодного кінців термоелектричного провідника на протилежну, у той час як в S -режимі температура спаїв змінюється безупинно за гармонійним законом. У ході теоретичного розгляду автори доводять можливість збільшення параметра ZT (Z – термоелектрична добротність; T – абсолютна температура), який визначає ККД термоелектричного пристрою, на 30% для випадку охолодження в S -режимі, тоді як подібного росту ZT для режимів генерації електричної енергії не очікується. Останній висновок, швидше за все, є наслідком зроблених авторами вихідних допущень, у рамках яких температура спаїв і відповідно термоЕРС в P -режимі змінюються миттєво, без врахування їх теплової інерційності.

У роботі [6] запропоновано більш універсальну модель, у якій тепло входить у ТЕГ і виходить із нього через пластини. Чисельний аналіз, виконаний авторами, показує наявність максимуму на тимчасовій залежності генерованої термоЕРС, наявність якого надалі підтверджена ними й експериментально. Незважаючи на те, що розглянутий режим не був періодичним, у роботі висловлюється припущення про його можливу ефективність.

У пропонованій статті наведено результати експериментального вивчення періодичних перехідних режимів роботи термоелектричних генераторів, на прикладі модуля ТЕС112703. Дальші розділи містять опис експериментальної установки, методики експерименту й отримані дані. Останній розділ присвячений обговоренню результатів і висновкам.

Вимірювальна установка й методика експерименту

Експериментальна установка містить у собі три термоелектричні модулі М1-М3 (рис. 1). Модулі М1 і М3 (ТЕС1-12708) використовуються як нагрівач і холодильник. Від зовнішнього джерела через ці модулі пропускається постійний електричний струм. Якщо цей струм позитивний, то грань модуля М3, що стикається з модулем М2, нагрівається. Одночасно грань модуля М1, що стикається з модулем М2, охолоджується. У цьому випадку модуль М3 можна розглядати як нагрівач, а модуль М1 являє собою холодильник.

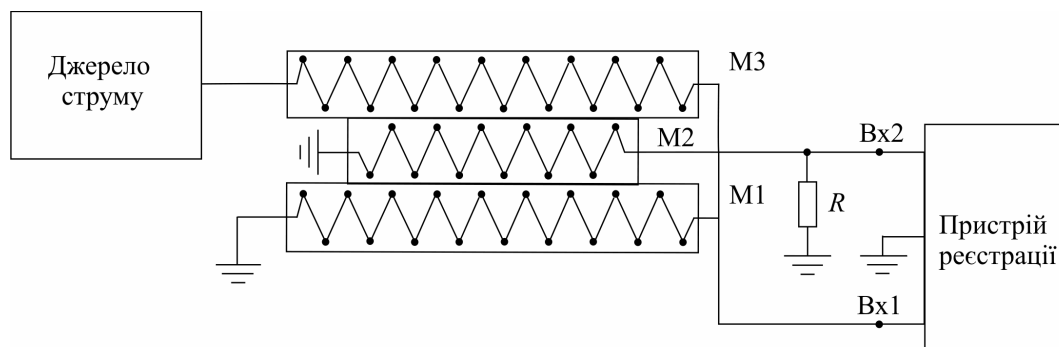


Рис. 1. Структурна схема експериментальної установки.

Зі зміною напрямку зовнішнього струму нагрівач і холодильник міняються місцями. У цьому випадку грань модуля М3, що стикається з модулем М2, охолоджується в той час, як грань модуля М1, що

стикається з модулем М2, нагрівається. Модуль М2 (ТЕС112703) працює в режимі генерації електричної потужності, яка виділяється на навантажувальному опорі R .

Напруга на модулі М1 являє собою суму напруги на внутрішньому опорі модуля R_{M1} , який позначимо через U_{M1} , та генерованої модулем термоЕРС ε_{M1} . Величина $(U_{M1} + \varepsilon_{M1})$ вимірюється з входу 1 пристрою реєстрації.

Із входу 2 реєструється напруга на опорі навантаження R , яку позначимо U_R . Ця напруга являє собою різницю між термоЕРС на модулі М2, ε_{M2} і напругою, викликаною протіканням терmostруму

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

де I_{TH2} – терmostрум термоелектрогенератора; R_{M2} – внутрішній опір модуля М2.

Зовнішній струм через модулі М1 і М2 є періодичним з періодом, рівним T . Упродовж часу $T/2$ тече постійний струм одного напрямку, потім напрямок струму змінюється на протилежний, але його величина залишається такою ж.

Цей струм, що періодично змінює напрямок, протікаючи через модулі М1 і М3, обумовлює появу на входах 1 і 2 приладу змінних періодичних напруг, які реєструються приладом.

Прилад функціонує в такий спосіб.

Упродовж часу 0.04 с проводиться реєстрація сигналу по входу 1. Потім упродовж такого ж інтервалу часу триває реєстрація сигналу по входу 2 і так далі. Таким чином, по кожному із входів приладу здійснюється реєстрація сигналу кожні 0.08 с, тому сигнали по входу 1 і 2 зсунуті в часі на 0.04с.

Результати і їх обговорення

На рис. 2 показано один період сигналу $(U_{M1} + \varepsilon_{M1})$ для різних значень навантажувального опору R ($R = 20 \text{ Ом}, 10 \text{ Ом}, 5 \text{ Ом}, 2.2 \text{ Ом}$ і 1 Ом). Величина зовнішнього струму через модулі М1 і М3 становила 0.8 А , а період $T = 327.68 \text{ с}$.

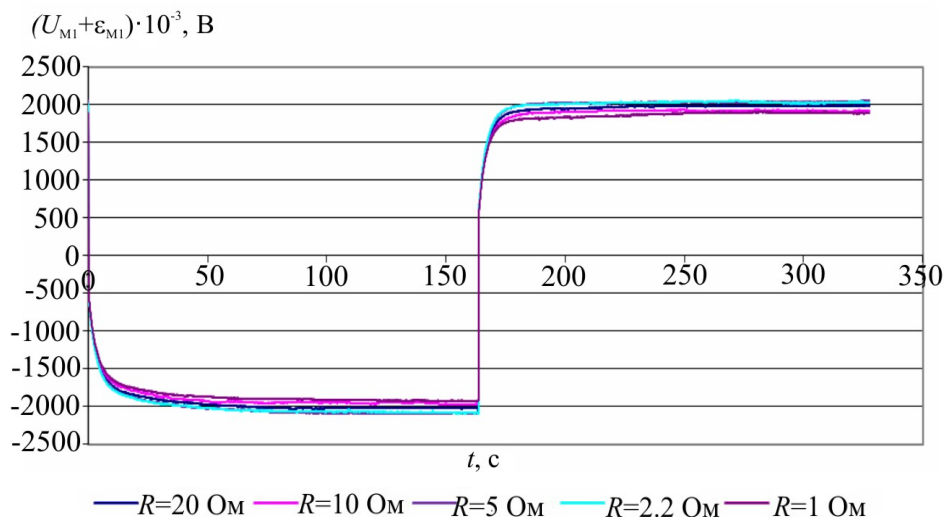


Рис. 2. Сигнали $(U_{M1} + \varepsilon_{M1})$ для 5-ти значень опору навантаження.

З рис. 2 випливає, що зміна навантажувального опору в діапазоні $1 \div 20 \text{ Ом}$ мінімально впливає на сигнал $(U_{M1} + \varepsilon_{M1})$. Останній факт указує на незначний вплив зміни теплового навантаження нагрівача й холодильника, яким є термогенератор М2.

На рис. 3 показано один період сигналу U_R для тих же значень опору навантаження, струму через модулі М1 і М3 і періоду.

Зазначимо, що за досить великого значення часу протікання постійного струму одного напрямку (не менше 5 хв) на опорі навантаження R встановлюється стаціонарне значення напруги.

Результати виміру стаціонарних значень напруги U_R за різних опорів навантаження для позитивного ($U_{ST(+)}$) й негативного ($U_{ST(-)}$) напрямку зовнішнього струму показано в табл. 1.

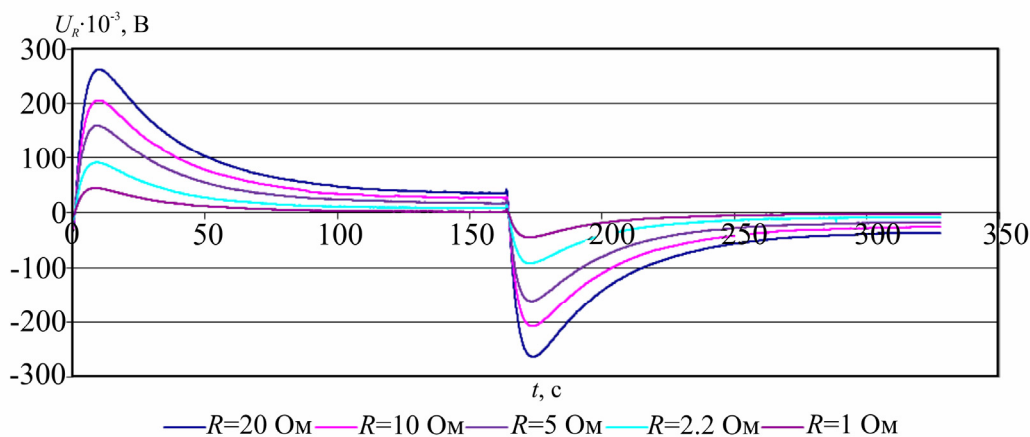


Рис. 3 Сигнали U_R для 5-х значень опору.

Також у табл. 1 подано результати розрахунків генерованої термоелектрогенератором у стаціонарному режимі потужності P_{ST} за формулою

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

де $\langle U_{ST} \rangle$ середні значення стаціонарних напруг, розрахованих за значеннями ($U_{ST(+)}$) й ($U_{ST(-)}$).

Таблиця 1

Характеристики роботи термоелектричного генератора (стаціонарний режим).

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

Особливістю перехідного режиму роботи термоелектричного генератора є наявність максимуму в часовій залежності вихідної напруги. Для показаних на рис. 3 сигналів можна розрахувати середню за період T потужність, продуковану термоелектрогенератором, за формулою

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

Результати такого розрахунку наведено в табл. 2, що відповідають струму через модулі М1 і М3, рівному 0.8 А й періоду – 327.68 с.

Таблиця 2

Характеристики роботи термоелектричного генератора (періодичний перехідний режим).

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

Наведені в табл. 1 і 2 дані свідчать про наявність максимуму корисної електричної потужності як для стаціонарного, так і для періодичного перехідного режимів роботи за цілком певного опору навантаження, близькому до 5 Ом.

Експериментально вивчена залежність середньої за період корисної потужності P_{TR} від значення періоду для $T = 20.48$ с, 40.96 с, 81.92 с, 163.84 с, 327.68 с. На рис. 4 показано залежність корисної потужності від періоду для опору навантаження R , рівному 5 Ом, і зовнішнього струму 0.8 А.

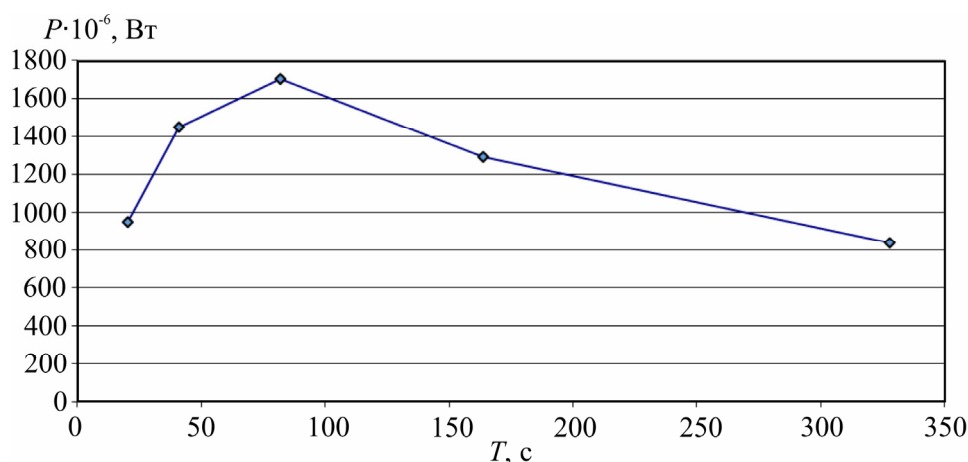


Рис. 4. Залежність середньої потужності від періоду.

Аналіз отриманої експериментальної залежності генерованої термоелектрогенератором потужності підтверджує наявність оптимального значення періоду роботи генератора. У нашому випадку максимальна потужність P_{TR} ($P_{TR} = 1704.43 \cdot 10^{-6}$ Вт) відповідає періоду $T = 81.92$ с. Відзначимо, що в стаціонарному режимі роботи за тих же температурних умов на нагрівачі й холодильнику значення генерованої потужності P_{ST} становить $58.24 \cdot 10^{-6}$ Вт.

На рис. 5 показано залежність сигналу U_R від часу в режимі генерування максимальної потужності. Величина зовнішнього струму через модулі М1 і М3 становила 0.8 А, період $T = 82.92$ с, опір навантаження $R = 5$ Ом. Також на цьому рисунку подано значення стаціонарних напруг U_R для негативного ($U_{ST(-)}$) й позитивного ($U_{ST(+)}$) напрямків струму через модулі М1 і М3.

Таким чином, порівнюючи продуковані термоелектрогенератором потужності в стаціонарному й періодичному перехідному режимах, можна стверджувати, що використання періодичного перехідного режиму призводить до збільшення потужності $\left(\frac{P_{TR}}{P_{ST}}\right)$ в ~ 29 разів.

При роботі термоелектрогенератора в стаціонарному режимі його тепловий опір несе великий. Це обумовлено значними тепловими втратами усередині генератора – теплота від гарячої сторони модуля переходить до холодної.

З різкою зміною напрямку теплових потоків тепловий опір модуля на якийсь час суттєво збільшується. Фізично це означає, що теплові втрати зменшуються й теплота, яка приходить у спаї

напівпровідникових термопар від нагрівача, нагріває спаї до значно більшої температури порівняно зі стаціонарним режимом.

Аналогічно, зменшення втрат теплової енергії, пов'язаних з теплопровідністю усередині модуля призводить до того, що холодні спаї охолоджуються до значно меншої порівняно зі стаціонарним режимом температури. Поява додаткової температурної різниці між гарячими й холодними спаями й визначає появу максимуму у вихідній напрузі термоелектрогенератора.

Середнє за період значення термоЕРС у перехідному режимі становить $85.26 \cdot 10^{-3} \text{ В}$, в той час як в стаціонарному режимі термоЕРС не перевищує $17.06 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

Порівнюючи ці значення термоЕРС, можна припустити, що в перехідному режимі ефективне значення теплопровідності зменшується приблизно в 5 разів, тим самим забезпечуючи пропорційне зменшення пов'язаних з теплопровідністю теплових втрат всередині модуля.

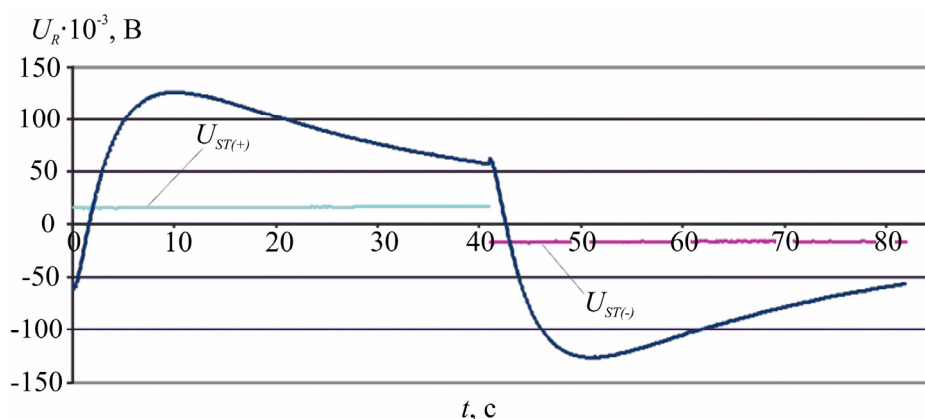


Рис. 5. Сигнали U_R в періодичному перехідному й стаціонарних режимах.

Це якісне пояснення дає можливість зрозуміти появу максимуму у вихідному сигналі термоелектрогенератора й можливе збільшення генерованої ним потужності.

Висновки

Експериментальне вивчення перехідного режиму роботи термоелектрогенератора підтвердило можливість істотного поліпшення характеристик перетворення теплової енергії в електричну в порівнянні зі стаціонарним методом перетворення. Перехід до періодичного перехідного режиму роботи термоелектрогенератора забезпечить можливість збільшення в 20 і більше разів значень генерованої потужності.

В основі збільшення ефективності роботи термоелектрогенератора з переходом до нестационарного режиму лежить поява максимуму в його вихідній напрузі, що пояснюється короточасним, приблизно упродовж 20 с, збільшенням теплового опору генератора. По завершенні цього часу тепловий опір зменшується й відновлюється стаціонарний режим генерації. Поява в перехідному режимі роботи тимчасової залежності теплового опору генератора вказує на необхідність визначення оптимального, з погляду генерування максимальної потужності, періоду роботи генератора. Окремого розгляду вимагає задача визначення оптимальної швидкості зміни зовнішніх теплових потоків. У ході попередніх досліджень встановлено, що зі зменшенням швидкості наростання струму через модулі М1 і М3 зі зміною його напрямку ефект появи максимуму у вихідній напрузі генератора зменшується й зрештою зникає.

Здійснене експериментальне дослідження свідчить про зменшення теплових втрат, пов'язаних з теплопровідністю усередині модуля. Таким чином, можна чекати певного збільшення ККД генераторів, що працюють у перехідному режимі.

Отримані результати вказують на перспективність дальших досліджень і необхідність переходу до реального нагрівача й холодильника. У таких системах напрямок теплових потоків у термоелектрогенераторі можна буде міняти механічно, наприклад, якщо генератор буде мати циліндричну форму й періодично повертатися на 180 градусів між нагрівачем і холодильником, що мають напівциліндричні западини. Один з можливих варіантів такого ТЕГ показано на рис. 6.

Слід зазначити, що розглянутий у пропонованій статті експеримент виконано за незначної різниці температур порядку одиниць градусів.

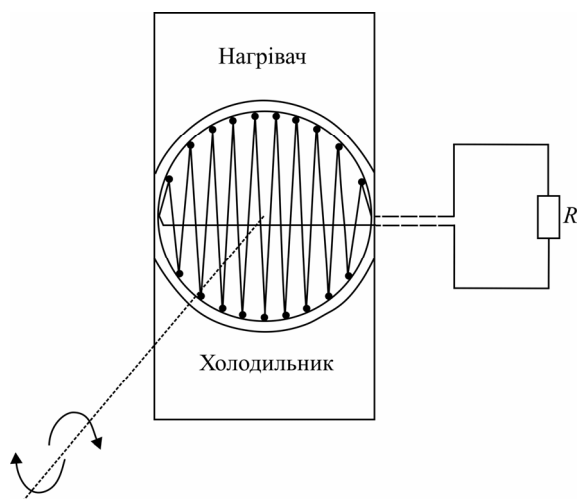


Рис. 6. Схема ТЕГ, що працює в імпульсному перехідному режимі.

Якщо припустити, що при виконанні експерименту на реальному й досить потужному ТЕГ вище відзначена особливість (наявність максимуму в залежності термоЕРС від часу) зберігається, то в цьому випадку слід очікувати значного збільшення генерованої потужності. Звичайно, у цьому випадку не йдеться про реальне зменшення коефіцієнта теплопровідності ТЕГ. Можна тільки сказати, що періодична зміна напрямку теплових потоків усередині ТЕГ призводить до того, що за рахунок теплової інерції кількість теплоти, яка переходить від гарячих сплавів до холодних, суттєво зменшується.

Формально можна сказати, що пропонований періодичний перехідний режим роботи ТЕГ може суттєво збільшити ефективність роботи ТЕГ, тому можна чекати як збільшення ККД, так і отримуваної корисної потужності.

Література

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

Надійшла до редакції 30.06.2016