

## Підвищення ефективності функціонування термоелектричних генераторів

Вадим Луценко, к.т.н., доцент<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-9727-5574), Андрій Запривоюда, к.т.н., доцент<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-9171-9325), Микола Клименко, к.т.н., доцент<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-6166-8966), Сергій Іносов, к.т.н., доцент<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-8305-5514)

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва та архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

### АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено функціонування термоелектричного генератора, що знаходиться в температурному полі, градієнт якого періодично змінює знак на протилежний. Розроблено експериментальну установку та алгоритм дослідження перехідного режиму роботи термоелектричного генератора. Результатом аналізу отриманих дослідних даних стало визначення оптимальної частоти зміни напрямку зовнішнього температурного поля та значення опору навантаження, для яких вдається отримати максимальне значення генерованої потужності. Запропоновано якісну модель, що пояснює можливість підвищити ефективність роботи термоелектричного генератора при переході до періодичного перехідного режиму функціонування.

**Ключові слова:** термоелектрика, термоелектричний модуль, тепловий потік, вимірювання, потужність, перехідний режим.

### 1. ВСТУП

Загострення проблем пов'язаних з отриманням та транспортуванням електричної енергії обумовило зростання зацікавленості до методів та засобів альтернативної енергетики, одним із популярних напрямків якої є застосування термоелектричних перетворювачів, що дозволяють перетворювати теплову енергію в енергію електричного струму і навпаки.

Термоелектричні генератори та холодильники мають ряд вагомих переваг: компактність, відсутність у їх складі механічних деталей, отруйних холодоагентів, малу інерційність і масу, які визначають актуальність і перспективність їх дослідження та застосування для отримання електрики та холоду як у промисловості, так і у побуті.

Дослідження термоелектричних перетворювачів, що знаходяться в стаціонарному температурному полі, демонструють відносно низькі значення ККД, що обмежує область їх застосування. У той же час є окремі повідомлення про можливість підвищення ККД термоелектрогенераторів при переході до перехідних режимів роботи.

### 2. МЕТА

Метою проведеного дослідження було вивчення роботи термоелектричного генератора (ТЕГ) у періодичному перехідному режимі, що передбачає періодичну зміну напрямку градієнту температурного поля, в якому знаходиться генератор.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Перехідний режим роботи термоелектричного генератора виникає в результаті зміни напрямку теплового потоку всередині термоелектродів. За таких умов вихідна напруга генератора стає змінною, а її амплітуда збільшується порівняно із значенням, що має місце у випадку такої ж стаціонарної різниці температур спаїв. Зростання вихідної напруги в перехідному режимі роботи термогенератора, пояснюється істотною відмінністю

постійних часу електричних та теплових процесів, що протікають всередині модуля [1].

Результати дослідження перехідних нестационарних режимів термоелектричних холодильників досить широко висвітлені в науковій літературі [2,3]. Проте залишається ряд питань, пов'язаних з роботою термоелектричного генератора у періодичному перехідному режимі, що потребують додаткових досліджень.

Для вивчення періодичного перехідного режиму роботи термоелектричного генератора була створена експериментальна установка (рис.1), що включає: три щільно притиснутих один до одного термоелектричні модулі (ТЕМ) M1, M2, M3; керовані джерела імпульсного струму – 1 та 2; комутатори аналогових сигналів – 3,7; пристрій реєстрації – 4; мікропроцесорну систему управління – 5; блок калібрувальних сигналів – 6.

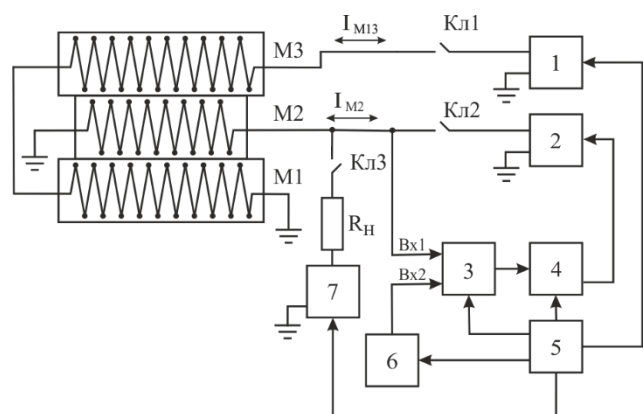


Рисунок 1. Структурна схема експериментальної установки: M1, M2, M3 – термоелектричні модулі; 1, 2 – керовані джерела імпульсного струму; 3,7 – комутатори аналогових сигналів; 4 – пристрій реєстрації; 5 – мікропроцесорна система керування; 6 – блок калібрувальних сигналів.

В якості нагрівача і холодильника для досліджуваного ТЕГ – M2 (TEC1-12703) використовувалися термоелектричні модулі – M1 та M3 (TEC1-12708). Через ці модулі від зовнішнього джерела імпульсного струму I пропускаються імпульси струму заданої полярності,

амплітуди та частоти. Зміна напрямку цього струму забезпечує інверсію роботи ТЕМ: грань модуля, що нагрівалась, починає охолоджуватись і навпаки – грань, що охолоджувалась буде нагріватися. Таким чином, зміна напрямку протікання струму через модулі М1 та М3, забезпечує періодичну зміну напрямку створюваного ними теплового потоку. Розміщення в цьому теплового потоці ТЕМ М2 буде супроводжуватися появою на його виводах змінного сигналу термо-ЕРС –  $\varepsilon_{th}$  (рис.2).

Період та амплітуда імпульсів струму, що протікає через модулі М1 та М3 задається системою керування за допомогою блока 1, при цьому значення періоду може набувати одного із можливих значень: 5.12с; 10.24с; 20.48с; 40.96с; 80с; 160с; 320с; 640с.

Наявність у складі установки керованого джерела імпульсного струму – 2 дозволяє реалізувати режим, в якому через модуль М2 також пропускається зовнішній імпульсний струм заданої амплітуди та полярності, що призводить до виділення або поглинання в його спаях теплоти Пельтьє, яка бере участь у тепловій взаємодії нагрівача, термоелектричного генератора та холодильника. Період струмових імпульсів, що пропускаються через М2, складає 0.02с, а прогальність – 2.

За допомогою ключа Кл 3 є можливість підключення до виводів модуля М2 опору навантаження, що дозволяє дослідити генераторний режим його роботи.

Базовий алгоритм вимірювання сигналів на виводах модуля М2 включає чотири окремих вимірювання, які періодично повторюються. Початок вимірювального циклу синхронізовано із черговою зміною полярності імпульсів через модулі М1 та М3. Перше вимірювання відбувається протягом струмового імпульсу через модуль М2. Отриманий сигнал представляє собою суму падіння напруги на внутрішньому опорі ТЕМ та термо-ЕРС. Наступне вимірювання здійснюється в проміжку між струмовими імпульсами, отриманий при цьому результат розглядається як сигнал термо-ЕРС.

Наступні два вимірювання носять калібрувальний характер, а їх результати дозволяють провести перерахунок кодів АЦП в одиниці вимірювальної напруги. Третє та четверте вимірювання проводяться в аналогічні моменти часу, тобто під час чергового струмового імпульсу через М2 та в наступну міжімпульсну паузу.

Аналіз вихідного сигналу ТЕМ М2 показує наявність максимуму в сигналі термо-ЕРС (рис. 2). За умови досить тривалого часу протікання постійного струму одного напрямку через модулі М1 та М3 (не менше 300с), вихідний сигнал прямує до свого стаціонарного значення, яке характеризує роботу ТЕМ у зовнішньому стаціонарному температурному полі.

У ході аналізу отриманих експериментальних даних досліджено залежність вихідної потужності ТЕМ від опору навантаження, що дозволило встановити оптимальний режим роботи, який характеризується максимальним значенням вихідної потужності, та визначити для цих умов необхідне значення опору навантаження.

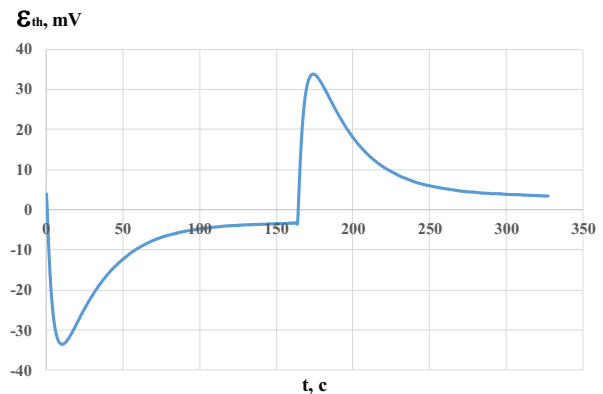


Рисунок 2. Осцилограма термо-ЕРС ТЕМ М2.

Також досліджено залежність генерованої потужності від періоду зміни напрямку зовнішнього теплового потоку, що дозволило визначити оптимальне значення частоти роботи, якому відповідає максимальне значення генерованої ТЕМ потужності. Оптимальне значення частоти роботи в нашому випадку склало близько 0.01 Гц.

Проведене дослідження показало, що результатом переходу до періодичного перехідного режиму роботи ТЕМ стало збільшення приблизно в 20 разів значення генерованої потужності. В основі такого зростання лежить поява максимуму в вихідному сигналі ТЕМ, що пояснюється короткочасним (біля 20с) збільшенням теплового опору генератора. В наступний період тепловий опір поступово зменшується і, таким чином, поступово встановлюється стаціонарний режим генерації.

Тимчасове зростання теплового опору ТЕМ означає, що теплові втрати в ньому також на певний час зменшуються і теплота, яка приходить в спаї напівпровідникових термопар від нагрівача, нагріває їх до значно вищої температури порівняно з стаціонарним режимом. Зменшення втрат теплової енергії всередині модуля також призводить до того, що холодні спаї ТЕМ охолоджуються до значно нижчої, порівняно зі стаціонарним режимом, температури. Таким чином, появу максимуму у вихідному сигналі ТЕМ визначає додаткова різниця температур між його гарячими і холодними спаями.

Проведене дослідження свідчить про зменшення теплових втрат, пов'язаних з теплопровідністю всередині модуля. Таким чином, можна очікувати збільшення ККД ТЕМ, що працюють в перехідному режимі, а отримані експериментальні результати вказують на перспективність подальших досліджень та необхідність переходу до реальних нагрівача і холодильника.

#### Список літератури

- [1] A.A. Snarskii, I.V. Bezudnov Rotating thermoelectric device in periodic steady state. *Energy Conver.* 2015, 94. P. 103–111.
- [2] Ming Ma, Jianlin Yu, Jiaheng Chen An investigation on thermoelectric coolers operated with continuous current pulses. *Energy Conver.* 2015. 98. P. 275–281.
- [3] Nguyen Q. Nguyen, Kishore V. Pochiraju Behavior of thermoelectric generators exposed to transient heat. *Applied Thermal Engineering.* 2013. 51. P.1–9.