

© 2005р. О.І. Копил, С.І. Кособуцький, О.І. Середюк,
І.С. Термена, М.М. Чуботару*

Інститут термоелектрики НАН та МОН України, Чернівці
*Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича, Чернівці

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР З ІМПУЛЬСНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Розроблений і фізично реалізований термоелектричний генератор і вторинний перетворювач із ККД первинного генераторного модуля не менш 5,5% і перетворювача не гірше 93%.

The thermoelectric generator and the secondary converter from efficiencies of the initial generating module not less than 5,5% and the converter not less than 93% is developed and physically realized.

Важливим напрямком сучасної науки і техніки є розвиток енерго- і ресурсозберігаючих технологій. Значного прогресу в даній галузі можна досягти шляхом застосування термоелектричних генераторів, принцип роботи яких базується на ефекті Зеебека. Аналогічні технічні рішення неодноразово використовувалися раніше в аерокосмічній галузі і зарекомендували себе як надійні вторинні джерела струму для автономного живлення [1]. На даний момент рядом провідних країн виробників термоелектричних матеріалів і пристроїв реалізовується масштабна програма застосування термогенераторів і модулів Пельтьє у виробничій і побутовій галузях [1,2]. До можливих і найбільш перспективних напрямків застосування подібних пристроїв варто віднести енергетичну галузь (наприклад, безцільне спалювання побічного газу при нафтовидобутку), підвищення ККД різного роду теплових машин, геотермальні явища та ін. Традиційним недоліком термоелектричних генераторів прийнято вважати низький ККД (до 8%). Зараз існують перспективи істотного підвищення ККД шляхом застосування фулеритів або створення *p-i-n*-структур (квантових ям) [3]. Слід зазначити, що даний напрямок знаходиться лише в початковій стадії розробки, проте існуючі низькотемпературні термоелектричні матеріали і структури вже тепер можна успішно використовувати у вищезазначених галузях. Термоелектричні пристрої мають істотні переваги: відсутність будь-яких рухомих частин, і, відповідно, великий ресурс роботи, простота в застосуванні, відносно низька собівартість. Отже, використання термоелектрич-

них пристроїв у виробничій і побутовій енергозберігаючій техніці варто визнати технічно виправданим і економічно рентабельним.

Мета роботи полягала в розробці і фізичній реалізації універсального термоелектричного генератора (первинного генераторного модуля та вторинного перетворювача), придатного для використання у виробничій та побутовій техніці, простого в експлуатації, за мінімальної собівартості.

Згідно з нашим аналізом, у світовій літературі практично не наводиться конкретної інформації про аналогічні розробки (в кращому випадку автори обмежуються лише функціональною схемою), тому докладний літературний огляд з даної тематики утруднений. Однак основними критеріями підходу, безумовно, є вірний вибір термоелектричного генераторного модуля і вторинного перетворювача з максимально можливим ККД.

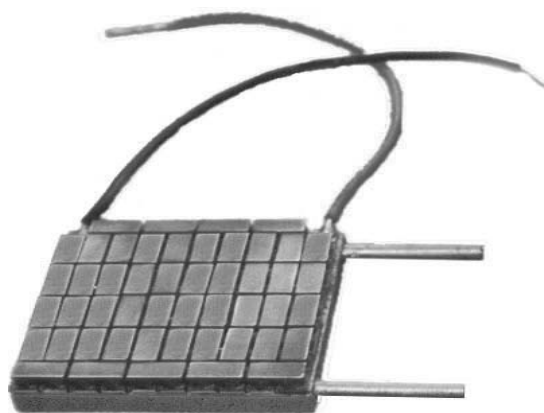


Рис. 1. Термоелектричний генераторний модуль із теплообмінником

Як первинне джерело модуля термоелектричного генератора використано пристрій, описаний у [4]. Термоелектричний генераторний модуль із теплообмінником – це монолітна система (рис. 1). Модуль виготовлений із термоелектричного матеріалу (ТЕМ) низькотемпературної групи [1] на основі халькогенідів твердих розчинів вісмуту і сурми і складається з 62 термоелементів, з'єднаних електрично послідовно і термічно паралельно. Гілки термоелементів вирізані зі зливків ТЕМ циліндричної форми із заданим діаметром [5]. Експериментально визначена оптимальна товщина омичних контактів, за якої зчеплення з матеріалом максимальне (5–8 МПа) і гілка надійно захищена від дифузії домішок.

Для відводу тепла і підтримки температури в заданому інтервалі, по холодній стороні модуля використано водяний теплообмінник.

Визначено основні технічні характеристики при потужності теплового потоку $Q=280$ Вт і температурі теплоносія $T=20^\circ\text{C}$:

- габаритні розміри $60\times 60\times 6$ мм³;
- кількість каналів 10;
- діаметр каналу 4,0 мм;
- температурний перепад води на вході та виході 6 ± 1 К;
- оптимальна витрата води 8 ± 2 см³/с.

Термоелектричний генераторний модуль характеризується параметрами: напругою U [В], струмом при номінальній напрузі I [А], електричною потужністю W [Вт], термоерс E [В], ККД $h\%$. Тепловий потік через модуль Q_x визначається за формулою:

$$Q_x = cm\Delta T, \quad (1)$$

де c – питома теплоємність води [Вт·с/(г·К)], m – витрата води [г/с], ΔT – перепад температур води [К].

Вимірювання напруги генераторного модуля проводилися в режимі максимальної вихідної потужності. При цьому необхідною умовою є узгодження імпедансів генератора і споживача. ККД модуля визначався за формулою:

$$\eta = \frac{W_{\max}}{Q_x + W_{\max}}. \quad (2)$$

Наведемо параметри модуля: $E=3,65$ В, $U=1,82$ В, $I=9,4$ А, $W=17,6$ Вт, $\eta=5,86\%$, $R=0,17$ Ом, $Q_x=283$ Вт.

Система працює як джерело струму потужністю 18 ± 2 Вт, напругою $2\pm 0,2$ В, з ККД $6\pm 2\%$, при робочих температурах $T_r=300^\circ\text{C}$, $T_x=30^\circ\text{C}$ [5].

У ряді випадків економічно більш вигідне застосування генераторних модулів із повітряним охолодженням, оскільки виключаються витрати енергії на прокачування через модуль охолоджувальної рідини.

Для промислового застосування термоелектричних генераторів краще використовувати середньо- і високотемпературні структури. Однак у кожному з перерахованих варіантів застосування пристроїв, необхідно створювати високоєфективний перетворювач із максимальним ККД.

Для отримання високого ККД ($\sim 95\%$) перетворювач напруги реалізовано за схемою імпульсного вторинного джерела живлення. Спрощення конструкції та гнучкість пристрою у процесі експлуатації досягнуто, застосувавши як центральний керуючий пристрій мікроконтролер (МК) фірми *Microchip PIC16F72* [6]. Він характеризується високими показниками надійності, продуктивності і низькою вартістю. Крім того, наявність вбудованого 5-канального АЦП дозволяє контролювати рівень як вихідної, так і вхідної напруг.

При розробці застосовано пристрій, принципова електрична схема якого зображена на рис. 2. Використано такі вузли мікроконтролера: аналогово-цифровий перетворювач для отримання інформації про миттєвий рівень вхідної (не стабілізованої) та вихідної (стабілізованої) напруг, модуль широтно-імпульсної модуляції для управління вихідним силовим ключем. Також використано вбудований охоронний таймер, що виключає можливість аварійних ситуацій, пов'язаних із нестабільною роботою мікроконтролера. Із зовнішніх компонентів необхідний лише силовий ключ і потужний фільтр ВЧ.

Наведена на рис. 2 схема працює в такій послідовності. Вхідна наруга випрямляється містком ($BR1$), що дозволяє використовувати для живлення вторинного джерела енергії як постійний, так і змінний струм. Для забезпечення живлення мікроконтролера використано інтегральний стабілізатор напруги типу 7805, максимально допустимий рівень вхідної напруги якого сягає 30 В. Цим зумовлена верхня межа допустимих вхідних напруг імпульсного перетворювача. Для поставлених цілей цього достатньо. Нестабілізована випрямлена наруга подається на емітер силового транзистора $VT1$. Транзистор $VT1$, дросель $L1$ та діод $VD1$ утворюють ядро силового кола імпульсного перетворювача напруги. Коли на контакті мікроконтролера $RC2$ (вихід ШІМ) встановлюється високий рівень, транзистор $VT2$

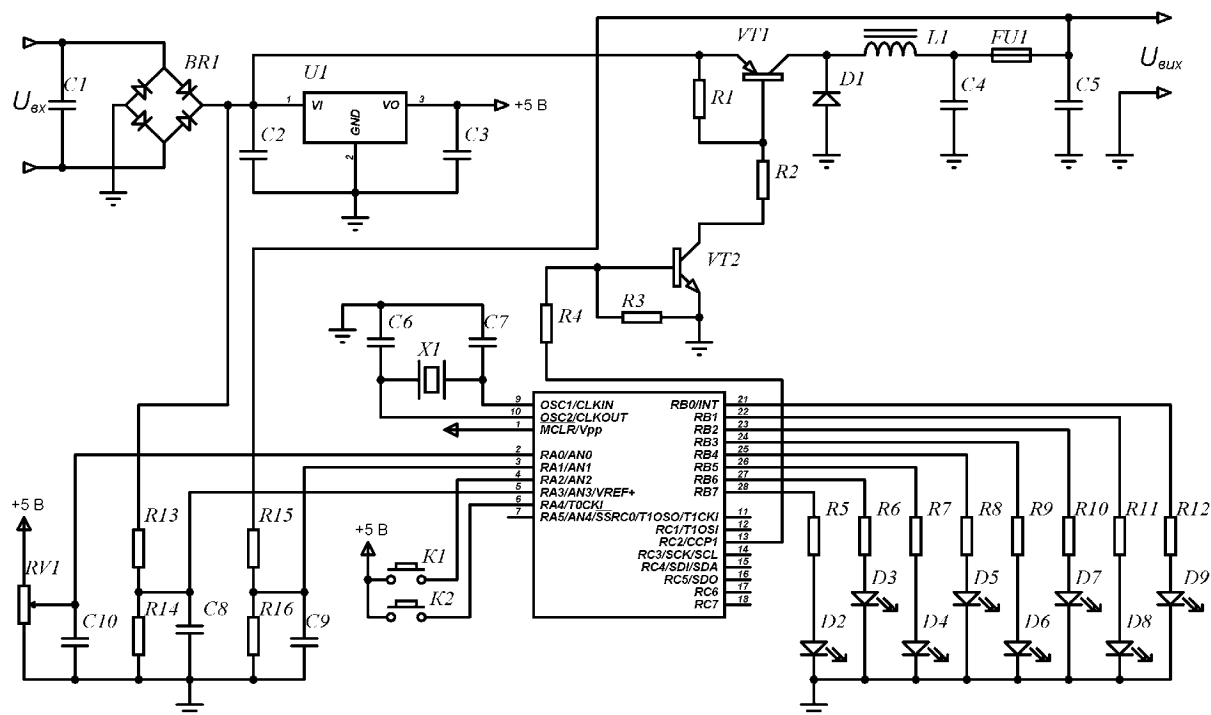


Рис. 2. Принципова схема вторинного перетворювача

відкривається, створюючи відкриваючий струм бази транзистора $VT1$. Резистор $R2$ обмежує струм бази транзистора $VT1$. Коли транзистор $VT1$ відкритий, струм розряду конденсатора $C2$ протікає через дросель $L1$ та одночасно заряджає конденсатори $C4$ і $C5$. Коли на контакті $RC2$ встановлено низький рівень, транзистор $VT2$ закривається, відповідно закривається і $VT1$. Після того, як $VT1$ закрився, струм через навантаження продовжує протікати через контур $L1, D1$, використовуючи акумульовану дроселем $L1$ енергію магнітного поля. У момент часу, коли енергії дроселя вже не достатньо для підтримання необхідного струму навантаження, використовується енергія, накопичена конденсатором $C4$. Конденсатор підтримує струм і водночас забезпечує зменшення пульсацій на виході. Транзистори $VT1, VT2$ працюють у ключовому режимі. Втрати енергії при цьому можна знехтувати, а отже забезпечується полегшений тепловий режим транзисторів. Для додаткового зниження пульсацій струму навантаження використано RC -фільтр, що складається з елементів $FU1$ і $C5$. Запобіжник $FU1$ виконує роль резистора, оскільки його опір достатній ($0,1 \div 0,5$ Ом), при цьому немає відчутних втрат енергії за рахунок джоулевого тепла.

Світлодіоди $VD2 \dots VD7$ призначені для індикації величини стабілізованої напруги, а $VD8, VD9$ – для індикації вибраного режиму роботи, перевантаження. Резистори $R5 \dots R12$ обмежують

робочий струм світлодіодів. Для попередження виходу із ладу мікроконтролера струм через будь-який з світлодіодів не повинен перевищувати величину 10 мА.

Кнопки керування $K1$ і $K2$ призначені для вибору рівня вихідної стабілізованої напруги. При цьому кнопка $K1$ – для збільшення, а $K2$ – для зменшення рівня напруги. Пари резисторів $R13 \text{--} R14$ та $R15 \text{--} R16$ призначені для реалізації подільників напруги, які використовуються для узгодження з АЦП вхідної не стабілізованої та вихідної стабілізованої напруги відповідно. Конденсатори $C8$ і $C9$ згладжують можливі пульсації вхідної і вихідної напруг.

В алгоритмі програми керування передбачено підпрограму, що забезпечує пропорційно-інтегрально-диференційний закон (ПІД) регулювання.

Перший модуль підпрограми обчислює сигнал помилки (різницю між вхідною і вихідною (фактичною) напругою), визначає різницю V_{SET} і V_{OUT} . Блок формування пропорційної складової ПІД-регулятора швидко компенсує помилку, але повністю не усуває її. При цьому значення помилки помножується на коефіцієнт пропорційності K_P та зберігається.

Модуль формування диференційної складової обчислює різницю між поточною і попередньою помилками, множить результат на заданий коефіцієнт K_D , і зберігає результат. Диференціюючий елемент дещо сповільнює реакцію системи,

але забезпечує їй стійкість від автоколивального режиму.

Елемент формувача інтегральної складової підсумовує всі попередні помилки, результат перемножується на деякий коефіцієнт K_L , і зберігається.

Значення, отримані пропорційним, диференціюючим та інтегруючим елементами додаються і зберігаються в ОЗП. Так формується сигнал компенсації відхилення напруги від заданого рівня.

Якщо результат, визначений підпрограмою ПД-закону регулювання, не додатний (це можливо за відсутності навантаження), то формується сигнал тривоги (світлодіод VD8 вмикається) та повністю закривається транзистор VT1 на період, необхідний для встановлення нормального режиму роботи.

Описаний мікроконтролер PIC16F72 містить модуль UART (послідовний асинхронний прийомопередавач), тобто підтримує під'єднання пристрою на основі МК до ЕОМ при необхідності контролю та управління вторинним пристроєм живлення за допомогою комп'ютера.

Пам'ять програм, застосованого мікроконтролера, згідно з фірмовою документацією, допускає можливість зміни керуючої програми МК не менше 1000 разів. Це дозволяє у разі необхідності змінювати будь-які параметри регулювання, вводити нові функції.

Описане в роботі вторинне джерело живлення забезпечує такі параметри:

- напруга живлення 15÷30 В (постійна або змінна);
- вихідна напруга – 1÷14 В;
- точність підтримання вихідної напруги – 0,1 В;
- максимальне значення робочого струму – 20 А (при використанні транзистора 2Т818В2 як VT1).

Висновки

Запропонований варіант конструкції перетворювача з ШІМ забезпечує істотне зменшення енерговитрат у порівнянні з класичними регуляторами та стабілізаторами напруги. Крім того, використання мікроконтролера як керуючого пристрою робить можливим переналаштування стабілізатора на задану робочу напругу, що важливо при використанні інших типів термомодулів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Анатычук Л.И.* Термоэлементи і термоелектричні пристрої. – Київ: Наук. думка, 1979.
2. *Анатычук Л.И.* Композитні термоелектричні матеріали / Прогресивні матеріали і технології: В 2 т. – Київ: Академперіодика, 2003. – Т.2. – С.104-127.
3. *Dresselhaus M.S., Sun X., Cronin S.B. et al.* Low dimensional thermoelectrics // Proc. ICT-97. – Dresden, 1997. – P.12-20.
4. *Термена І.С., Головка І.І., Пинзару О.С.* Термоелектричний генераторний модуль з теплообмінником на робочі температури 30-300°C // Термоелектрика. – 2002. – №3. – С.32-36.
5. *Булат Л.П., Ведерников М.В., Вялов А.П. и др.* Термоелектрическое охлаждение: Текст лекцій / Под ред. Л.П.Булата. – СПб. – Спбгунитп, 2002.
6. *Ульрих В.А.* Микроконтроллеры PIC16FXX. – СПб: Наука и техника, 2002.