

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу Тительмаєра Костянтина Олександровича «*Високоєфективні перетворювачі напруги для портативних фотоелектричних систем*», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії».

Обґрунтування вибору теми дослідження. Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого та актуального наукового завдання, що полягає у підвищенні енергонезалежності відповідних об'єктів подвійного призначення, служб з ліквідації надзвичайних ситуацій та ін. за рахунок створення високоєфективних двонапрямлених перетворювачів постійної напруги (ДППН або англ. «*Bidirectional DC - DC converter*») для застосування в портативних джерелах енергоживлення невеликої потужності (до 100-150 Вт) на основі перетворення сонячного випромінювання (інсоляції) в електричну енергію необхідної якості.

Таки автономні джерела електроживлення постійної напруги на базі відновлювальних джерел (у даному випадку гнучких фотоелектричних панелей) подвійного призначення відіграють важливу роль у забезпеченні безперервної та автономної роботи малопотужних споживачів (живлення рацій, мобільних телефонів та іншої переносної радіоелектронної апаратури). У застосуваннях із низьким рівнем підвищення або зниження напруги (зокрема, портативні відновлювальні джерела зазвичай відносяться до таких), загальним рішенням є неізолюваний тип перетворювачів.

Зазначені напівпровідникові перетворювачі електричної енергії постійного струму мають велике значення в забезпеченні високих техніко-економічних показників портативних джерел електроживлення. Від особливостей їх реалізації залежать показники ефективності, масогабаритні показники та вартість. Одним з рішень проблеми підвищення частоти перемикання ключових елементів є використання транзисторних гетероструктур на основі напівпровідників, наприклад, типу AlGaIn/GaN, що дозволяє підвищити значення питомої потужності, напруги, струму та робочої частоти перемикання (1-2 МГц). Тому дослідження в області розроблення і впровадження ефективних і перспективних перетворювачів напруги для портативних фотоелектричних систем за темою дисертаційної роботи Тительмаєра К. О. є актуальними і своєчасними.

Оцінка змісту дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 195 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 176 сторінок, в тому числі 130 сторінок основного змісту, 47 рисунків, 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковою програмою, викладено наукову новизну і практичне значення результатів дисертаційної роботи, зазначено особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві працях, а також наведено дані про апробацію результатів роботи, публікації, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі розглянуто результати аналізу сучасного стану і тенденцій розвитку сучасних двонапрямлених перетворювачів у складі портативних пристроїв з відновлювальними джерелами енергії. Виявлено, що найбільш ефективними та економічно вигідними є портативні системи, що виконані на основі гнучких фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). За результатами аналізу наукових публікацій та рекомендацій виробників елементної бази встановлено, що найбільш доцільними з точки зору підвищення ефективності та зменшення масогабаритних показників портативних фотовольтаїчних систем є неізолювані топології двонапрямлених перетворювачів. У результаті проведеного огляду та аналізу вимог до портативних ФЕП розроблено структурну схему, яка являється найбільш перспективним варіантом забезпечення електроживлення в польових умовах, яка складається з гнучких фотопанелей, пристрою слідкування за точкою максимальної потужності (СТМП) типу «MPPT»

(«*Maximum Power Point Tracking*») або так званого «оптимізатора» потужності для відбору максимальної потужності від фотопанелі. Крім того, показано, що поява нових типів зазначених напівпровідникових елементів дозволяє суттєво підвищити робочі частоти перетворювачів, а також збільшити їх питому потужність.

У другому розділі на основі узагальнення результатів аналізу особливостей принципів побудови двонаправлених напівпровідникових DC/DC перетворювачів постійної напруги запропоновано обґрунтування доцільного вибору топології напівпровідникового перетворювача з урахуванням комплексу основних показників якості, який включає в себе статичні втрати, перенапругу на напівпровідникових компонентах і масо-габаритні показники пасивних компонентів та дозволяє порівняти топології напівпровідникових перетворювачів з однаковими заданими параметрами. За результатами використання розробленої методики порівняння топологій зазначених перетворювачів встановлено дві найкращі топології: двофазна топологія двонаправленого двофазного DC/DC перетворювача з чергуванням фаз, а також топологія двонаправленого каскадного DC/DC перетворювача. Порівняльний аналіз показників якості топологій ДППН при постійній вихідній потужності показав, що зазначені показники для каскадного DC/DC перетворювача є гіршими, ніж для топології з чередуванням фаз у всіх випадках співвідношень між вхідною та вихідною напругами. Показано, що каскадна топологія виграє лише по критерію сумарної напруги на всіх транзисторах, причому збільшення вихідної напруги суттєво зменшує статичні втрати, а відповідно, і ККД перетворювача, в той час як енергія, а відповідно, і масо-габаритні параметри конденсатора, зростають. Тому в дисертації розглядалась топологія ДППН з чередуванням фаз, так як за комплексом показників якості вона є кращою, у порівнянні з іншими топологіями ДППН. Крім того, представлено результати щодо запропонованого аналітичного методу розрахунку оптимального магнітозчеплення парної кількості індуктивностей для перетворювача з чергуванням фаз, використання якого дозволило визначити оптимальний коефіцієнт магнітозчеплення для портативної фотоелектричної системи з зустрічним включенням індуктивностей.

У третьому розділі досліджено запропонований бездатчиковий пристрій СТМП гістерезисного типу (так званий «оптимізатор» потужності) для відбору від фотопанелі максимальної потужності, який може бути використаний в системах пошуку точки максимуму потужності фотоелектричного перетворювача. Такий пристрій має простішу структуру і не використовує мікроконтролер в якості елемента керування. Враховуючи деяку простоту він може використовуватись в якості системи стабілізації точки максимуму потужності для кожної фотопанелі, збільшуючи ефективність портативної фотоелектричної системи у порівнянні з централізованою системою. Для постійного навантаження запропонований пристрій СТМП («оптимізатор») може працювати в трьох різних режимах, залежно від співвідношення між параметрами навантаження та фотопанелі: поза діапазоном, прямий і гістерезисний режими. Запропонована схема не має датчиків струму, а положення зони гістерезису можна регулювати шляхом налаштування відповідних резисторів. Для бездатчикового пристрою СТМП запропоновано сімейство реалізацій гістерезисних елементів управління та обрано варіант, що дозволяє проводити регулювання в максимально широкому діапазоні та проведено їх аналіз. Розроблено аналітичну модель запропонованого пристрою СТМП гістерезисного типу, за допомогою якої розраховано теоретичні значення ефективності слідкування за точкою максимуму потужності при різних рівнях сонячної інсоляції для фотоелектричної панелі у складі портативних фотоелектричних систем.

У четвертому розділі розглянуто результати досліджень щодо розроблення і застосування системи керування двонапрямленим перетворювачем напруги у складі портативного фотоелектричного джерела живлення, яка відрізняється від існуючих тим, що використовує керування на основі відомого методу передбачення по моделі («*Model Predictive Control*» або *MPC*), та дозволяє зменшити статичну похибку та перерегулювання при зміні навантаження у порівнянні з відомим регулятором на основі ПІ - та ПІД - контролерів.

Повна модель запропонованої топології двонапрямлених перетворювачів проаналізована за допомогою методу усереднення малосигнальної лінеаризованої моделі в просторі станів в безперервному режимі або в режимі граничної провідності. Будь-яка усереднена модель в просторі станів може бути представлена в матричній формі.

Запропонований алгоритм MPC працює наступним чином: вимірюються основні параметри системи (напруга постійного струму, напруга і струм акумулятора) та один параметр (струм навантаження). Ці дані подаються на вхід моделі дискретного часу, яка прогнозує напругу постійного струму для різних значень робочого циклу, потім застосовується функція витрат та обмеження. Для отримання прогнозу довгого часу без надмірного обчислювального навантаження використана екстраполяційна стратегія. При цьому запропонований алгоритм MPC був реалізований в системі «Matlab Simulink».

Показано, що за результатами моделювання регулятор на основі ПД-ланки забезпечує вихідні пульсації напруги на рівні 4,2 % від номінальної напруги та тривалість перехідного процесу під час включення джерела біля 1,5мс, а регулятор на основі MPC забезпечує вихідні пульсації напруги на рівні 2,5 % та тривалість перехідного процесу біля 1,25 мс. За результатами порівняння запропонованих систем керування показано, що система на базі реалізації алгоритму керування двонапрямленим перетворювачем напруги на основі передбачення по моделі забезпечує більш високу якість регулювання (менший рівень пульсацій та більш швидкий перехідний процес). Але використання системи керування на основі методу MPC вимагає значних математичних обчислювань, що ускладнює її практичну реалізацію та призводить до збільшення обчислювальних затрат на керування і, відповідно, більших витрат енергії на керування перетворювачем, що слід враховувати при проектуванні портативних систем малої потужності.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень роботи зразку портативної фотоелектричної системи енергоживлення, який складається з фотопанелі, акумуляторних батарей, пристрою СТМП гістерезисного типу з бездатчиковим керуванням («оптимізатором») та двонапрявленого перетворювача напруги, виконаного на основі двофазної топології з чергуванням фаз. Теоретично та експериментально показано, що ККД запропонованого гістерезисного пристрою СТМП в широкому діапазоні інтенсивності сонячного випромінювання складає у середньому 90-97%. Для оцінки сумарних втрат потужності в елементах перетворювача та достовірності правильного вибору топології, ККД вимірювався аналізатором потужності «Yokogawa WT1800». Експериментально підтверджено можливість досягнення високої ефективності перетворення електричної енергії для низьковольтних перетворювачів напруги на базі GaN-транзисторів у складі портативних фотоелектричних систем. Втрати провідності (статичні втрати) було розраховано, використовуючи вимірний струм, робочий цикл, опір відкритого стану транзистора. Отримані результати були перевірені за допомогою аналізу термальних зображень, вимірянних тепловізором камерой «Fluke Ti10», тобто розрахункові результати показують добру кореляцію з термічним аналізом, судячи з наведених фотографій. Проведені експериментальні дослідження підтвердили отримані висновки за результатами розрахунків та математичного моделювання.

У додатках наведено список опублікованих праць за темою дисертації, акт впровадження результатів дисертаційної роботи в учбовий процес кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем ЧНТУ з відповідної дисципліни, а також акт щодо результатів апробації НТР в ТОВ «П'езосенсор» (м. Чернігів) досліджень тестового зразку двонапрявленого перетворювача потужністю 150 Вт.

Наукова новизна отриманих результатів

Здобувачем вперше запропоновано:

1. Обґрунтування доцільного вибору топології напівпровідникового перетворювача з урахуванням комплексу основних показників його якості, який включає в себе статичні втрати, перенапругу на напівпровідникових компонентах і масо-габаритні показники пасивних компонентів, та дозволяє порівняти топології напівпровідникових перетворювачів з однаковими заданими параметрами.

2. Аналітичний метод розрахунку оптимального коефіцієнта магнітозчеплення парної кількості індуктивностей для двонаправленого перетворювача напруги з чередуванням фаз, що дозволяє розрахувати магнітозчеплену індуктивність з мінімальними розмірами при заданому коефіцієнті пульсацій струму.

3. Новий гістерезисний оптимізатор відбору потужності для використання в системах пошуку точки максимуму потужності (СТМП) фотоелектричного перетворювача, який на відміну від існуючих СТМП має спрощену структуру і дозволяє не використовувати мікроконтролер в якості елемента керування.

4. Систему керування двонаправленим перетворювачем напруги у складі портативного фотоелектричного джерела живлення, яка відрізняється від існуючих тим, що використовує керування на основі методу передбачення по моделі (Model Predictive Control, або MPC), та дозволяє зменшити статичну похибку і перерегулювання при зміні навантаження у порівнянні з регулятором на основі ПІД - контролера.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень і результатів роботи.

Наукові положення і висновки є достовірними, оскільки базуються на основних законах теоретичної електротехніки і перетворювальної техніки, дослідженні та математичному моделюванні та розрахунках електромагнітних процесів у портативному фотоелектричному джерелі живлення з використанням пакетів програм *MATLAB* і *PSIM*. Достовірність теоретичних положень, висновків та рекомендацій базується на отриманих експериментальних результатах.

Розроблені у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації є достатньо обґрунтованими. Обґрунтованість наукових положень і висновків в роботі підтверджена їх узгодженням з результатами математичного та імітаційного моделювання, даними із публікацій та лабораторної перевірки розробок за результатами дисертаційних досліджень.

Висновки дисертаційної роботи у цілому відображають її сутність.

Автореферат у цілому відповідає змісту дисертації.

Повнота викладу основних наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях підтверджується 10 науковими публікаціями в фахових наукових виданнях. Основні положення пройшли необхідну апробацію на 3 міжнародних науково - технічних конференціях в 2016 -2018 рр.

Практична цінність отриманих результатів полягає у тому, що:

1. Розроблено фотоелектричне джерело електроживлення на базі гнучких фотоелектричних панелей з накопичувачем електроенергії (акумулятором) та покращеними ефективністю і масогабаритними показниками, яке рекомендовано для використання в розробках ТОВ «П'єзосенсор» (м. Чернігів).

2. Розроблено та експериментально перевірено ефективний двонапрявлений перетворювач напруги потужністю 150 Вт з чергуванням фаз при забезпеченні ККД, судячи з матеріалів дисертації, до 96,0 % в режимі передачі енергії з підвищенням напруги (розрядка акумулятора), і до 97,5 % в режимі з пониженням напруги (зарядка акумулятора).

3. Розроблено та експериментально перевірено гістерезисний пристрій СТМП («оптимізатор» потужності), який забезпечує значення ефективності слідкування за точкою максимуму потужності фотоелектричних панелей у середньому 90-97 % в широкому діапазоні навантажень.

4. Розроблені та перевірені математичні моделі системи керування двонапрявленим перетворювачем електроенергії на базі класичних (ПІ та ПІД) - регуляторів та з використанням керування з передбаченням по моделі.

5. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем Чернігівського національного технологічного університету МОН України.

Зауваження до змісту дисертації.

1. В п.2 «Висновків» до розділу 2 (стор.90) та п. 3 «Висновків» щодо роботи (стор.147) вказується на запропонований «метод порівняння топологій» двонапрямлених перетворювачів постійного струму, що досліджувались, але в підрозділі 2.2.1 розділу 2 (сторінки 63-65) сутність запропонованого обґрунтування вибору доцільної топології таких перетворювачів розглядається у вигляді саме нового підходу (п.п. 1-5) за формулами (2.5) – (2.6) при використанні «павукових» діаграм, а не згаданого «метода порівняння топологій».

2. При порівнянні параметрів низьковольтних перетворювачів постійної напруги для портативних фотоелектричних систем (розділ 2) враховувалися лише статичні втрати (втрати провідності) в ключових елементах, а динамічні (комутаційні) втрати не враховувалися, хоч їх значення у цілому можуть перевищувати статичні втрати для достатньо малих струмах навантаження (наприклад, для MOSFET – транзисторів с полисиликатным затвором). Слід зазначити, що у цілому результати розрахунків динамічних втрат є досить наближеними у зв'язку зі складністю динаміки процесів комутації та нелінійністю характеристик транзисторів.

3. На стор.48 та інших сторінках роботи зазначено, що схема транзисторного ключа містить «вбудований діод», хоча насправді цей діод є частиною структури польового транзистора, тобто є «паразитним», частотні параметри якого значно гірше ніж параметри сучасних діодів, які виготовлюються окремо.

4. На стор. 65 та інших сторінках застосований термін «режим безперервної провідності», який є достатньо розповсюдженим помилковим перекладом терміна «conduction», якій в даному контексті має перекладатися не як «провідність», а як «протікання струму». Цей режим традиційно визначається як «режим безперервного протікання струму» тому, що в окремих випадках струм в колі може не протікати навіть за наявності відкритого стану ключа.

5. На стор. 66 роботи на схемах заміщення двонапрямлених «DC/DC - перетворювачів з чергуванням фаз» (рис. 2.6) показано на виході ідеальну акумуляторну батарею (без внутрішнього опору). В той же час на часових діаграмах (рис.2.7, де, до речі, замість « $DT_{sw}/2$ » повинно бути « $T_{sw}/2$ ») наведено криву напруги вихідного конденсатора C_0 , розмах пульсацій якої суттєво залежить від значення внутрішнього опору акумулятора (наприклад, на ідеальній акумуляторної батареї напруга змінюватись не буде).

6. В розділах 3 і 5 докладно розглянуто запропонований бездатчиковий «оптимізатор потужності» гистерезисного типу для «стеження за точкою максимуму потужності» (СТМП або «*Maximum Power Point Tracking*» – «MPPT») фотоелектричних модулів, але слід зазначити, що відсутність активного управління MPPT такого типу не дозволяє йому ефективно працювати в умовах низьких рівнів сонячної інсоляції та часткового затінення фотопанелей.

7. В підрозділі 4.3 розглянуто нові результати щодо розроблення системи керування двонапрямленим DC/DC - перетворювачем на основі контролера з передбаченням по моделі (КПМ, або – «Model Predictive Control» - «MPC»), але в розділі 5, де наведено результати проведених експериментальних досліджень, відсутнє експериментальне порівняння зазначеного DC/DC - перетворювача з аналогічним перетворювачем постійного струму з класичним ПІД - регулятором.

8. Для більш об'єктивної кількісної оцінки енергоефективності (розділ 5) розглянутих імпульсного перетворювача і «оптимізатора» потужності в СТМП необхідно розміщати їх плати саме в термостатичну камеру, яка повністю термоізольована від зовнішнього впливу, тобто розміщувати в неї їх разом з тепловізором (наприклад, типу «Fluke Ti10»), за допомогою якого отримано фотографії теплових зон, а не так, як вказано на фотографіях (рис. 5.2-5.4 роботи або на рис. 10 - рис. 11 автореферату) без термостата.

9. У роботі мають місце деякі орфографічні помилки і неточності, що погіршує сприйняття роботи у цілому. Крім того, висновки з розділів сформульовано, нажаль, без ретельного відображення отриманих наукових результатів та носять в деяких випадках формалізований характер.

Наявні зауваження у цілому не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок

Дисертація Тительмаєра К.О. є завершеною самостійною науковою роботою, в якій отримано нові наукові результати, що сприяють вирішенню актуального наукового завдання щодо покращення енергоефективності та масогабаритних показників двонапрямлених перетворювачів постійної напруги у складі портативних джерел живлення на базі фотоелектричних систем. Це було досягнуто за рахунок проведеного аналізу топологій зазначених перетворювачів і вибору схем з мінімальними втратами в їх елементах, а також результатів розрахунків оптимальних параметрів пасивних елементів та системи керування на основі передбачення за моделлю. Для цього здобувачем досліджено низку перспективних силових структур і схем двонапрямлених перетворювачів, ефективність яких було доведена за допомогою аналітичних методів, модельних та експериментальних досліджень.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та результатів, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю постановки та вирішення задач досліджень. Робота виконана здобувачем на достатньо високому науковому рівні, має наукову новизну і достатню кількість публікацій, та представляє практичне значення для розвитку перетворювальної техніки в області створення ефективних перетворювачів постійної напруги малої потужності для портативних джерел електроживлення.

Вважаю, що дисертація Тительмаєра К.О. відповідає паспорту спеціальності 05.09.12 – «напівпровідникові перетворювачі електроенергії» та за своїм змістом відповідає вимогам пунктів 9 і 11 «Порядку присудження наукових ступенів» до кандидатських дисертацій, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. №567 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 656 від 19.08.2015р., а її автор **Тительмаєр Костянтин Олександрович** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Офіційний опонент

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
відділу стабілізації параметрів
електромагнітної енергії
Інституту електродинаміки
НАН України

В.О. Новський
14.09.2020

В.О. Новський

Вчений секретар ІЕД НАН України
канд. техн. наук



О.Г. Кофто
14.09.2020

О.Г. Кофто
14.09.2020