

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію **Зубкова Івана Сергійовича**

«Системи керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання», поданої на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Використання технології індукційного нагріву для термообробки виробів у промислових застосуваннях невинно зростає. Технологія індукційного нагріву має багато переваг у порівнянні з іншими технологіями нагрівання. В основі сучасних систем індукційного нагріву лежать високочастотні інвертори які побудовані на основі транзисторних перетворювачів. Потреба у використанні напівпровідникових перетворювачів постійно зростає через їх високу енергоефективність, швидкодію і низьких масогабаритних параметрів. Водночас застосування таких перетворювачів передбачає на стадії їх проектування аналіз, розрахунок та моделювання електромагнітних процесів в інверторах установок індукційного нагрівання для вирішення питань зменшення втрат в силових ключах при їх перемикаваннях.

Одним з основних напрямків досягнення цієї мети є налаштування системи керування, коли комутація силових ключів відбувається при струмі близькому до нуля. Щоб забезпечити такі режими перемикавання широко використовуються транзисторні перетворювачі з модуляцією щільності імпульсів Pulse density modulation (PDM). Тому наукове завдання, яке вирішене у роботі Зубкова І.С. – розробка нових методів та засобів керування високочастотними транзисторними перетворювачами для індукційного нагрівального обладнання із врахуванням особливостей використання модуляції щільності імпульсів при регулюванні струму чи потужності в навантаженні є безумовно актуальним.

Актуальність роботи підтверджує ще й той факт, що її результати були використані при виконанні науково дослідних робіт відділу транзисторних перетворювачів Інституту електродинаміки НАН України відповідно до державних галузевих програм науково-технічних досліджень: «Розробити електромагнітні та напівпровідникові системи модульної структури для енергоефективної термообробки металевих розплавів і деталей» («Елтерм-П», №ДР 0119U001212, 2019-2021 рр.)(виконавець); НДР: «Розвиток теорії високочастотних транзисторних перетворювачів на основі резонансних

інверторів для систем електроживлення технологічного обладнання» («Частота – 3», №ДР 0120U0020003, 2020-2024)(виконавець).

До основних наукових результатів роботи Зубкова І.С. слід віднести:

- розробку математичної моделі для дослідження електромагнітних процесів резонансного інвертора напруги з фазовим автопідлаштуванням частоти (ФАПЧ) при різних режимах PDM, яка дозволила проводити такі дослідження для частот, які не дорівнюють резонансній частоті коливального контуру;

- розробку нового способу керування такими інверторами, який на відміну від існуючих, в режимі ввімкненого стану інвертора використовує зворотній зв'язок за вихідним струмом та сигналами напруги колектор-емітер, а в режимі вимкненого стану лише зворотній зв'язок по вихідному струму і дає змогу зменшити втрати при перемиканні силових ключів перетворювача;

- нові залежності між добротністю коливального контуру та похибкою роботи системи ФАПЧ, які дозволили оцінити діапазон зміни струму перемикання транзисторів при малих добротностях контуру;

- доведення необхідності врахування вищих гармонік у складі вихідної напруги інвертора при визначенні його вихідного струму для добротності нижче 5;

- нові залежності між струмом перемикання ключів інвертора та фазового зсуву при роботі системи PDM для різних півперіодів вихідного струму, які дозволяють визначити оптимальний фазовий зсув системи ФАПЧ.

Практична цінність роботи полягає в наступному: розроблено алгоритм роботи системи ФАПЧ для транзисторних перетворювачів який на інтервалі ввімкненого стану використовує зворотній зв'язок колектор-емітер та сигнал вихідного струму інвертора, а на інтервалі вимкненого стану, коли напруга дорівнює нулю - лише сигнал вихідного струму інвертора; розроблено аналогову систему ФАПЧ, що автоматично підтримує постійний час фазового зсуву та близькі до оптимальних режими перемикання транзисторів та нову цифрову систему ФАПЧ, яка побудована з використанням логічних елементів на базі програмованих логічних інтегральних мікросхем і дає змогу зменшити кількість аналогових компонентів; створено макет високочастотного перетворювача для установок індукційного нагрівання з системою ФАПЧ та модуляцією щільності імпульсів. Результати дисертаційної роботи використані при розробці транзисторних перетворювачів установок індукційного нагрівання «ВЧИ-5» та «ВЧИ-10-66У», акти впровадження яких наведені в додатку В дисертації.

Всі наукові результати, що виносяться на захист отримані здобувачем особисто.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих в дисертаційній роботі Зубкова І.С. забезпечуються аргументованою постановкою мети і задач дослідження, використанням сучасних коректних методів дослідження проблем, комплексного аналізу отриманих результатів дослідження і обґрунтованістю та якісним формулюванням отриманих висновків.

Поставленим задачам відповідають методи та засоби досліджень, які забезпечили ефективність їх розв'язання.

Результати роботи Зубкова І.С. опубліковано в п'яти наукових публікаціях, з яких –3 у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus та один патент на винахід. Основні положення і результати роботи обговорювались на трьох міжнародних науково-технічних конференціях.

Представлена дисертаційна робота «Системи керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання», є завершеною науковою працею, яка за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових та практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків, а також за змістом поданого в ній матеріалу, відповідає спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії ...», затвердженого Кабінетом Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її автор Зубков Іван Сергійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії.

Рецензент

доктор технічних наук,
провідний науковий співробітник
відділу транзисторних перетворювачів
Інституту електродинаміки НАН України



Вячеслав МАРТИНОВ

підпис *Мартинова В.*
засвідчують
Інституту електродинаміки
Нац. Академії наук України

ст. інженер
Садковська Т. В.

