

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **Зубкова Івана Сергійовича** "Системи керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання", яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Вагому частину в сучасній технології металообробки займає технологія індукційного нагрівання, а в індукційних установках для технологічних операцій плавки, пайки, нагріву, загартування та відпускання деталей найважливішими елементами є напівпровідникові перетворювачі електроенергії, зокрема високочастотні резонансні інвертори напруги, елементи яких досліджувались в роботі, що розглядається.

Підвищення енергетичних та техніко-економічних показників індукційного нагрівального обладнання за рахунок розробки нових способів та засобів керування високочастотними резонансними інверторами напруги з фазовим автопідлаштуванням частоти (ФАПЧ) та модуляцією щільності імпульсів (Pulse density modulation(PDM)) – це актуальне наукове завдання, яке було вирішене в цій роботі.

Автором запропоновано новий спосіб керування послідовним резонансним інвертором, який полягає в тому, що система автоматично підлаштовує робочу частоту на інтервалі часу, коли є напруга на виході інвертора та використовує сигнали зворотнього зв'язку за напругою колектор-емітер (стік-витік) силових транзисторів та за вихідним струмом інвертора. А на інтервалі часу, коли напруга на виході інвертора відсутня, система зберігає робочу частоту. Реалізація даного способу дозволяє врахувати фронт перемикавання транзисторів інвертора при зміні режимів роботи. Використання запропонованого способу керування та його модифікацій покращує точність ФАПЧ за різноманітних умов функціонування: широкому діапазоні зміни параметрів навантаження, варіації напруги живлення, регулюванні вихідного струму. Це в результаті призводить до зменшення динамічних втрат потужності в силових транзисторах і загалом у перетворювачі.

Автором розроблено математичну модель резонансного інвертора напруги для дослідження електромагнітних процесів під час його роботи з системою керування з використанням ФАПЧ за різних режимів PDM, яка дала змогу проводити такі дослідження для частот, які не дорівнюють резонансній частоті коливального контуру.

Отримано нові аналітичні залежності між добротністю коливального контуру перетворювача та похибкою роботи системи ФАПЧ, які дозволили оцінити діапазон зміни струму перемикавання силових транзисторів за малих значень добротності контуру.

Вперше доведено необхідність врахування вищих гармонік у складі вихідної напруги інвертора при визначенні його вихідного струму для значень добротності коливального контуру нижче п'яти.

Автором отримано нові аналітичні залежності між струмом перемикавання силових ключів інвертора та фазового зсуву під час роботи системи PDM для різних півперіодів вихідного струму, які дозволяють визначити оптимальний фазовий зсув системи ФАПЧ.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується коректністю методик постановки експериментів і обробки експериментальних даних, їх узгодженням з теоретичними результатами і результатами моделювання, а також підтверджуються практичним використанням, обговоренням на міжнародних конференціях, публікаціями у фахових виданнях і авторським свідоцтвом. Сумнівів у вірогідності результатів немає. Висновки дисертаційної роботи є повними, логічними і відображають її сутність

Основний зміст дисертаційної роботи Зубкова І.С. досить повно представлено у 5 наукових працях, 3 з яких опубліковано в наукових фахових виданнях, що індексуються наукометричній базі SCOPUS та одному патенті на винахід.

Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи розглядалися на XV Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми сучасної електротехніки – 2018", XXV міжнародній науково-технічній конференції "Силова електроніка та енергоефективність", XVI Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми сучасної електротехніки – 2020", на Міжнародній науково-практичній конференції "Paradigmatic view on the concept of world science" (2020 р.).

Автором сформульовано мету об'єкт і предмет досліджень, сформульовані основні одержані результати.

По результатам роботи розроблено давач напруги колектор-емітер силових транзисторів який має високу швидкодію, розроблено аналогову та цифрову системи керування резонансними інверторами напруги установок індукційного нагрівання. Проведено експериментальні дослідження макетів перетворювачів.

Результати роботи знайшли практичне застосування при розробці високочастотного джерела живлення "ВЧІ-5" для локального нагріву та зонної плавки металевих деталей, при розробці установки індукційного нагріву "ВЧІ-10-66У" потужністю 10кВт частотою 66 кГц для пайки сталевих деталей у вакуумній камері.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень наведених у роботі отримані особисто або за безпосередньою участю автора.

На основі аналізу дисертаційної роботи "Системи керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання" Зубкова І.С., можна зробити висновок, що представлена робота є повноцінним науковим дослідженням в ході якого отримано нові наукові та

практичні результати, що є актуальними для розвитку сучасної силової електроніки. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та висновки переконливі та обґрунтовані як з наукової, так і технічної точок зору. Назва дисертації відповідає її змісту.

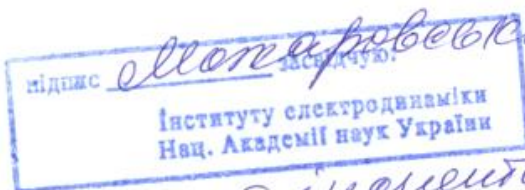
Дисертація Зубкова І.С. виконана на високому рівні. В роботі продемонстровано сучасні рішення виконання систем керування для високочастотних транзисторних перетворювачів індукційного нагрівального обладнання.

Вважаю, що дисертація Зубкова І.С. 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: к.т.н.,
старший науковий співробітник
відділу електромагнітних систем
ІЕД НАН України



Анатолій МОЖАРОВСЬКИЙ



об. інженер
Савченко Т.А.
Савченко