

ВІДГУК

офіційного опонента, доцента кафедри електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, кандидата технічних наук, доцента Бондаренка Олександра Федоровича, на дисертаційну роботу Зубкова Івана Сергійовича «Системи керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Обґрунтування вибору теми дисертаційної роботи

Устаткування для високочастотного індукційного нагрівання широко використовуються промисловими підприємствами для технологічних операцій розплавлення, паяння, нагріву, загартування та відпускання деталей. В порівнянні з іншими технологіями нагрівання, індукційний нагрів має багато переваг, серед яких локальність нагріву, точний розрахунок часу технологічної операції, безпосередня передача енергії від індуктора до деталі, екологічність і безпека робочого процесу та інші. Устаткування для індукційного нагрівання на транзисторних перетворювачах характеризується високим ККД, малими габаритами, широким діапазоном робочої частоти (від 10 до 500 кГц), великим ресурсом роботи, можливістю модернізації та вдосконалення силового обладнання при зміні технології виробництва або виду деталі, можливістю моніторингу та керування процесом за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Широкий діапазон зміни й високі значення робочої частоти обумовлюють наявність статичних та динамічних втрат в силових ключах і необхідність їх мінімізації, в тому числі засобами керування.

Тема дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки України «Енергетика та енергоефективність». Її підготовлено в Інституті електродинаміки НАН України у відділі транзисторних перетворювачів відповідно до наступних державних галузевих програм науково-технічних досліджень: «Розвинути теорію силових високочастотних транзисторних перетворювачів для побудови сучасного енергоефективного технологічного устаткування з урахуванням особливостей різноманітних типів навантаження» («Частота-2», № ДР 0115U002580, 2014-2019 рр.); «Розробити електромагнітні системи та напівпровідникові перетворювачі з регульованими параметрами для індукційної термообробки феромагнітних деталей складної форми» («Інтерм-П», № ДР 0115U004397, 2016-2018 рр.); «Розробити електромагнітні та напівпровідникові системи модульної структури для енергоефективної термообробки металевих розплавів і деталей» («Елтерм-П», № ДР 0119U001212, 2019-2021 рр.); «Розвиток теорії високочастотних транзисторних перетворювачів

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

Зважаючи на викладене вище, тема дисертаційної роботи, безумовно, є актуальною, а її вибір обґрунтовано достатньою мірою.

Оцінка структури та змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Зубкова І.С. має такі основні структурні елементи: титульний аркуш; анотація; зміст; перелік умовних позначень; вступ; чотири розділи; висновки; список використаних джерел; додатки. Загальний обсяг роботи складає 169 сторінки, у тому числі 130 сторінок основного тексту, 80 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел зі 125 найменувань і 3 додатки.

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, відзначено зв'язок роботи з науковими програмами та планами, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення результатів роботи, зазначено особистий внесок здобувача в друкованих працях, наведено відомості про апробацію отриманих результатів і публікації.

У першому розділі проведено огляд і аналіз транзисторних резонансних інверторів напруги із застосуванням різних способів регулювання струму навантаження: частотно-імпульсної, фазо-імпульсної, широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) та модуляції щільності імпульсів (PDM). Визначено, що з точки зору зменшення динамічних втрат в транзисторах високочастотних перетворювачів, використання модуляції щільності імпульсів є ефективнішим в порівнянні з іншими способами модуляції, тому що забезпечує комутацію ключів інвертора при мінімальних струмах навантаження. Врахування зміни параметрів навантаження під час технологічного процесу, таких як опір та індуктивність, а отже і добротності, для реалізації керування потребує наявності системи фазового автопідлаштування частоти (ФАПЧ). В цьому розділі, також, проведено аналіз роботи систем керування з ФАПЧ і поставлена задача їх вдосконалення.

У другому розділі виконано аналіз впливу добротності послідовного контуру навантаження резонансного інвертора установок індукційного нагрівання на точність роботи системи ФАПЧ. Визначено, що для забезпечення оптимальних режимів перемикання транзисторів час затримки імпульсів керування транзисторами відносно часу перетину струмом нульового рівня необхідно зменшувати в залежності від добротності контуру навантаження інвертора. Проведено визначення вихідного струму інвертора у випадку нехтування вищими гармоніками у складі його вихідної напруги. Встановлено, що для добротності резонансного контуру від 5 та вище нехтування вищими гармоніками у складі вихідної напруги інвертора не вносить значної похибки при визначенні вихідного струму інвертора, проте, за добротності нижче 5, аналітичні розрахунки слід проводити з урахуванням впливу вищих гармонік. В результаті запропоновано новий спосіб керування послідовним резонансним інвертором з

системою ФАПЧ та PDM, який полягає в тому, що система ФАПЧ підстроює частоту на інтервалі наявності напруги на виході інвертора та використовує сигнали зворотного зв'язку за напругою колектор-емітер (стік-витік) транзисторів і за вихідним струмом інвертора, а на інтервалі нульової напруги на виході інвертора ця частота зберігається. Розглянуто практичні аспекти реалізації запропонованої цифрової системи ФАПЧ і розроблено систему керування резонансним інвертором з модуляцією щільності імпульсів та аналоговою ФАПЧ.

У третьому розділі розроблено математичні та комп'ютерні моделі для дослідження електромагнітних процесів в схемі резонансного інвертора напруги з PDM регулюванням при різних параметрах навантаження. Запропонована математична модель відрізняється від наявних моделей тим, що враховує частоту вихідного струму, яка не дорівнює резонансній частоті чи частоти вільних коливань. Показано, що система ФАПЧ за наявності PDM регулювання не здатна забезпечити заданий фазовий зсув на кожному півперіоді вихідного струму. Цей факт потрібно враховувати при виборі значення фазового зсуву, яке необхідно збільшувати порівняно з оптимальним значенням.

У четвертому розділі здійснено практичну перевірку результатів теоретичних досліджень, для чого було розроблено та побудовано макет установки індукційного нагріву з системою ФАПЧ та PDM на основі резонансного інвертора напруги з послідовним контуром на виході. Спеціально для макета розроблено та побудовано давач напруги колектор-емітер (стік-витік) транзисторів, який має високу швидкодію порівняно з іншими схемними рішеннями. Для реалізації роботи системи ФАПЧ була розроблена плата керування, що побудована на основі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС). Алгоритм роботи цієї системи задається програмним шляхом і може бути змінений без втручання в схемну частину макета. Результати експериментальних досліджень підтвердили дані отримані за допомогою математичного та комп'ютерного моделювання. Запропонована система керування забезпечили кращі режими комутації силових ключів в широкому діапазоні зміни параметрів навантаження та зміни величини напруги живлення. Результати дисертаційної роботи впроваджено в технологію виготовлення установок індукційного нагрівання та зонної плавки металевих деталей «ВЧІ-5» (потужністю 5 кВт, частотою вихідного струму 66 кГц), що отримує живлення від трифазної мережі живлення 3x380В (договір № 2805/21 між ТОВ «ВІТОВА Лтд» та ДП «Науково-виробничий центр «Енергоімпульс» Інституту електродинаміки НАН України». Також результати теоретичних та експериментальних досліджень систем ФАПЧ за широкої зміни параметрів навантаження були використані при виконанні договору № 19-04 між Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та державним підприємством «Науково-виробничий центр «Енергоімпульс» Інституту електродинаміки НАН України», що підтверджено відповідним актом впровадження. В результаті

виконання роботи було розроблено, виготовлено та передано установку індукційного нагріву «ВЧІ-10-66У» потужністю 10 кВт з робочою частотою 66 кГц, яка призначена для пайки сталевих деталей у вакуумній камері.

Висновки повною мірою висвітлюють отримані у роботі наукові та практичні результати.

У **додатках** наведено список публікацій здобувача за темою дисертації та акти про впровадження і використання результатів дисертаційної роботи.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше розроблено математичну модель для дослідження електромагнітних процесів резонансного інвертора напруги з ФАПЧ при різних режимах PDM, яка дозволила проводити такі дослідження для частот, які не дорівнюють резонансній частоті коливального контуру.

2. Вперше запропоновано новий спосіб керування послідовним резонансним інвертором з системою ФАПЧ та PDM, який полягає в тому, що система ФАПЧ підстроює частоту на інтервалі наявності напруги на виході інвертора та використовує сигнали зворотного зв'язку за напругою колектор-емітер (стік-витік) транзисторів та за вихідним струмом інвертора, а на інтервалі нульової напруги на виході інвертора зберігається ця частота, це дозволяє врахувати фронт перемикання транзисторів інвертора при різних режимах роботи. Використання запропонованого способу керування покращує точність роботи ФАПЧ при широкому діапазоні зміни параметрів навантаження, зміні напруги живлення, регулюванні вихідного струму, що призводить до зменшення втрат потужності в транзисторах.

3. Отримав подальший розвиток математичний апарат для побудови систем керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання, а саме отримано нові залежності між добротністю коливального контуру та похибкою роботи системи ФАПЧ, які дозволили оцінити діапазон зміни струму перемикання транзисторів при малих добротностях контуру, а також доведено необхідність врахування вищих гармонік у складі вихідної напруги інвертора при визначенні його вихідного струму для добротності нижче 5.

4. Уточнено 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.

Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки й рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, обґрунтовані належним чином. Такий висновок можна зробити, зважаючи на змістовний огляд науково-технічної літератури за темою

дисертації, використання сучасних методів дослідження, ретельне проведення імітаційного моделювання в PSpice і натурних експериментів, порівняння отриманих результатів з результатами фізичних експериментів та їх критичний аналіз. Отримані в дисертації результати, висновки та рекомендації є логічно і математично аргументованими. Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату з урахуванням факторів та явищ, які мають місце в реальних перетворювачах електричної енергії для установок індукційного нагріву.

Вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач ґрунтується на положеннях теоретичної електротехніки, теорії електричних кіл з напівпровідниковими перетворювачами енергії, теорії планування експерименту, методах математичного та фізичного моделювання. Підтвердження достовірності результатів теоретичних досліджень забезпечено комп'ютерним імітаційним моделюванням електромагнітних процесів і натурними експериментами.

Практичне значення отриманих результатів

Розроблено алгоритм роботи системи ФАПЧ для резонансних інверторів напруги установок індукційного нагрівання, а також аналогову систему ФАПЧ, яка автоматично підтримує постійний час фазового зсуву та близькі до оптимальних режими перемикавання транзисторів.

Окрім того, розроблено нову цифрову систему ФАПЧ для керування резонансним інвертором напруги установок індукційного нагрівання, яка побудована з використанням програмованих логічних інтегральних схем і реалізує переваги запропонованого способу керування резонансним інвертором.

Також, розроблено та побудовано давач напруги колектор-емітер транзисторів, який має вищу швидкодію, порівняно з аналогами.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені у виробництво: виготовлено та передано в експлуатацію високочастотне джерело живлення «ВЧІ-5» яке призначено для місцевого індукційного нагріву та зонної плавки металевих деталей; виготовлено та передано в експлуатацію установку індукційного нагріву «ВЧІ-10-66У» потужністю 10 кВт з робочою 66 кГц, яка призначена для пайки сталевих деталей у вакуумній камері.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, 2018, 2020 рр.), Міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка та енергоефективність» (Харків, 2019 р.), а також Міжнародній науково-практичній конференції «Paradigmatic View on the Concept of World Science» (Торонто, Канада, 2020 р.).

Оцінка оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повноти викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертаційна робота має внутрішню єдність та логіку. Мова і стиль дисертації в цілому задовільні та відповідають вимогам стандартів оформлення науково-дослідних робіт. Обсяг і структура дисертації відповідають вимогам та рекомендаціям атестаційного органу України.

Під час вивчення та аналізу дисертаційної роботи випадків порушення академічної доброчесності виявлено не було.

Основний зміст дисертації викладено в 5 наукових працях та 1 патенті на винахід, з яких 3 публікації проіндексовано в міжнародній наукометричній базі Scopus. Матеріали роботи доповідалися на 4 науково-технічних конференціях.

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності та зауваження до роботи

Дисертація за змістом повністю відповідає спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, за якою вона представлена до захисту.

1. В оглядовій частині дисертаційної роботи й списку використаних джерел не представлено результати патентного пошуку, що ускладнює оцінку поточного рівня розвитку області техніки, яка досліджується.

2. Формулювання наукової новизни з метою коректного визначення особистого внеску автора в науку повинні містити вирази, які б вказували на ступінь наукової новизни, а саме: “вперше”, “вдосконалено”, “отримало подальший розвиток” тощо.

3. В додатку А не вказана більша частина конференцій, на яких здійснювалась апробація результатів дисертаційної роботи.

4. З тексту Розділу 4 не зрозуміла мета експериментальних досліджень. Необхідний коментар з цього приводу.

5. В Розділі 1 дисертаційної роботи наведена модульна структура, як один з можливих варіантів побудови перетворювача, і вказані її переваги. Чому модульну структуру не було обрано в якості основи для побудови високочастотного транзисторного перетворювача із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання?

6. В тексті дисертації некоректно визначено обсяг основного тексту дисертації (148 сторінок друкованого тексту). З огляду на п. 7 розділу III. Вимоги до структурних елементів (Вимоги до оформлення дисертації, які затверджено наказом Міністерства освіти і науки України 12.01.2017 № 40), основна частина дисертації має обсяг 130 сторінок.

7. За текстом дисертації зустрічаються несуттєві орфографічні, синтаксичні та стилістичні помилки.

Треба відмітити, що наведені зауваження та недоліки не є принциповими й не впливають на загальну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок

За результатами розгляду дисертаційної роботи можна зробити такі висновки.

1. Дисертаційна робота в цілому є самостійно виконаним завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Вона містить нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують важливу науково-практичну задачу розвитку принципів побудови систем керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання.

2. Дисертація відповідає спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Основні наукові положення дисертації досить повно та об'єктивно викладені у публікаціях здобувача.

3. За своїм змістом і науковим рівнем дисертаційна робота повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, що висуваються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор Зубков Іван Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка з галузі знань 14 – Електрична інженерія.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, доцент, доцент
кафедри електронних пристроїв та систем
КПІ ім. Ігоря Сікорського

