

ВІДГУК

офіційного опонента
на дисертаційну роботу Зубкова Івана Сергійовича «Системи керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 -«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами, темами.

Одним з перспективних напрямків поліпшення енергетичних характеристик напівпровідникових перетворювачів є використання резонансних коливань в процесі перетворення електроенергії. Резонансні перетворювачі дозволяють знизити комутаційні втрати, підвищити частоту перетворення, поліпшити умови електромагнітної сумісності з мережею та навантаженням. Оновлення елементної бази принципово змінює ситуацію у рішенні проблеми підвищення ефективності резонансних перетворювачів електроенергії. Застосування нових напівпровідникових приладів і силових модулів на їхній основі, а також сучасних мікропроцесорних засобів дозволяє більш ефективно вирішувати задачі, що пов'язані з мінімізацією втрат та підвищенням якості вихідних параметрів за рахунок реалізації нових способів регулювання. Усі відомі способи керування мають як окремі переваги так і певні недоліки. Прагнення знизити комутаційні втрати та підвищити ККД орієнтує розробників використовувати найбільш економічні способи керування резонансних перетворювачів для конкретних застосувань. Розробка високоефективних вторинних джерел живлення для індукційного нагрівального обладнання є одним з перспективних напрямів розвитку перетворювальної техніки. У зв'язку з цим, дисертаційна робота Зубкова І.С., метою якої є підвищення енергетичних та техніко-економічних показників індукційного нагрівального обладнання за рахунок розробки нових способів та засобів керування високочастотними транзисторними

перетворювачами з фазовим автопідлаштуванням частоти та модуляцією щільності імпульсів, є актуальною.

Її актуальність підтверджується приведеним переліком наукових програм і науково-дослідних робіт, відповідно до яких виконувалася розглянута дисертаційна робота. Тема дисертаційної роботи відповідає науково-дослідним роботам відділу транзисторних перетворювачів Інституту електродинаміки НАН України відповідно до державних галузевих програм науково-технічних досліджень, а саме НДР: «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.); НДР: «Розробити електромагнітні системи та напівпровідникові перетворювачі з регульованими параметрами для індукційної термообробки феромагнітних деталей складної форми» («Інтерм-П», №ДР 0115U004397, 2016-2018 рр.); НДР: «Розробити електромагнітні та напівпровідникові системи модульної структури для енергоефективної термообробки металевих розплавів і деталей» («Елтерм-П», №ДР 0119U001212, 2019-2021 рр.); НДР: «Розвиток теорії високочастотних транзисторних перетворювачів на основі резонансних інверторів для систем електроживлення технологічного обладнання» («Частота – 3», №ДР 0120U0020003, 2020-2024).

Зміст роботи.

У *вступі* обґрунтовано актуальність та доцільність роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну і практичне значення роботи, об'єкт, предмет та методи дослідження, показано особистий внесок здобувача в друкованих працях, наведено дані про апробацію результатів роботи і публікації.

У *першому розділі* описано принцип роботи індукційного нагріву та наведені особливості індукційного обладнання. Проведено аналіз різних транзисторних перетворювачів для установок індукційного нагрівання та опис найбільш поширених способів регулювання вихідного струму та потужності

послідовного резонансного інвертора. Обґрунтовано переваги використання способу керування з модуляцією щільності імпульсів, який забезпечує мінімальні динамічні втрати потужності. Проаналізовано роботу систем фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) резонансного інвертора з модуляцією щільності імпульсів.

В другому розділі представлено новий спосіб керування послідовним резонансним інвертором з системою ФАПЧ з модуляцією щільності імпульсів. Розроблено цифрову систему ФАПЧ, яка реалізує цей спосіб. Наведено структурну схему системи керування та діаграми, які пояснюють роботу високочастотного інвертора на різних інтервалах роботи. Описана система керування з кроком модуляції, який дорівнює періоду та півперіоду вихідного струму.

У третьому розділі приведені математичні моделі для різних інтервалів роботи резонансного інвертора напруги з PDM регулюванням. Наведено результати комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів в послідовному резонансному транзисторному інверторі напруги. Отримано графік залежності значення фазового зсуву для різних півперіодів вихідного струму. Проведено аналіз електромагнітних процесів при різних режимах модуляції щільності імпульсів та різних параметрах схеми заміщення навантаження.

В четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень установки індукційного нагріву з ФАПЧ та модуляцією щільності імпульсів. Показано зовнішній та внутрішній вигляд установки індукційного нагрівання «ВЧІ-5» та наведені основні технічні характеристики високочастотного транзисторного перетворювача.

У загальних висновках сформульовані основні результати, які дозволили оцінити вклад автора дисертаційної роботи у напрямі досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів.

До основних наукових результатів можна віднести:

- математичну модель для дослідження електромагнітних процесів резонансного інвертора напруги з ФАПЧ при різних режимах модуляції щільності імпульсів;
- новий спосіб керування послідовним резонансним інвертором з системою ФАПЧ та модуляції щільності імпульсів з підстроюванням системою ФАПЧ частоту на інтервалі наявності напруги на виході інвертора;
- нові важливі залежності між добротністю коливального контуру і похибкою роботи системи ФАПЧ, а також між струмом перемикачів ключів інвертора і фазового зсуву при роботі системи з модуляцією щільності імпульсів для різних півперіодів вихідного струму.

Практичні результати роботи полягають в тому, що на основі результатів наукових досліджень розроблено ряд високоефективних джерел живлення, які знайшли впровадження в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України та на підприємстві «ВІТОВА Лтд» (м. Київ).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю постановки мети і задач дисертаційного дослідження, використанням, як загальнопризнаних фундаментальних методів, так і методів математичного моделювання.

Нові наукові результати, що отримані в дисертаційній роботі, обґрунтовані чіткими математичними викладками і підтверджені співставленням результатів чисельних розрахунків з результатами експериментів та імітаційного моделювання, які підтверджують достовірність теоретичних висновків. Зроблені дисертантом припущення дозволяють досягти достатню для інженерних розрахунків точність результатів.

Сформульовані в роботі висновки і рекомендації, виходять з критичного аналізу отриманих результатів, їх співставленні з відомими та отриманими раніше даними, є достатньо аргументовані.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

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

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць: з яких 3 статті, що включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, 1 патент на винахід.

Опубліковані роботи у повній мірі висвітлюють основний зміст, результати, висновки і рекомендації дисертації.

Результати роботи доповідались і обговорювались на науково-технічних конференціях: XV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2018» (м. Київ, 4 – 8 червня 2018 р.); XXV міжнародна науково-технічна конференція «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Харків, 9-13 вересня 2019 р.); XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2020» (м. Київ, 8 – 12 червня 2020 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Paradigmatic view on the concept of world science» (Торонто, Канада, 21 серпня 2020 р.).

Зауваження щодо змісту дисертації.

1. Вирази для струму та напруги в операторній формі для кожного інтервалу наведено для окремих міжкомутаційних інтервалів. Кожний такий вираз названо математичною моделлю певного інтервалу. В той же час бажано, щоб «математична модель для дослідження електромагнітних процесів резонансного інвертора» мала б узагальнений вигляд і надавала можливість отримати опис електромагнітних процесів для будь-якого моменту часу. Можна було б скористатися методом простору змінних стану, коли створюється модель динамічної системи, що включає набір змінних входу, виходу і стану, пов'язаних між собою диференціальними рівняннями першого порядку, які записуються в матричній формі. Тобто необхідно було навести б систему диференційних рівнянь для кожного міжкомутаційного інтервалу. Далі, наприклад, привести до матричного вигляду, що надало б можливість спростити рішення системи рівнянь.

2. Математичну модель доцільно було використати для отримання зовнішніх та регулювальних характеристик перетворювача, що надало б змогу отримати більш повне уявлення про можливості перетворювача і характер електромагнітних процесів в силовій частині.

3. Враховуючи, що амплітуди струму у резонансному контурі та напруги на резонансній ємності при накачці енергії в контурі збільшується з кожним міжкомутаційним проміжком часу, то наприкінці періоду синусоїди будуть мати найбільшу амплітуду. Для досягнення певного ефективного значення струму навантаження за період, доцільно було б оцінити на скільки максимальні струми транзисторів більше за струм навантаження за допомогою, наприклад, математичної моделі. Такі характеристики зазвичай будують в координатах зовнішніх характеристик для певної кількості імпульсів накачки і являють собою лінії незмінного струму через транзистори, який є кратним струму навантаження. (В дисертації це ілюструє, наприклад, рис. 3.7, де амплітуда першого імпульса синусоїдальної форми менша майже в три рази за останній). В літературі такі характеристики мають назву ізопараметричних (ізотокових). Такі характеристики дають можливість оцінити спосіб регулювання з точки зору вибору ключових елементів за прямим струмом і зворотною напругою, адже це визначає вартість силової схеми перетворювача.

4. Ствердження що необхідно врахувати вищі гармоніки у складі вихідної напруги інвертора при визначенні його вихідного струму для добротності нижче 5 не обґрунтовано, адже математичний аналіз електромагнітних процесів не враховував суттєву нелінійність навантаження, що входить до параметрів резонансного контуру, що заздалегідь обумовлює певну суттєву похибку.

5. В дисертаційній роботі відсутні умовні позначення. Є перелік умовних скорочень, але не наведено розшифровку скорочень у тексті, коли вони вживаються вперше. В тексті україномовної дисертації часто використовуються скорочення понять на англійській мові. В той же час в літературі широко використовують скорочення цих же понять на українській мові.

Відзначені зауваження і недоліки не позначаються на загальній високій оцінці дисертаційної роботи. Досконале знання специфіки проблеми – одна з основних особливостей дисертаційної роботи, що представляється до захисту.

Висновок.

Дисертаційна робота Зубкова Івана Сергійовича «Системи керування високочастотними транзисторними перетворювачами із модуляцією щільності імпульсів для індукційного нагрівального обладнання» цілком 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 від 12 січня 2022 року №44, а її автор Зубков Іван Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 – «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 – «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент:
доктор технічних наук, професор,
проректор з наукової роботи
Національного університету
кораблебудування
імені адмірала Макарова



Г.В. Павлов