

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., доцента Крилова Дениса Сергійовича

на дисертаційну роботу Васечка Євгена Вікторовича

«Двоступеневі DC/AC перетворювачі підвищеної ефективності», що подана на здобуття наукового ступеня доктор філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка

Детальний розгляд та аналіз дисертаційної роботи Васечка Євгена Вікторовича на тему «Двоступеневі DC/AC перетворювачі підвищеної ефективності», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити загальний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

1. Актуальність дисертаційної роботи

Сучасне суспільство постійно стикається з проблемами енергозбереження та екології. Регулярно зростає ціна на енергоресурси (нафта, вугілля, газ), економія та перехід на інші види палива найчастіше призводить до погіршення екологічної обстановки. Застосування енергозберігаючих технологій може призвести до зниження витрат на енергію та зробити позитивний вплив на екологію. Якісні рішення з енергозбереження дозволить оптимізувати використання енергії любого типу. Вибір на користь екологічних рішень дозволить знизити викиди і підвищить ефективність використання енергії, в т.ч. і електричної. А для перетворення енергії, яка вироблена з цих джерел, до необхідної форми, напруги, частоти, виникає необхідність використання DC/AC перетворювачів напруги.

Найпоширенішим видом DC/AC перетворювачів напруги є двоступенева структура, яка складається з двох окремих перетворювачів DC-DC та DC-AC. Існує

велика кількість схемотехнічних рішень DC-DC перетворювачів. Але питання порівняння потужності втрат у активних елементах схем (MOSFET транзистори, випрямні діоди) між собою, з урахуванням того факту, що у різних схемотехнічних рішеннях може використовуватися принципово різна кількість ключових елементів, які працюють при різних робочих напругах, потребує додаткового вивчення.

Одним з напрямків зменшення потужності втрат у DC-AC ступені перетворення є використання несинусоїдальних форм напруги у напівмостових перетворювачах у складі мостових інверторів, які дозволяють знизити потужність динамічних втрат в елементах комутації. Але сучасні запропоновані форми фронтів напруги у напівмостових перетворювачах не дозволяють отримати малі значення THD вихідної напруги при малих значеннях тривалості формування фронтів. Тому видається актуальним дослідження нових несинусоїдальних форм напруги та алгоритмів керування, при одночасному зменшенні THD вихідної напруги.

Тому тема дисертації, що спрямована на створення двоступеневих DC/AC перетворювачів напруги з покращеними енергетичними характеристиками шляхом удосконалення схемотехнічних рішень і алгоритмів керування у DC-DC ступені перетворення і використання у DC-AC ступені спеціальних не синусоїдальних форм напруги є безсумнівно актуальною.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, та темами

Результати досліджень, що представлені в дисертаційній роботі отримані на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХПІ», відповідають закону України про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки від 11.07.2001 № 2623-III (зі змінами, внесеними згідно із законами № 1162-IX від 29.01.2021, № 2031-IX від 01.02.2022, № 2859-IX від 12.01.2023) (Ст.3 п.3 енергетика та енергоефективність).

3. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна результатів роботи Васечко Є.В. не викликає сумнівів. Серед важливих наукових результатів досліджень можна відзначити наступні:

- вперше запропоновано метод еквівалентного елемента для порівняння потужності статичних втрат у активних елементах DC-DC перетворювачів із принципово різною їх кількістю та робочими напругами у топологіях, що дозволяє забезпечити рівнозначність порівнювальних топологій;

- вперше проведено порівняльний аналіз потужності статичних втрат в активних елементах ізольованих DC-DC перетворювачів різних топологій, у тому числі з різним числом фаз комутації, в умовах діапазонної зміни вхідної напруги і з використанням метода еквівалентного елемента;

- вперше запропоновано та досліджено компенсаційний метод зниження низькочастотних пульсацій вхідного струму в одноконтурній системі стабілізації напруги у DC-DC перетворювачі у складі двоступеневої топології, який дозволяє алгоритмічним шляхом збільшити у перетворювачі вихідний опір на змінному струмі і цим зменшити низькочастотні пульсації вхідного струму та втрати потужності у DC-DC ступені перетворення;

- отримані залежності рівня вищих гармонік у спектрі вихідної напруги мостового інвертора від тривалості інтервалів комутації трапецеїдальної напруги у напівмостових перетворювачах з лінійною та синусоїдальною формою фронтів, які дозволяють обрати оптимальну тривалість інтервалів комутації для отримання мінімального значення коефіцієнта гармонік вихідної напруги при одночасному зменшенні потужності динамічних втрат у IGBT ключах;

- запропоновано нову аналітичну функцію спеціальної форми фронтів трапецеїдальної напруги, при застосуванні якої досягається повне придушення вищих гармонік і формується синусоїдальна напруга при одночасному зниженні потужності динамічних втрат;

- вперше запропоновано використання у однофазному мостовому DC-AC перетворювачі комплементарних форм з несинусоїдальними напругами у напівмостових перетворювачах при комбінованій модуляції, що дозволяє зменшити масогабаритні показники дроселя у вихідному фільтрі.

4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному: надані рекомендації для вибору топології DC-DC перетворювача в умовах діапазонної зміни вхідної напруги, запропоновано схемотехнічне рішення енергоефективного активного обмежувача напруги зі зниженою потужністю статичних втрат у елементах комутації; розроблено нову топологію ізольованого 3-х фазного DC-DC ступеня перетворення із суміщенням у єдиному конструктивному магнітному елементі вхідного дроселя та силового трансформатора; сформульовані рекомендації для вибору форми фронтів та їх тривалості при використанні трапецеїдальної напруги у напівмостових перетворювачах DC-AC ступеня перетворення.

Результати дисертаційної роботи використані на НВП «Імпульс» (м. Запоріжжя) при розробці та виробництві двоступеневих DC/AC перетворювачів напруги з потужністю 1-10 кВт. Безпосередньо Васечко Є. В. був керівником проекту при розробці перетворювача з вихідною 3-х фазною напругою 220В/380В та потужністю 8kVA для живлення системи кондиціонування на пасажирських вагонах на замовлення АТ «Укрзалізниця» (акт про використання матеріалів дисертаційної роботи при виробництві перетворювачів від 21.02.2024 р., представлений у додатку дисертаційної роботи).

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором

Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 5 у матеріалах апробаційного характеру, що входять до наукометричної бази даних Scopus, 2 патента України на корисну модель. Зазначене вище дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим

дослідженням, результати якого дозволяють поліпшити енергетичні та якісні характеристики двоступеневих перетворювачів напруги.

6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Дисертація Васечка Є.В. є завершеною науковою роботою, містить дві анотації – українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, висновки, список літератури і додатки.

Дослідження виконано за допомогою теорії електричних кіл, методу гармонійного аналізу і рядів Фур'є. Основні теоретичні результати перевірені моделюванням характеристик перетворювачів за допомогою комп'ютерної програми *Mathtcad*, а також експериментально.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії у двоступеневих DC/AC перетворювачах напруги. *Предметом дослідження* є схемотехнічні рішення, алгоритми роботи, несинусоїдальні форми напруг у двоступеневих DC/AC перетворювачах.

У *вступі* розкрито актуальність теми дисертаційної роботи, сформовано мету і задачі роботи. Наведено наукову новизну та практичні результати, що були представлені науковій спільноті на Українських і міжнародних конференціях та опубліковані у фахових виданнях з особистим внеском здобувача, про що свідчить наведений у Додатку Б перелік публікацій.

В *першому розділі* Проведено аналіз властивостей та особливостей використання Voltage fed та Current fed топологій у ізольованих DC-DC перетворювачах. Показані переваги збільшення числа фаз комутації у Current fed топологіях. Визначено напрямки для зменшення маси та габаритів магнітних елементів при збереженні позитивних властивостей Current fed перетворювачів. Проаналізовано причини появи НЧ складової пульсацій вхідного струму у двоступеневих DC/AC перетворювачах напруги. Проведено порівняльний аналіз алгоритмів комутації напівмостових перетворювачів DC-AC ступеня перетворення,

який показує переваги використання несинусоїдальних форм при формуванні вихідної напруги інвертора.

В *другому розділі* проведено дослідження потужності статичних втрат в активних елементах Push-Pull, Half-Bridge, Full Bridge ізольованих Boost DC-DC перетворювачів з числом фаз комутації від двох до п'яти в умовах діапазонної зміни напруги живлення. Дослідження проведено з використанням метода еквівалентного елемента, що дозволяє проводити порівняння статичних втрат у топологіях із принципово різною кількістю активних елементів. Запропоновано нове схемотехнічне рішення багатофазного перетворювача, яке дозволяє зменшити кількість силових магнітних елементів за рахунок об'єднання в одному конструктивному елементі накопичувального дроселя і силового трансформатора. Запропоновано просту модель DC-DC перетворювача, яка описує процес виникнення НЧ пульсацій струму. На її основі запропоновано компенсаційний метод зниження НЧ пульсацій вхідного струму.

В *третьому розділі* запропоновано спосіб формування квазисинусоїдальної вихідної напруги у мостовому одно та трифазному інверторі з трапецеїдальною формою напруг з лінійними та синусоїдальними фронтами у напівмостових перетворювачах. Досліджена можливість зниження рівня вищих гармонік у спектрі та покращення форми вихідної квазисинусоїдальної напруги шляхом деформації функції форми фронтів трапецеїдальної напруги напівмостових перетворювачів. Запропоновано спосіб формування синусоїдальної напруги в однофазному мостовому інверторі з комплементарними формами несинусоїдальної напівмостової напруги при комбінованому вигляді модуляції. Проведено оцінку зниження відносної ПДВ в елементах комутації у запропонованих способах формування вихідної напруги.

У *четвертому розділі* проведені експериментальні перевірки теоретичних досліджень, проведених у другому та третьому розділах. У DC-DC ступені перетворення досліджено запропонована топологія 3-х фазного DC-DC перетворювача з суміщеними магнітними елементами на прикладі перетворювача з вихідною потужністю 5кВт та вхідною напругою у діапазоні 80...160В з

використанням компенсаційного методу зниження низькочастотних пульсацій вхідного струму. Експериментальна перевірка DC-AC ступеня перетворення проведена на макеті однофазного мостового перетворювача з вихідною потужністю 3кВт.

У загальних висновках здобувачем наведено основні теоретичні та практичні результати дослідження, які відповідають поставленим задачам дисертаційного дослідження.

Перелік з використаних джерел із 124 найменувань достатньо широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості іноземних та вітчизняних джерел.

Додаток містить інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

7. Достовірність отриманих результатів та висновків

Результати теоретичних досліджень DC-DC ступеня перетворення перевірені на макеті 3-х фазного перетворювача з суміщеними магнітними елементами з вихідною потужністю 5кВт та вхідною напругою у діапазоні 80...160В (на запропонованій топології) з використанням енергоефективного активного обмежувача напруги. Перевірка енергетичних характеристик DC-AC ступеня перетворення з використанням несинусоїдальних форм напруг проведена на макеті однофазного мостового перетворювача з вихідною потужністю 3кВт. Отримані результати експериментальної перевірки підтверджують теоретичні положення.

8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертація виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у трьох фахових виданнях України, п'ять у матеріалах апробаційного характеру, що входять до наукометричної бази даних Scopus, два патенти України на корисну модель. Дисертант активно приймав участь в українських та закордонних конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Однак слід зазначити ряд зауважень та дискусійних питань:

1. У запропонованому 3-х фазному DC-DC перетворювачі із суміщеними магнітними елементами бажано було б дослідити вплив розкиду індуктивності вхідних дроселів в фазах комутації на рівень пульсацій вхідного струму і енергетичні показники ступеня перетворення.

2. Запропонована схемотехніка активного обмежувача напруги (АОН-2) розглянута на прикладі мостового перетворювача, а бажано дослідити його роботу на прикладі запропонованого 3-х фазного DC-DC перетворювача.

3. Бажано дослідити причини суттєвого зниження потужності споживання запропонованого 3-х фазного DC-DC перетворювача із суміщеними магнітними елементами на холостому ході порівняно з класичними топологіями.

4. У DC-AC ступені перетворення при використанні трапецеїдальної напруги у напівмостових перетворювачах з лінійними та синусоїдальними формами фронтів не досліджено вплив тривалості формування фронтів на діюче значення вихідної напруги (за умови відповідності вимогам до якості електроенергії по спектральному складу).

5. При розгляді напівмостових перетворювачів з трапецеїдальними напругами не досліджено вимоги до вихідних фільтрів напівмостових перетворювачів у зв'язку з появою у вихідній напрузі плоскої вершини (статичний стан ключових елементів).

Загалом, наведені вище зауваження не впливають на рівень виконаного дослідження та на позитивну оцінку всієї дисертаційної роботи.

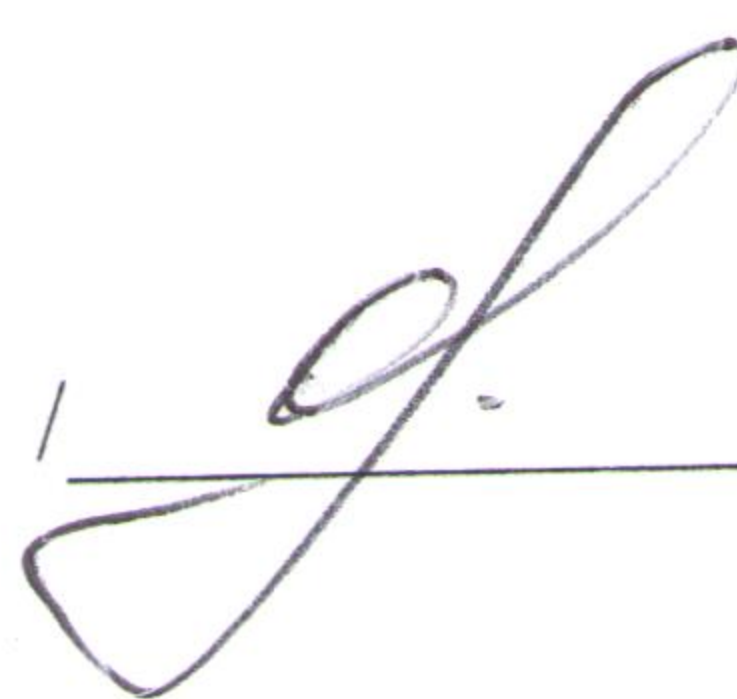
10. Висновки

Дисертаційна робота Васечко Є.В. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 17 – «Електроніка та телекомунікації», спеціальності 171 – «Електроніка».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані наукові результати, та наявну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Васечка Євгена Вікторовича «Двоступеневі DC/AC перетворювачі підвищеної ефективності» відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «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 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 341 від 21.03.2022 та № 502 від 19.05.2023).

Рецензент:

кандидат технічних наук,
доцент, доцент кафедри
«Промислової і біомедичної
електроніки»



Денис КРИЛОВ



«____»

2024 року

Підпис доц. Дениса Крилова
 ЗАСВІДЧУЮ:
 ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
 НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
 "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
 "22" 05 2024 р.

ЗАЙЦЕВ Ю. І.