

ВІДГУК офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Івахна Володимира Вікторовича**
«Нереверсивні дволанкові перетворювачі постійної напруги з розділеною комутацією», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Актуальність теми дисертації.

Використання електричної енергії в різноманітних сферах промисловості і побуту вже неможливо уявити без перетворювачів постійного струму. Вони є основою сучасних систем електроживлення: від побутових джерел постійного струму до сучасних систем генерації електричної енергії з відновлювальних первинних джерел. Більшість рішень, що використовуються, представлені дволанковими перетворювачами постійної напруги з гальванічною розв'язкою. Використання таких перетворювачів обумовлюється енергетичною ефективністю передачі електричної енергії лінією постійного струму, простотою підключення до таких ліній джерел та споживачів електричної енергії в системах з розподіленою генерацією та споживанням, застосуванням накопичувачів електричної енергії з акумуляторними батареями, необхідністю узгодження рівнів напруги, тощо. Пріоритетними напрямками розвитку перетворювальної техніки, особливо напівпровідникових перетворювачів електричної енергії з потужністю понад десятки - сотні кіловат, є підвищення їх енергетичної ефективності, покращення масо-габаритних показників за рахунок підвищення частоти перетворення та ін. У зв'язку з цим зростають вимоги до розробки нових або подальшого розвитку існуючих перетворювачів щодо зменшення потужності динамічних втрат у напівпровідникових ключах, розробки алгоритмів керування, що поліпшують їх функціональні можливості.

Сфери використання дволанкових перетворювачів відносяться як до низьковольтних, так і для високовольтних рішень, що вимагає застосування в відповідних перетворювачах різних напівпровідникових ключів, а саме *MOSFET* та *IGBT*. Різні типи ключів мають різні динамічні властивості, особливості процесів комутації, структуру динамічних втрат, що передбачає створення відповідних схемних рішень перетворювачів та алгоритмів керування силовими ключами. Дволанковий перетворювач постійної напруги з гальванічною розв'язкою може використовуватись в якості узгоджувального перетворювача між відносно низьковольтним накопичувачем електричної енергії на акумуляторних батареях та лінією електроживлення з напругою декілька кіловольт. У цьому разі для здійснення двостороннього обміну енергією він повинен бути оборотним, але не реверсивним. Таким чином, науково-прикладна проблема розробки та створення сучасних напівпровідникових перетворювачів даного класу полягає не тільки в забезпеченні зменшення потужності динамічних втрат у напівпровідникових ключах, а й у розробці для цього відповідних схем перетворювачів і алгоритмів керування, що забезпечать напівпровідниковим ключам відповідні до їх характеристик умови комутації. Як відомо, зменшення динамічних втрат та підвищення частоти

перетворення може бути досягнуто за рахунок комутації ключів у нулях струму та напруги, їх снаберного вмикання та вимикання. Впровадження алгоритмів з узгодженою комутацією ключів різних ланок перетворювача дозволяє забезпечити доцільний режим перемикавання для ключів різних типів, які працюють в низьковольтній та високовольтній ланках перетворювача.

Розвиток методу розділеної комутації, що лежить в основі принципів побудови та створення неререверсивних оборотних дволанкових трансформаторних перетворювачів постійної напруги, які здатні реалізовувати зниження динамічних втрат за рахунок забезпечення доцільних для кожного з типів ключів режимів комутації, розробка та аналіз нових схемних рішень відповідних перетворювачів є складною науково-прикладною проблемою, тому тема дисертаційної роботи, що присвячена їй вирішенню, є, безумовно, актуальною.

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

Дисертаційні дослідження проводились на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП» згідно пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки відповідно Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 № 2623-III, завдань тематичного плану Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», наказу НТУ «ХП» №197 ОД від 13.04.2016р. та наукової теми МОН України «Дослідження перетворювачів з розділеною комутацією» (ДР № 0118U002011) під науковим керівництвом здобувача.

При проведенні цих робіт та досліджень здобувач здійснив аналіз принципів роботи та схемних рішень оборотних дволанкових перетворювачів постійної напруги, розробив нові схемні рішення оборотних перетворювачів з неоднорідними ланками та алгоритми синхронного керування силових керованих ключів обох ланок, що забезпечують сприятливі умови комутації ключів. Використання цих наробок дозволило суттєво підвищити енергетичну ефективність відповідних перетворювачів.

Новизна наукових результатів.

Автором здійснено подальший розвиток методу розділеної комутації, розроблені теоретичні засади побудови дволанкових перетворювачів з суттєво різними величинами постійної робочої напруги ланок, нові схемні рішення оборотних перетворювачів з неоднорідними ланками та м'якою комутацією керованих ключів.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації відповідають меті дисертації та поставленим задачам. Важливими науковими результатами є:

1. Розвиток методу розділеної комутації для дволанкового перетворювача постійної напруги з проміжним узгоджувальним трансформатором підвищеної частоти, який відрізняється від існуючих синхронним керуванням силових керованих ключів обох ланок. Метод забезпечує для оборотних дволанкових перетворювачів з неоднорідними ланками сприятливі умови комутації ключів, що дозволяє, у свою чергу, підвищувати частоту перетворення та наблизити показники комутаційних втрат у силових комутаторах таких перетворювачів до показників резонансних перетворювачів при відсутності спеціальних силових резонансних ланцюгів;

2. Запропоновано та теоретично обґрунтовано поняття «критичної» частоти перетворення для перетворювача з розділеною комутацією на *IGBT*, що дозволяє обрати структуру перетворювача з найменшими втратами у силових ключах;

3. Розроблено математичну модель для визначення величини «критичної» частоти, яка дозволяє виконувати аналіз параметрів *IGBT*-модулів з різними граничними напругами та частотними властивостями для отримання величин цієї частоти при використанні конкретних приладів;

4. Результати, що отримано при аналізі діаграм процесів як при синхронному, так і незалежному керуванні транзисторами інвертора струму неререверсивного оборотного трансформаторного перетворювача з мостовою схемою ланки інвертора струму з 4-квADRантними ключами на базі зустрічно-послідовно з'єднаних *MOSFET* для обох напрямків передачі енергії – встановлено, що синхронне керування потребує вдвічі меншого числа каналів (чотири) управління ключами ланки, але потребує наявності датчиків нуля струму транзисторів;

5. Виявлені найбільш ефективні схеми неререверсивних оборотних трансформаторних перетворювачів з розділеною комутацією, що містять 4-х квадрантні ключі на базі *IGBT*-модулів в ланці інвертора струму, із зменшеним, у порівнянні з традиційними схемними рішеннями, числа *IGBT*-модулів. Результатами аналізу комутаційних процесів в них підтверджено наявність сприятливих умов комутації. Найбільш ефективною, з урахуванням вартісних показників, є схема перетворювача з розділеною комутацією, у комутаторі ланки інвертора струму якої присутня мостова схема *IGBT* із зворотними діодами та 4-хквадрантний ключ, встановлений послідовно з обмоткою трансформатора, а також із асиметричною топологією ланки інвертора струму;

6. У перетворювачі з розділеною комутацією та асиметричною схемою інвертора струму виявлений новий вид комутації ключа ланки – примусове вмикання при нульовій напрузі, при якому має місце стрибкоподібне зростання струму ключа без істотних комутаційних втрат;

7. Розроблена математична модель, яка пов'язує величини електромагнітних навантажень та інших параметрів трансформатора з величиною індуктивності розсіяння (яка виконує роль бездисипативного снабера вмикання силового ключа ланки інвертора струму). Отримані закономірності дозволяють змінювати величину напруги короткого замикання трансформатора для отримання бажаних характеристик перетворювача.

8. Досліджено вплив значення струму навантаження оборотного трансформаторного перетворювача із запропонованими алгоритмами на наявність сприятливих умов комутації (у тому числі, режиму вмикання транзисторів ланки інвертора напруги при нульовій напрузі): для режиму передачі енергії від ланки інвертора напруги до ланки інвертора струму визначені величини «критичних» струмів навантаження, менше яких режим вмикання транзисторів ланки інвертора напруги при нульовій напрузі порушується; запропоновані модифікації алгоритму розділеної комутації, що забезпечують широкий діапазон зміни струму навантаження (в обох напрямках) аж до холостого ходу зі збереженням сприятливих умов комутації;

9. Здобуті аналітичні вирази для тривалості неактивних комутаційних інтервалів для різних модифікацій перетворювачів з розділеною комутацією і визначені доцільні межі використання відповідних модифікацій алгоритмів;

Практична цінність отриманих результатів.

Практична цінність полягає в розвитку методу розділеної комутації, розробці алгоритмів керування силовими напівпровідниковими ключами та формулюванні практичних рекомендацій щодо побудови нереверсивних оборотних трансформаторних перетворювачів з розділеною комутацією, що дозволяють суттєво зменшити величину динамічних втрат у ключах; в тому числі – рекомендацій щодо вибору величин ємності снаберних конденсаторів ланок інвертора напруги з *IGBT*, величини індуктивності розсіювання трансформатора. Для оборотних трансформаторних перетворювачів з розділеною комутацією в складі підсилюючого пункту живлення системи тягового електропостачання залізниці постійного струму на основі акумуляторної системи накопичення енергії, дана оцінка величини доцільної частоти перетворення, типів силових приладів, параметрів трансформатора і характеристик акумуляторної батареї – результати вказують на можливість розміщення обладнання безпосередньо на рухомому складі.

Цінність наукових і практичних результатів дисертації полягає також у їх використанні при розробці перетворювачів, зокрема, у фірмах *Ubik Solutions OÜ* та *Mikromasch Eesti OÜ*, Естонія, та в навчальному процесі кафедри промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” – в курсах «Джерела електроживлення», «Енергозбереження в системах електроживлення з напівпровідниковими перетворювачами», «Силові напівпровідникові прилади» для студентів спеціалізації 171.01 – «Промислова електроніка».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій дисертації, їх достовірність

підтверджується виконанням досліджень із застосуванням відомих аналітичних та числових методів, коректними припущеннями та постановкою завдань, збігом теоретичних розробок та результатів комп’ютерного і фізичного моделювання, підтверджується впровадженням розробок, опублікуванням результатів роботи та їх обговоренням на наукових конференціях.

Оцінка змісту дисертації та її завершеності.

Дисертаційна робота є завершеною працею, що складається із анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 196 найменувань на 27 сторінках та трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 341 сторінку, у тому числі 281 сторінок основного тексту, 124 рисунка і 14 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, показано зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, викладено наукову новизну, практичне значення результатів досліджень та реалізацію отриманих результатів дисертації, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію результатів роботи і публікації.

Перший розділ дисертації присвячено аналізу відомих особливостей процесів комутації силових напівпровідникових ключів. Відзначається, що існують декілька різновидів комутації і для зменшення динамічних втрат у ключах необхідно використовувати природну або м'яку комутацію. В результаті аналізу літературних джерел виявлено, що оборотні перетворювачі постійного струму з функцією м'якої комутації представлені, в основному, перетворювачами з однорідними ланками на базі інверторів напруги з використанням *MOSFET* і технологією комутації при нульовій напрузі та ємнісного снаберного вимикання ключів. Для потужних та високовольтних перетворювачів з *IGBT* зазначається, що ряд проблем, що виникають при використанні примусового вимикання *IGBT*, наприклад – наявність "хвоста" струму і, отже, підвищені втрати примусового вимикання, можуть у значній мірі подолані при використанні комутації при нульовому струмі. Для здійснення комутації при нульовому струмі використовуються або резонансні схеми або ланки на основі інвертора струму. Зазначається, що в роботі розглядаються дволанкові перетворювачі з розділеною комутацією, з неоднорідними ланками – одна з ланок є інвертором напруги, інша ланка – інвертор струму. Показані функціональні переваги перетворювачів цього класу. Перетворювачі постійного струму з неоднорідними ланками не є поширеним класом перетворювачів і представлені, в основному, необоротними пристроями.

Розглянуто суть алгоритму синхронного керування ключами обох ланок перетворювача постійного струму з неоднорідними ланками – розділеної комутації. Можна бачити, що для силових ключів даного перетворювача мають місце сприятливі умови комутації: вимикання ключів ланки інвертора напруги примусове м'яке снаберне, вмикання – природне при нульовій напрузі; для ключів ланки інвертора струму вмикання примусове м'яке снаберне, вимикання – природне при нульовому струмі; снабери – бездисипативні.

Показана необхідність розвитку методу розділеної комутації стосовно до нереверсивних дволанкових трансформаторних перетворювачів постійної напруги, що дозволить вирішувати задачі покращення показників таких перетворювачів.

Другий розділ присвячено розвитку методу розділеної комутації, що спрямовано на подолання ряду недоліків базового алгоритму, розробку алгоритмів для забезпечення роботи в оберненому режимі перетворювача зі зменшенням циркуляції енергії та ін. Враховано вплив комутації ключів інвертора струму при заміні тиристорів на *IGBT* зі зворотною блокуючою здібністю та отримано основні співвідношення для перетворювача за схемою напівмостовий інвертор напруги – мостовий інвертор струму. Розглянуто особливості снаберного вимикання *IGBT* та проаналізовано роботу перетворювача при зворотному напрямку передачі енергії. Теоретичні розрахунки підтверджуються результатами комп'ютерного та фізичного моделювання. На підставі аналізу особливостей снаберного вимикання *IGBT* сформульовані рекомендації щодо структури дволанкових перетворювачів, та вибору величини ємності снабера. Наведено принцип оцінки величини «критичної частоти» оберненого перетворювача з розділеною комутацією (вперше введено). Це така частота перемикаць, вище якої сумарні статичні і динамічні втрати снаберного вимикання *IGBT* інвертора напруги будуть перевищувати статичні втрати ключів

інвертора струму. В розділі проаналізовано електромагнітні процеси в чотирьох схемах перетворювачів, які відповідають структурній схемі інвертор напруги – інвертор струму, але мають модифікації схеми для використання для високовольтних або навпаки, низьковольтних застосувань. Встановлено, що використання розділеної комутації в модифікованих схемах забезпечує збереження м'якої та природньої комутації ключів перетворювача. Для перетворювача для фотовольтаїки (з ключами на базі *MOSFET*, тобто для низьковольтних застосувань), для зменшення статичних втрат у ключах низьковольтної ланки інвертора струму пропонується заміна послідовних діодів на *MOSFET*. Аналізується ефективність двох різновидів алгоритму – при синхронному та незалежному керуванні *MOSFET* ланки інвертора струму, виявлені недоліки та переваги. Зазначається, що заміна послідовних діодів на *MOSFET* перетворює ключі цієї ланки на чотрьох-квADRантні, і перетворювач набуває нової якості - властивості нереверсивності.

У третьому розділі дисертації проводиться розвиток методу розділеної комутації з метою забезпечення нереверсивності перетворювачів з одночасним збереженням їх оборотності та м'якої комутації керованих ключів при застосуванні *IGBT*. Пропонуються п'ять схемних рішень з використанням чотирьох-квADRантних ключів із зменшеною, у порівнянні з традиційним рішенням, кількістю *IGBT* у ланці інвертора струму. Дослідження електромагнітних процесів, що протікають в елементах перетворювачів, дозволило описати новий вид комутації ключа ланки, який виявлено у перетворювачі з розділеною комутацією з асиметричною схемою інвертора струму – примусове вмикання при нульовій напрузі, при якому має місце стрибкоподібне зростання струму ключа без істотних комутаційних втрат. Теоретичні уявлення підтверджуються результатами комп'ютерного та фізичного моделювання. У розділі проведено порівняння показників ефективності перетворювачів з розділеною комутацією з чотирьох-квADRантними ключами в силовому комутаторі ланки інвертора струму. Обрана для подальшого аналізу схема перетворювача з мостовою схемою комутатора ланки інвертора струму на шунтованих зворотними діодами *IGBT* та додатковим чотирьох-квADRантним ключем, встановленим послідовно з обмоткою трансформатора., а також з асиметричною топологією ланки інвертора струму. Ці рішення відрізняє можливість використання у ланці інвертора струму стандартних *IGBT* модулів з зворотними діодами, зменшення кількості модулів до 6 (замість 8 у традиційному рішенні) та, для останнього – зменшення числа ключів, що одночасно проводять струм у ланці інвертора струму (з 4 до 3).

У четвертому розділі дисертації розглядаються практичні аспекти застосування методу розділеної комутації. Відзначається важлива роль індуктивності розсіяння трансформатора при здійсненні снаберної комутації та обмеженні швидкості спаду струму при вимиканні діода у контурі комутації, формулюються вимоги до її величини. Отримано аналітичні залежності, які визначають величину індуктивності розсіяння трансформатора з осердям П-подібної конструкції у функції величини ширини стрижня, інших (відносних) геометричних розмірів трансформатора, питомих втрат матеріалу осердя, перегріву. Показано, що теоретичні результати і результати математичного моделювання полів розсіяння мають добрий збіг.

Розглянуто особливості використання снаберних конденсаторів силових ключів ланки інвертора напруги. Пропонується, для оцінки величини необхідної ємності снабера для забезпечення приблизно двократного зниження втрат вимикання *IGBT*, використання емпіричного підходу, наведено відповідні дані. Встановлено обмеження, що викликані впливом величини струму навантаження та струму намагнічування трансформатора на процес комутації. Для перетворювача як із симетричною, так і з асиметричною топологією ланки інвертора струму пропонується проста модифікація базового алгоритму, яка для режиму передачі енергії від ланки інвертора струму до ланки інвертора напруги забезпечує наявність м'якої комутації ключів ланки інвертора напруги при малих струмах – аж до холостого ходу. Наведено приклад використання перетворювача з розділеною комутацією в якості узгоджувального перетворювача батарейних систем накопичення енергії у системі електроживлення залізниці постійного струму потужністю біля 700 кВт. Показана можливість, при застосуванні *IGBT*-модулів класу 6,5 кВ у ланці інвертора струму та класу 1,2 кВ у ланці інвертора напруги, забезпечити масу системи на рівні до 22 т, що дозволяє розташувати її на борту потяга.

У загальних висновках дисертації автор викладає отримані ним найважливіші наукові та прикладні результати і рекомендації щодо їх використання. Висновки до дисертаційної роботи містять десять пунктів, які поетапно деталізують отримані результати та доцільність їх використання.

У додатках наведено вихідні дані до розрахунку величини «критичних» частот перетворення для *IGBT* провідних виробників, акти впровадження та використання результатів роботи., а також перелік публікацій за темою дисертації та відомості про апобацію.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях.

Наукові результати дисертації відображено в 30 наукових працях, в тому числі в 17 публікаціях, що входять до переліку наукових фахових видань України, з яких 1 стаття у виданнях, включених до міжнародних науко-метричних баз (МНМБ) *SCOPUS*, 9 публікацій у виданнях, включених до МНМБ *SCOPUS*, 3 патенти та 1 тези доповідей науково-технічних конференцій. Публікації повністю відображають зміст дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких вітчизняних та міжнародних конференціях: «Силовая електроніка та енергоефективність» (2010, 2011, Алушта; 2014, 2016, Одеса; 2017 – 2019, Харків); *IEEE International Conference on Industrial technology (ICIT'2012)*, Athens, Greece; III Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи» (2013, Мукачєво); *IEEE International Conference (IECON) – 38-th Conference on IEEE Industrial Electronics Society (2012 Montreal, Canada)*; *16-th Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)* (2014, Lappeenranta, Finland); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки» (2014, Київ); «Проблеми автомати-зорованного електропривода. Теория и практика» (2015, Харків); *56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (2015, Riga,

Latvia); IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON) (2017, Kyiv); IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (2018, Kyiv); IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2018, Kharkiv); 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (2019, Lviv); I International Scientific and Technological Conference “Modern problems of power engineering and ways of solving them” 07-(2019, Tbilisi, Georgia).

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації є повним за змістом, висновкам і рекомендаціям.

Використання в докторській дисертації наукових положень, на основі яких захищено кандидатську дисертацію не виявлено.

Результати досліджень, представлених у кандидатській дисертації здобувача, яка захищена у 1989 році за спеціальністю 05.09.12 – електричні та напівпровідникові перетворювачі, в даній роботі не використовуються і на захист не виносяться.

Оформлення дисертації.

Дисертація та автореферат написані українською мовою. Стиль викладу матеріалів відповідає загальноприйнятому і має високий науково-професійний рівень. Оформлення дисертації та автореферату відповідає чинним вимогам.

Зауваження по дисертаційній роботі:

1. На стор. 48 (рисунок 1.3 -1, а) наведено схему напівмостового інвертора з розділеною комутацією, але відомо, що при роботі таких інверторів, якщо не застосовувати додаткові заходи, внаслідок накопичення несиметрії напруги, прикладеного до трансформатора, його сердечник рано чи пізно «входить» в насичення, що призводить до істотного збільшення його струму намагнічування. Щоб цього уникнути, в схему послідовно з трансформатором вводять «розділений конденсатор», який прибирає постійну складову на трансформаторі. Тому неясно, як ця проблема вирішується в запропонованій схемотехніці?

2. На стор.48 наведено часові діаграми струму і напруги первинної обмотки напівмостового інвертора з розділеною комутацією в усталеному режимі. Але первинна обмотка його трансформатора має індуктивність намагнічування, у вторинному ланцюзі є дросель, тому форма струму первинної обмотки трансформатора повинна бути не строго горизонтальною, як зазначено на рис 1.3 -1,б, а мати нахили, які викликані цими індуктивностями. Тому це потребує роз'яснення.

3. Поряд з детальним розглядом алгоритмів керування перетворювачами, автор не приділив достатньої уваги аналізу динамічних властивостей дволанкового перетворювача, процесам взаємодії систем керування інверторами напруги та струму в перехідних режимах, можливому впливу перехідних режимів на забезпечення м'якої та природної комутації ключів.

4. Із даних, наведених на стор. 212 дисертації та на стор. 23, 3-й абзац автореферату, можна зробити висновок, що для низьковольтних *IGBT* класу 1,2 кВ питома ємність снабера вимикання складе біля 0,5 нФ/А і можна було б очікувати, що для дослідженого у розділах 4.2.4 та 4.3 узгоджувального перетворювача батарейних систем накопичення енергії для струму комутації 1300 А ємність снаберних конденсаторів у ланці інвертора напруги складе величину біля 0,65 мкФ, тоді як дані табл. 4.3 дисертації свідчать, що для симуляції процесів прийнята величина ємності 3 мкФ. Ця розбіжність потребує пояснення.

5. Положення, що зменшення швидкості спаду струму діода, що вимикається, у контурі комутації ключів ланки інвертора струму при примусовому вмиканні транзистора цієї ланки приводить до пропорційного зменшення комутаційних втрат (на цьому положенні базується оцінка необхідної величини індуктивності розсіювання трансформатора для того, щоб цими втратами можна нехтувати у порівнянні з статичними), потребує додаткового обґрунтування, а також бажано – експериментального підтвердження.

6. Розрахунок узгоджувального перетворювача батарейної системи накопичення енергії у розділі 4.3 робиться для напруги акумуляторної батареї 600 В, тоді як значення цей напруги може змінюватися. Треба уточнити, як на характеристики системи впливає зміна значення напруги акумуляторної батареї.

7. В дисертації та авторефераті присутні неточності редакційного характеру. Наприклад, на стор. 25 автореферату можна прочитати «МОСФЕТ» замість «*MOSFET*»; на стор. 27 автореферату – «УТ П-подібної конструкції» замість «УТ з осердям П-подібної конструкції»; у висновках автореферату (п. 9) вказано, що «для ключів ланки ІН комутаційні втрати (складають) 7% від статичних» (стор. 31), а в дисертації – відповідна оцінка – 10% (стор. 260, вираз (4.3-13)), та ін.

Наявні зауваження не стосуються її принципових положень, результатів і висновків, тому не знижують наукової цінності дисертації і не впливають на її загальну позитивну оцінку.

Висновок.

Дисертація Івахна В.В. «Нереверсивні дволанкові перетворювачі постійної напруги з розділеною комутацією» виконана на високому науковому рівні, її

відзначає логічність, чіткість і обґрунтованість доказів, завершеність поставлених мети та задач дослідження.

Дисертаційна робота В.В. Івахна є закінченою науковою працею, в якій отримано нові обґрунтовані результати щодо вирішення актуальної і важливої науково-прикладної проблеми – розвитку методу розділеної комутації, принципів побудови та створення дволанкових оборотних неререверсивних перетворювачів постійної напруги з неоднорідними ланками з м'якою комутацією керованих ключів, що приводить до зменшення динамічних втрат силових ключів таких перетворювачів.

Дисертаційна робота Івахна В.В. за змістом, одержаними науковими результатами та їх втіленню на практиці відповідає пп. 10,12 і 14 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо докторських дисертацій, який затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. №567 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 656 від 19.08.2015р., та паспорту спеціальності 05.09.12 - напівпровідникові перетворювачі електроенергії, а її автор **Івахно Володимир Вікторович** цілком заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за зазначеною спеціальністю.

Офіційний опонент

доктор техн. наук, ст. наук. співр.,
головний науковий співробітник
відділу стабілізації параметрів
електромагнітної енергії
Інституту електродинаміки
Національної академії наук України
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки

В.О. Новський

