

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Тугая Дмитра Васильовича "Енергоефективність інтелектуальних систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії", подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

**Актуальність теми дисертаційного дослідження.** У галузі електроенергетики відбувається активне впровадження «інтелектуальних мереж» SmartGrid, реалізація яких спрямована на забезпечення надійності та енергоефективності електропостачання та підвищення якості електричної енергії. Існуючі методи визначення енергоефективності таких систем електропостачання SmartGrid найчастіше не пов'язані зі способами управління напівпровідниковими перетворювачами. Однак такий зв'язок існує, найбільш яскравим прикладом цього є управління силовими активними фільтрами (САФ). В роботі Тугая Д.В. на базі розвитку сучасних теорій потужності для напівпровідникових перетворювачів пропонується метод оцінки енергозберігаючого ефекту в трифазних системах електропостачання з двоспрямованим енергетичним потоком електроенергії, та системи керування напівпровідниковими перетворювачами, таким чином, вирішується актуальна науково-прикладна проблема підвищення енергетичної ефективності.

Актуальність теми дисертації підтверджується тим, що дослідження проводились у відповідності до держбюджетної НДР МОН України «Підвищення енергоефективності систем розподіленої генерації електроенергії з нетрадиційними і відновлювальними джерелами» (№ ДР 0116U003911), госпдоговірних робіт: «Дослідження процесів в освітлювальних установках адміністративних будівель та розробка наукових основ їх енергомодернізації з урахуванням впливу освітлювальних установок на оточуюче середовище, особливостей їх конструкцій та умов експлуатації» (№ ДР 0113U007464), «Порівняльний аналіз технічних характеристик систем електроприводів з багаторівневими інверторами і інверторами струму потужністю 8000 kW, напругою 10 kV» (НПП «ЕОС», м. Харків), науково-дослідної роботи згідно з технічним завданням Управління паливно-енергетичного комплексу Харківської обласної адміністрації «Зниження затрат електроенергії, обумовлених низькою якістю електроенергії в системах електропостачання» (ВАТ НДІ «ВЕЛТ», м. Харків) та ініціативної науково-дослідної роботи, виконаної відповідно протоколу № 78/42-2009 про співробітництво НТУ «ХП» з КП «Харківський метрополітен» (м. Харків).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі Тугая Д.В. достатньо обґрунтовані:

– застосуванням сучасних методів досліджень, в тому числі теорії миттєвих активної і реактивної потужностей, перетворення просторових декартових систем координат, теорії просторових векторів, методів рішення систем диференційних і алгебраїчних рівнянь; теорії електричних кіл.

– проведеним математичним моделюванням з використанням пакетів прикладних програм для перевірки отриманих теоретичних результатів.

Наведені в дисертаційній роботі теоретичні обґрунтування та експериментальні дослідження виконані коректно на високому науковому рівні. Висновки, які сформульовані в дисертаційній роботі, містять нові наукові положення щодо підвищення енергоефективності інтелектуальних систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії.

Наукові положення, висновки та рекомендації достатньо обґрунтовані та базуються на сучасній теорії потужностей, яка суттєво розширена автором.

**Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Достовірність отриманих результатів, наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується використанням методів теорії електричних кіл, а також відомих сучасних положень теорії потужностей, підтвердженням адекватності запропонованих підходів комп'ютерним моделюванням.

**Наукова новизна результатів дослідження** полягає у наступному:

– розроблено нові методики розрахунку індуктивності фазних реакторів паралельного САФ та активного випрямляча, які враховують низькочастотну і високочастотну складові електромагнітних процесів та дозволяють підвищити точність вибору елементів;

– доведено, що для підвищення точності розрахунку модуля вектора реактивної потужності, необхідно враховувати миттєві значення фазних напруг на затискачах джерела живлення;

– вперше сформульовано і доведено теорему про мінімум втрат енергії в трифазних систем електроживлення (СЕ) та отримано розрахункове співвідношення для сумарної потужності втрат;

– вперше встановлено зв'язок між коефіцієнтами несиметрії струмів за зворотною, нульовою послідовностями і складовими сумарної потужності втрат, вираженими в  $pqr$ -координатах.

**Практичне значення отриманих результатів** для напівпровідникової техніки, електротехніки і електроенергетики полягає у наступному:

– розроблено методики вибору індуктивності фазних реакторів САФ та створення багатообмотувального фазозсувного трансформатора для каскадного багаторівневого інвертора напруги, які можуть використовуватися при проектуванні і виготовленні реальних систем електропостачання;

– сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження САФ;

– запропоновано спосіб вимірювання складових сумарної потужності втрат електроенергії в трифазній системі електропостачання та прилад для його реалізації, (патент України № u201604952);

– виконано порівняння п'яти систем електропостачання рухомого складу метрополітену за показниками енергетичної ефективності і сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження цих систем. Результати впроваджено в КП «Харківський метрополітен» (м. Харків);

– розроблено комп'ютерну Matlab-модель САФ, яка використана при виробництві станції управління занурювальним електровідцентровим насосом з частотним перетворювачем АК06 в ООВ НВО «Вертикаль» (м. Харків);

– результати дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес на кафедрі теоретичної та загальної електротехніки ХНУМГ ім. О.М. Бекетова та кафедрі промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХП».

**Повнота викладу результатів дослідження в опублікованих працях.** Матеріали дисертації відображені у 33 наукових публікаціях, у тому числі 29 статей у наукових фахових виданнях, з них 12 публікацій у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз РІНЦ та Index Copernicus: [10, 11, 15, 17, 19, 23- 29, див. автореферат], 6 публікацій, що входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS [2, 16, 18, 20, 32, 33, див. автореферат], 1 патент на корисну модель, 3 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Отримані результати наукових досліджень пройшли достатню апробацію на 15 міжнародних наукових конференціях і 5 семінарах НАН України.

Наукові праці в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист.

Автореферат цілком відповідає меті, основному змісту та висновкам дисертації. Він характеризує ступінь новизни і практичної цінності досліджень, які проведені здобувачем, і показує особистий внесок здобувача у вирішення проблеми, що поставлена у роботі.

Автореферат і дисертація не містять відомостей, що відображені в кандидатській дисертації.

**Аналіз змісту дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 261 найменувань і 3 додатків на 411 сторінках. Основна частина дисертації надрукована на 280 сторінках, в тому числі 75 рисунків та 37 таблиць за текстом.

**Вступ** містить загальні положення дисертаційної роботи, відповідно вимогам: актуальність теми, мету і задачі наукового дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наукову новизну і практичне значення результатів досліджень.

**Перший розділ** присвячений аналізу розвитку енергетики Smart Grid. Показано, що зменшення втрат енергії в системі електропостачання може бути досягнене за рахунок: компенсації миттєвої реактивної потужності і пульсацій миттєвої активної потужності; використання енергоємних накопичувачів енергії, переходу від однофазних мереж і споживачів до трифазних. Проведено аналіз нормативних документів, що дозволило визначити основні напрями застосування силової електроніки у Smart Grid.

Запропоновано трирівневу ієрархічну структуру – пристрої для систем гнучкою передачі енергії на змінному струмі, пристрої для передачі енергії постійним струмом на високій та середній напрузі і пристрої для розподіленої генерації і накопичувачів електричної енергії. Проведено аналіз існуючих систем накопичення енергії.

Доведено, що подальший напрямок підвищення енергоефективності трифазних СЕ пов'язаний з розвитком положень сучасної теорії потужностей.

**У другому розділі** розвинуто методи розрахунку параметрів елементів силової схеми і характеристик енергоефективності енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів SmartGrid: 1) силового активного фільтра, 2) активного випрямляча – джерела напруги (АВДН), 3) перетворювальних систем частотно-регульованого електроприводу на базі автономного інвертора струму з відсікаючими діодами (АІС-ВД) та багаторівневого каскадного інвертора напруги (БРІПЧ), 4) перетворювачів постійної напруги в постійну ППНП. Перетворювач *першого типу* САФ є одним з пристроїв, за допомогою яких можна зменшити рівень емісії вищих гармонік мережевого струму, тому увага, яка приділена цьому пристрою з метою підвищити енергоефективність, цілком доречна. Заслугою автора є те, що він довів існування оптимального значення індуктивності вхідних реакторів та навів методику їх обчислення та вибору. Для перетворювача *другого типу* АВДН запропоновано узагальнену методику вибору індуктивності фазних реакторів, що враховує низькочастотну і високочастотну складові електромагнітних процесів в силовій схемі зі змінною та постійною частотою ШІМ. Показано області застосування обох типів активних випрямлячів. Для перетворювачів *третього типу* за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab виконано співставлення двох систем. Показано, що ККД обох систем електроприводу практично однакові. Значення коефіцієнтів нелінійних спотворень вихідних струмів нижче у схемі на базі багаторівневого інвертора. Для перетворювачів *четвертого типу* ППНП, а саме чотиритактного підвищуючого широтно-імпульсного перетворювача постійної напруги в постійну, визначено можливі межі зміни струму і напруги при роботі в режимі відбору максимальної енергії від сонячної електростанції. Відзначено, що при збільшенні паралельно включених сонячних модулів досягається збільшення меж регулювання вихідного струму ППНП, що дозволяє електростанції працювати при більш низьких рівнях освітленості.

**Третій розділ** присвячений розвитку теорії миттєвих активної і реактивної потужностей, зокрема в ньому наведено систематизацію взаємних перетворень просторових координатних систем, доведена теорема про мінімум втрат енергії в трифазних системах електропостачання, отримано співвідношення для максимально можливого ККД трифазної СЕ трьох варіантів спрямованості енергетичного потоку. Визначено загальну кількість варіантів виникнення втрат у трифазній СЕ. У дев'яти з 288 варіантів втрати

енергії в системі електропостачання будуть мінімально можливими і однозначно визначатися у відповідності до теореми про мінімум потужності втрат в трифазній СЕ. Показано можливість збільшення ККД систем електропостачання за рахунок використання САФ з накопичувачем енергії для компенсації змінної складової миттєвої активної потужності одночасно з компенсацією миттєвої реактивної потужності на 10-15%.

**У четвертому розділі** встановлено зв'язок між втратами електричної енергії в системі електропостачання і характером енергообміну. Автор справедливо обґрунтував причини виникнення додаткових втрат у трифазній СЕ як-то: 1) пульсації графіка миттєвої активної потужності і наявність в трифазній СЕ миттєвої реактивної потужності та 2) наявність струму в нульовому проводі. Запропоновано наближену розрахункову формулу для визначення сумарної потужності втрат як суми чотирьох складових та уточнене співвідношення з додатковою п'ятою складовою, що враховує взаємний вплив електромагнітних процесів в лінійних проводах і нульовому проводі трифазної СЕ.

**У п'ятому розділі** запропоновано метод визначення показників енергетичної ефективності СЕ з двоспрямованим енергетичним потоком, який заснований на використанні понять потоку енергії і втрат енергії. Метод проілюстровано при порівнянні п'яти СЕ метрополітену.

**В шостому розділі** результати попередніх розділів перевірені за допомогою комп'ютерних моделей, що були створені у середовищі Matlab.

#### **Рекомендації щодо використання результатів дослідження.**

Висновки та рекомендації, які містяться у дисертації, а також розроблені автором методи, розрахункові методики вибору параметрів елементів силових схем паралельного силового активного фільтра та активного випрямляча, математичні та комп'ютерні моделі можуть бути рекомендовані для практичної реалізації:

– в організаціях, що проектують та впроваджують сучасні енергоефективні перетворювальні системи та вимірювальні комплекси, наприклад, ВО «Перетворювальна техніка» (м. Запоріжжя), НПП «ЕОС» (м. Харків), ООВ НВО «Вертикаль» (м. Харків), «Київобленерго», «Харківобленерго»;

– державних та комунальних електротранспортних підприємства (ПАТ «Українська залізниця», КП «Київський метрополітен», КП «Харківський метрополітен», КП «Дніпропетровський метрополітен»);

– у вищих навчальних закладах України при підготовці фахівців з електротехнічних та електронних спеціальностей: Національному технічному університеті України «КПІ» імені Ігоря Сікорського, Національному технічному університеті «ХПІ», Вінницькому національному технічному університеті, Національному гірничому університеті, Донецькому національному технічному університеті, Національному університеті «Львівська політехніка», Кременчуцькому національному університеті імені

Михайла Остроградського, Чернігівському національному технологічному університеті.

**Дискусійні положення та зауваження до дисертації наступні:**

1. Мета сформульована занадто узагальнено, як розвиток теорії для оцінки енергозберігаючого ефекту. Тому наукові задачі не випливають із мети. На справді в роботі розглядається значно ширше коло питань, які не відображені у меті.
  2. Для оцінки енергозберігаючого ефекту пропонуються наступні показники - ККД в прямому і зворотному потоці, сумарний ККД, коефіцієнт повернення енергії. Між тим в роботі не проілюстровано переваги запропонованих показників енергетичної ефективності СЕ перед традиційним показником сумарним ККД, наприклад при виборі СЕ метрополітену (розділ 5) фактично використовувався критерій ККД.
  3. Пункти наукової новизни 5 «вперше ... введено термін «період повторюваності» та 7 «...запропоновано визначення терміну «реактивна потужність» декларують введення нових термінів, що, на мій погляд, недостатньо для новизни.
  4. Під загально визначеним терміном «реактивна потужність» в роботі розуміється поняття «швидкість обміну енергії», що веде к неоднозначності поняття реактивної потужності.
  5. Другий пункт висновків по першому розділу не доведений в матеріалі розділу
  6. Матеріал по механічним, електрохімічним накопичувачам енергії та табл. 1.9 може бути віднесений до Додатків без втрати якості викладення матеріалу.
  7. Не зрозумілий сенс наведення в роботі математичної моделі сонячного елемента, яка містить відомі формули (стор 142) і потім не використовується в роботі
  8. Не вказано, які дані в табл 1.1. теоретичні, а які експериментальні. Було б бажано навести розрахункові формули для теоретичних даних таблиці
  9. На мій погляд матеріал шостого розділу стосовно комп'ютерних моделей силового активного фільтра активного випрямляча – джерела напруги, багаторівневого інвертора та чотиритактного підвищуючого перетворювача доцільно привести при їх описі у відповідних розділах, а в шостому розділі приділити увагу моделюванню СЕ в цілому.
10. Наявні незначні зауваження:
- використовуються однакові терміни для різних понять: АІС для двох різних понять (стор. 8) СЕ – система електропостачання або сонячний елемент (стор. 138);
  - Не розшифровано позначення  $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}, i_a, i_b, i_c$  в формулі (1.5) (стор. 27). Розшифровка наведено лише на стор. 82. Не розшифровано також  $i_{ca*}, i_{cb*}, i_{cc*}$ , (стор. 93); В авторефераті не розшифровані

позначення ППНП на стор. 6, НЕ – на стор 8, в дисертації не розшифровано позначення АМ (стор. 130) МУПЧ (стор. 126), ППНП (стор. 136)

- На рис. 2.2. і 2.3 напівпровідникові елементи позначається як Т1-Т6, D1-D6, а на рис. 2.2 і в тексті ( стор. 92) як VT1-VT6, VD1-VD6
- На рис. 5.3 наведено позначення в абсолютних величинах, а при опису рисунку фігурують відносні величини
- Значення КІ в табл. не відповідає формулі 1.7. (стор. 28 )
- Наявні граматичні помилки (стор. 34, 81, 137, 170) в дисертації.

**Висновок про відповідність дисертації вимогам.** Зазначені недоліки не знижують загальної позитивної оцінки дисертації, виконаної на високому науковому рівні і оформленої згідно з вимогами. Дисертація Тугая Д.В. за змістом, обсягом та оформленням повністю відповідає спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи, за якою вона представлена до захисту.

Оцінюючи дисертаційну роботу Тугая Д.В. в цілому, слід зазначити, що вона є завершеною працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують науково-прикладну проблему – підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання засобами силової електроніки.

На основі викладеного вище вважаю, що дисертаційна робота «Енергоефективність інтелектуальних систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії" відповідає вимогам п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Тугай Дмитро Васильович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Офіційний опонент,  
професор кафедри промислової електроніки  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського»,  
доктор технічних наук, професор

Підпис Терещенко Т.О. засвідчую:



Вчений секретар НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
кандидат філософських наук, доцент

Мельниченко А.А.

