

ВІДГУК

офіційного опонента
на дисертаційну роботу ТУГАЯ ДМИТРА ВАСИЛЬОВИЧА
«Енергоефективність інтелектуальних систем електропостачання
з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії»,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Актуальність теми дисертації, її зв'язок з державними науковими програмами. Існуюча інфраструктура електричних мереж не дозволяє ефективно використовувати поновлювані джерела електроенергії, впроваджувати енергоефективне обладнання, підтримувати розподілених споживачів зі змінним навантаженням і при цьому гарантувати кінцевим споживачам електроенергії заданої якості. Поява і розвиток концепції «Smart Grid» припускає накладення на існуючу систему виробництва, передачі та споживання електроенергії ще однієї системи - інформаційної, що забезпечує появу нових, раніше відсутніх якостей і функцій і є природним етапом еволюції електроенергетичної системи. Перегляд ряду існуючих базових принципів модернізації галузі, а також характер і масштаби завдань обумовлюють вирішення довгострокових задач, що відображені у багатьох національних планах розвитку енергетичної галузі передових індустріально розвинених країн. Зрозуміло, що значні інфраструктурні зміни потребуватимуть інвестицій, окупність яких не в останню чергу залежатиме від рівня зниження втрат енергії при впровадженні нової концепції.

Підвищення енергоефективності системи електропостачання (СЕ) – це комплексна проблема, розв'язання якої потребує реалізації багатьох технічних та організаційних заходів. Одним з можливих шляхів підвищення енергетичної ефективності системи електропостачання є використання сучасних електромагнітно сумісних з мережею живлення напівпровідникових перетворювальних систем. В структурі Smart Grid напівпровідникові перетворювачі одночасно з їх основним функціональним призначенням конфігурують мережу у відповідності до поточних потреб, перерозподіляючи потоки енергії між її елементами.

Значна кількість сучасних промислових і комунальних об'єктів електропостачання мають у своїй структурі електротехнічне обладнання, що відноситься до лінійних активно-реактивних споживачів або до споживачів з нелінійними енергетичними характеристиками. Характер навантаження спричиняє появу додаткових складових в кривих трифазних струмів, що погіршують якість електропостачання і обумовлюють додаткові втрати в з'єднувальних кабелях і елементах системи. В несиметричних режимах трифазної мережі виникають пульсації потоку енергії, що також обумовлюють додаткові втрати. Усунення вказаних негативних явищ можливе за рахунок використання фільтро-компенсуючих пристроїв, наприклад, паралельного силового активного фільтру (ПАФ), що в структурі системи управління реалізує алгоритми, синтезовані на основі сучасних теорій потужності. Незважаючи на розроблені в останні роки

чисельні стратегії управління ПАФ, зв'язку складових миттєвої потужності, а також інтегральних складових повної потужності з потужністю втрат в трифазній системі електропостачання не приділяється належної уваги. Зазначений недолік вказує на неповноту сучасної теорії потужності, що потребує її подальшого розвитку і перегляду загальних уявлень про енергетичні процеси, що відбуваються в трифазній системі електропостачання. В умовах впровадження нової концепції Smart Grid і оцінки ефективності цього впровадження необхідно створення єдиного системного підходу до вимірювання, обліку та компенсації складових потужності втрат, що розраховуються за складовими миттєвої потужності, прийнятими у відповідній теорії.

Таким чином, розвиток сучасних теорій потужності для стратегій управління енергозберігаючими напівпровідниковими перетворювачами, що використовуються в інтелектуальних системах електропостачання є актуальною науково-прикладною проблемою, яка визначила напрям досліджень дисертаційної роботи.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується тим, що вона виконувалась у відповідності до пріоритетних напрямів розвитку національної електроенергетики, в тому числі у вирішенні задач впровадження концепції Smart Grid, та узгоджуються з «Енергетичною стратегією України на період до 2030 року», «Державною цільовою економічною програмою енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2016 роки», «Національним планом дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 року». Результати дослідження було використано в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України «Підвищення енергоефективності систем розподіленої генерації електроенергії з нетрадиційними і відновлювальними джерелами» № ДР 0116U003911; при виконанні 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 з Мінрегіонбуд (м. Київ), «Порівняльний аналіз технічних характеристик систем електроприводів з багаторівневими інверторами і інверторами струму потужністю 8000 kW, напругою 10 kV» з 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» (КП «Харківський метрополітен, м. Харків), в яких здобувач був відповідним виконавцем.

Зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 411 сторінок, з них: 149 рисунків, 58 таблиць, списку використаних джерел із 261 найменувань.

Обсяг і структура дисертації відповідає вимогам, які висуваються до докторських дисертацій.

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, наведено дані про апробацію результатів роботи і публікації.

В першому розділі проаналізовано основні вимоги до формування концепції розвитку енергетики Smart Grid. Відзначено, що однією з ключових задач для її реалізації є зменшення втрат енергії в системі електропостачання. Визначено роль напівпровідникових перетворювачів електроенергії у вирішенні питання підвищення енергоефективності СЕ з двоспрямованим енергетичним потоком. Проведено аналіз нормативних документів, що розробляють провідні міжнародні організації зі стандартизації, що дозволило виокремити основні напрями для застосування засобів силової електроніки щодо впровадження концепції Smart Grid. Запропоновано трирівневу ієрархічну структуру, що визначає три основних напрями застосування напівпровідникових перетворювачів в рамках реалізації повномасштабних Smart Grid проектів. Проведено аналіз існуючих систем накопичення енергії для визначення потенційних можливостей їх застосування в Smart Grid.

У другому розділі вдосконалено методи розрахунку параметрів енергоефективних напівпровідникових перетворювачів, таких як, паралельний силовий активний фільтр, активний випрямляч – джерело напруги, перетворювач частоти на базі багаторівневого каскадного інвертора напруги.

Розроблено концепцію, що дозволяє підвищити точність методів вибору індуктивності фазних реакторів ПАФ, яка заснована на врахуванні як низькочастотної так і високочастотної складових електромагнітних процесів в силовій схемі. Запропоновано узагальнену концепцію вибору індуктивності фазних реакторів активного випрямляча – джерела напруги, що враховує низькочастотну і високочастотну складові електромагнітних процесів в силовій схемі при гістерезисній системі управління і системі управління з постійною частотою ШІМ. Роз'яснено умови, за яких кожна з систем управління буде найбільш ефективною.

За допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab виконано співставлення двох перетворювальних систем частотно-регульованого електроприводу потужністю 8 МВА: з перетворювачем частоти на базі автономного інвертора струму з відсікаючими діодами та з перетворювачем частоти на базі 13-рівневого каскадного інвертора напруги, при дослідженні роботи систем електроприводу в широкому діапазоні зміни вихідної частоти.

В третьому розділі наведено систематизацію взаємних перетворень просторових координатних систем, визначено умови за яких трифазна СЕ працює з мінімально можливими втратами енергії; надано формулювання теореми, що обумовлює мінімум потужності втрат, визначається кількість можливих режимів роботи трифазної СЕ з двоспрямованим енергетичним потоком, в яких виникають додаткові втрати; запропоновано розрахункові методи оцінки енергетичної ефективності від компенсації реактивної потужності і пульсацій миттєвої активної потужності завдяки використанню в СЕ САФ з енергоємним накопичувачем енергії в ланці постійного струму, сформульовано умови, за яких зазначені заходи мають економічну обґрунтованість.

В четвертому розділі рахунок розвитку положень сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужностей розглядаються питання представлення сумарної потужності втрат у вигляді її окремих складових, кожна з яких фізично обумовлена особливістю електромагнітних процесів, що відбуваються в трифазній СЕ. Одержано наближене розрахункове співвідношення, що відповідає зазначеній умові. Доведено можливість представлення сумарної потужності втрат через математичний апарат р-q-r теорій потужності, а також можливість здійснення переходу від однієї системи складових потужності втрат, наприклад в rqr координатах, до будь якої іншої системи складових потужності втрат, а також можливість зворотного переходу. Встановлено математичний зв'язок між коефіцієнтами несиметрії струмів зворотної та нульової послідовності із складовими потужності втрат в rqr координатах.

В п'ятому розділі розроблено новий метод оцінки енергоефективності системи електропостачання, заснований на поняттях «потік енергії» та «втрати енергії». За допомогою цього методу розраховано показники енергоефективності п'яти систем електропостачання рухомого складу метрополітену: традиційної, з односпрямованим енергетичним потоком; з рекуперацією потенційної енергії рухомого складу у мережу; з стаціонарним накопичувачем енергії, що встановлюється на території тягової підстанції; з бортовим накопичувачем енергії; безконтактну. За допомогою розробленого методу розраховано показники енергетичної ефективності локальної Smart Grid, що живиться від магістральної ділянки лінії. Показало резерв підвищення ККД системи електропостачання від 3 до 12%.

Шостий розділ роботи присвячений підтвердженню отриманих в попередніх розділах теоретичних результатів засобами імітаційного моделювання в середовищі Matlab. Для виконання умови незмінності середньої корисної потужності навантаження при розрахунку сумарної потужності втрат за її складовими було створено математичну модель, що описує роботу трифазної СЕ з ПАФ, яка реалізує два способи представлення енергетичних процесів в багатофазних симетричних або асиметричних системах з полігармонічними напругами і струмами, перший заснований на векторній, а другий на матричній формі їх запису. Було створено Matlab-моделі: паралельного силового активного фільтра, що працює в СЕ з нелінійним навантаженням; активного випрямляча; частотно-регульованого електроприводу змінного струму номінальною потужністю 8 МВт на основі 13-рівневого каскадного інвертора напруги та асинхронного двигуна; системи електропостачання локального об'єкта, що включає в себе сонячну електростанцію, чотиритактний підвищуючий широтно-імпульсний перетворювач постійної напруги в постійну і активне навантаження; для дослідження систем електропостачання рухомого складу метрополітену. Результати імітаційного моделювання підтвердили коректність отриманих в роботі теоретичних положень.

У загальних висновках сформульовані основні результати дослідження, які дозволили оцінити вклад в розвиток теорій потужності, для оцінки енергозберігаючого ефекту від застосування в інтелектуальних СЕ напівпровідникових перетворювачів електроенергії.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в роботі було розвинуто положення сучасної теорій потужності, і зроблено перехід від складових миттєвої потужності, що локалізуються системою управління паралельним активним фільтром, до складових потужності втрат, кожна з яких надає інформацію про характер енергетичних процесів в трифазній системі електропостачання.

До основних наукових результатів можна віднести:

– вперше запропоновано концепцію мінімізації втрат в трифазних СЕ і сформульовано теорему про мінімум втрат енергії, згідно якої потужність мінімально можливих втрат енергії, або максимально можливий ККД, однозначно визначаються відношенням потужності резистивного короткого замикання на затискачах навантаження до корисної потужності, що дорівнює середньому значенню активної потужності навантаження, обчисленому в періоді повторюваності;

– вперше отримано розрахункове співвідношення і запропоновано систему складових сумарної потужності втрат, кожна з яких відповідає особливостям електромагнітних процесів в трифазній СЕ, а саме: мінімально можлива потужність втрат при постійній швидкості передачі енергії від джерела до навантаження; потужність втрат, обумовлена наявністю енергообміну між фазами навантаження (або навантаженням і джерелом) трифазної СЕ; потужність втрат, обумовлена зміною середньої швидкості передачі енергії від джерела до навантаження; потужність втрат, обумовлена протіканням струму в нульовому проводі;

– вперше обґрунтовано зв'язок між складовими сумарної потужності втрат запропонованої системи і складовими потужності втрат, розрахованими за осями просторової декартової системи координат pqr .

Окрім того слід відзначити положення наукової новизни, що відноситься до вдосконалення методів розрахунку енергоефективних напівпровідникових перетворювачів: вперше запропоновано концепцію вибору індуктивності фазних реакторів паралельного САФ, що враховує як низькочастотну, так і високочастотну складові електромагнітних процесів в силовій схемі, що на відміну від існуючих способів розрахунку дозволяє підвищити точність вибору індуктивності за можливої зміни параметрів навантаження і мережі живлення.

Цінність для науки і практики результатів роботи полягає в створенні способу вимірювання складових потужності втрат в трифазній системі електропостачання, що для розрахунків використовує вимірювальну інформацію з датчиків струму і напруги системи управління активним компенсатором. Запропонований спосіб покладено в основу приладу для вимірювання цих складових. Прилад може використовуватись як у складі багатofункціонального лічильника електроенергії з додатковими функціональними можливостями, так і для визначення оптимального, щодо мінімізації потужності втрат в системі електропостачання, місця установки ПАФ або, взагалі, про доцільність його застосування.

В другому розділі роботи розроблено методику вибору індуктивності вхідних реакторів активного фільтра, що враховує поточне значення індуктивності навантаження та мережі живлення. Методика може використовуватись для

створення адаптивної системи управління САФ, що забезпечує задане значення THD мережевого струму.

Розроблено модель системи електропостачання з ПАФ для забезпечення електромагнітної сумісності частотно-регульованого асинхронного електроприводу при жорстких умовах показників якості електроенергії, за яких коефіцієнти нелінійних спотворень мережевого струму і напруги не перевищують 5%. Результати моделювання використані при виробництві станції управління занурювальним електровідцентровим насосом з частотним перетворювачем АК06 в ООВ НВО «Вертикаль» (м. Харків).

Теоретичні результати дисертаційного дослідження, а також результати моделювання використано у навчальному процесі на кафедрі теоретичної та загальної електротехніки ХНУМГ ім. О.М. Бекетова та кафедрі промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХП».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю постановки мети і задач дисертаційного дослідження, використанням як загально признаних фундаментальних методів: теорії електричних кіл, теорії просторових векторів, елементи матричного числення і векторного аналізу так і сучасних методів, що формують математичний апарат теорії миттєвої активної і реактивної потужності. Нові концепції і методи, запропоновані в дисертаційній роботі, обґрунтовані чіткими математичними викладками і підтверджені співставленням результатів чисельних розрахунків з результатами імітаційного моделювання, що отримані в програмному середовищі, яке відповідає умові високого ступеню деталізації енергетичних процесів. Результати співставлення, винесені в додаток А дисертаційної роботи, нараховують декілька сотень віртуальних експериментів, які підтверджують достовірність теоретичних висновків. Зроблені дисертантом припущення для спрощення аналізу при отриманні розрахункових співвідношення для сумарної потужності втрат через її складові, 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.

Достовірність результатів досліджень підтверджується високою точністю збігу теоретичних напрацювань з результатами моделювання та експериментальними даними, а також апробацією результатів на п'ятнадцяти наукових конференціях та семінарах, впровадженням розроблених алгоритмів керування та методик обчислення параметрів і характеристик у виробництво на ООВ НВО «Вертикаль» (м. Харків), НПП «ЕОС» (м. Харків), ДП «НДІ ХЕМЗ» (м. Харків), КП «Харківський метрополітен».

Повнота викладення основних положень дисертації в наукових працях. За темою дисертації опубліковано 33 праці: 29 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 12 статей, що включені до міжнародних наукометричних баз (6 – у виданнях, які входять до науко метричної бази SCOPUS), 3 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 1 патент на корисну модель.

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

Результати роботи доповідались і обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях: «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Алушта, 2005-2013 р.р.; м. Одеса, 2016 р.); «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2006, 2008, 2010, 2014, 2016 р.р.); Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (м. Ерлагол, Алтай, Російська Федерація, 2009); «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Харків, 2015 р.); IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (м. Київ, 2014, 2016 р.р.); а також на наукових семінарах НАН України «Силова і біомедична електроніка» (м. Харків, НТУ «ХП», 2010, 2012, 2015, 2016 р.р.); «Динаміка нелінійних електромеханічних систем» (м. Харків, НТУ «ХП», 2017 р.).

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації. Положення, винесені в автореферат дисертації, ідентичні основним положенням дисертаційної роботи. За своєю структурою та змістом автореферат відповідає вимогам, що ставляться МОН України до авторефератів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук.

Зв'язок докторської дисертації з кандидатською. Наукові положення, результати і висновки, що виносились на захист кандидатської дисертації, яка була присвячена напівпровідниковим перетворювальним системам для розподілених електростанцій, що забезпечують гарантоване електропостачання відповідального навантаження, не виносяться на захист докторської дисертації.

Зміст дисертації відповідає спеціальності 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». Якість оформлення дисертації добра.

Зауваження по дисертаційній роботі:

1. Питаннями аналізу енергетичних процесів при формуванні положень теорії потужності займалися багато відомих вчених. Наприклад, проф. Маєвський О.А., який розробив теорію повної потужності вентильних перетворювачів і інтегральні методи дослідження енергетичних процесів в електричних колах з вентильними перетворювачами. Відповідно до цієї теорії фізична трактовка реактивної потужності кола як міри швидкості зміни її миттєвого опору застосовувана як до лінійних так і до нелінійних електричних кіл. В дисертаційній роботі надається інша трактовка фізичного змісту реактивної потужності без співставлення з раніше відомими результатами.

2. Методика розрахунку індуктивності фазних реакторів САФ, як і алгоритм, передбачає послідовність дій на основі відомих правил, законів і т.д. Методика має практичне значення, але не може трактуватися як наукова новизна.

3. Енергозберігаючий ефект при застосуванні паралельного активного фільтра досягається якщо втрати в силовому компенсаторі менші рівня зниження втрат в системі електропостачання. В роботі не вистачає експериментальних даних, що дозволяють оцінити реальні межі енергозберігаючого ефекту від застосування енергоефективних алгоритмів управління ПАФ.

4. Не ясно, в частині чого складається розвиток методу «розрахунку індуктивності фазних реакторів активного випрямляча», який би його доповнював і поширював на клас задач.

5. Аналітичне співвідношення для розрахунку сумарної потужності втрат в трифазній системі електропостачання через складові потужності втрат, є коректним за дотримання необхідної умови про сталість середньої корисної потужності $P_{usf} = \text{const}$. Реальна система електропостачання, характеризується динамічними графіками електричних навантажень, період зміни яких може визначатися, як хвилинними так і секундними інтервалами.

6. Отримані в третьому розділі дисертації результати щодо оцінки енергозберігаючого ефекту від компенсації пульсацій миттєвої активної потужності і миттєвої реактивної потужності дійсні для умов трифазної симетричної системи електропостачання, доцільним було б оцінити вплив асиметрії фазних напруг мережі живлення на рівень збільшення втрат в системі електропостачання.

7. Результати щодо можливого енергозбереження засобами активної фільтрації отримані в дисертації для стаціонарних режимів роботи. В Smart Grid системі електропостачання має місце двоспрямований потік енергії при різкій зміні параметрів фазних навантажень, що повинно викликати перехідний процес зміни струмів ПАФ. Довільний закон підключення навантажень призведе до того, що система буде перебувати в перехідних режимах. Неочевидно, що в такому випадку буде мати місце ефект енергозбереження.

8. Висновок про доцільність вимірювання миттєвих значень фазних напруг для розрахунку модуля вектора реактивної потужності, є очевидним. Науковою новизною може бути, наприклад, незакономірне явище, висновок щодо якого є парадоксальним.

9. Введення нових термінів не варто кваліфікувати як наукову новизну. Науковою новизною можна було б вважати ідеї, явища, покладені в основу терміна, якщо вони носять принциповий характер і не є очевидними.

10. Останнім часом широко використовуються САФ системами керування на основі нейронних мереж, які забезпечують більш високу швидкодію і точність у багатьох випадках. Доцільно було б розглянути енергоефективність систем електропостачання з САФ, що мають подібні системами керування.

11. Установка накопичувача енергії на борту рухомого складу призводить не тільки до збільшення маси останнього, а ще до зменшення пасажиромісткості. Тому не зовсім коректним є оцінювання показників енергоефективності системи електропостачання метрополітену з бортовим накопичувачем енергії без врахування перерахованих факторів.

12. Не зрозумілим є низьке значення сумарного коефіцієнту корисної дії традиційної систем електропостачання метрополітену, що представлені у табл. 5.1.

13. В роботі зустрічаються недбалості оформлення, наприклад, рис. 3.4, рис.4.8, рис. 4.11 дещо повторюють один одного. Підрозділ 4.1.4 слід було б об'єднати з підрозділом 3.2 щоб позбутися повторюваності матеріалу.

Відзначені зауваження і недоліки не позначаються на загальній високій оцінці дисертаційної роботи. Високий науковий рівень і доскональне знання специфіки проблеми – одна з основних особливостей дисертаційної роботи, що представляється до захисту. Д.В. Тугай відомий широкому колу фахівців своїми публікаціями по проблематиці дисертаційної роботи.

Висновок. Дисертаційна робота Тугай Дмитра Васильовича «Енергоефективність інтелектуальних систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії» представляє собою самостійно підготовлену завершену науково-дослідну працю, в якій розв'язано важливу науково-прикладну проблему, що полягає в розвитку положень сучасної теорії потужності для створення енергоефективних алгоритмів керування напівпровідниковими перетворювачами, що використовуються в інтелектуальних системах електропостачання. Актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, новизна та повнота викладу в опублікованих працях повністю відповідають вимогам до докторських дисертацій. Дисертаційна робота за своїм змістом та напрямом досліджень відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 року, щодо докторських дисертацій, а її автор Тугай Дмитро Васильович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
директор інституту автоматики
та електроніки
Національного університету
кораблебудування
імені адмірала Макарова

Г.В. Павлов

Підпис Павлова Г.В. засвідчує
Вчений секретар НУК
імені адмірала Макарова



С.А. Уткіна