

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Тугая Дмитра Васильовича
на тему «**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 обраної теми. Розвиток елементної бази силової електроніки, збільшення кількості малих електростанцій на базі відновлюваних джерел енергії та поява нових типів енергоємних накопичувачів, змінили організацію систем генерації, передачі і розподілу електричної енергії і стали основою появи Smart Grid концепції – повністю інтегрованої, саморегулюючої і самовідновлювальної електроенергетичної системи, що має мережеву топологію і включає в себе генеруючі джерела, магістральні, розподільні мережі і споживачів електричної енергії, що керуються єдиною інформаційною системою в режимі реального часу. При організації Smart Grid концепції необхідний перегляд старих ієрархічних принципів електропостачання, при яких централізована електроенергетична система працює з односпрямованим енергетичним потоком, а кінцевий споживач є пасивним учасником енергетичного ринку.

Існуючі стратегії і способи управління енергозберігаючими напівпровідниковими перетворювачами пов'язані з положеннями сучасних теорій активної і реактивної потужності, що оперують з узагальненими просторовими векторами напруг і струмів трифазної системи. Існуючі методи розрахунку втрат енергії в системах електропостачання найчастіше не пов'язані зі способами управління напівпровідниковими перетворювачами, що здатні зменшити втрати енергії.

Тому дисертаційна робота, яка присвячена розвитку сучасних теорій потужності для енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів, що використовуються в інтелектуальних системах електропостачання є актуальною науково-прикладною проблемою, яка визначила напрям дисертаційного дослідження.

Актуальність та перспективність дисертаційної роботи підтверджується і тим, що наукові дослідження проводилися на кафедрі теоретичної та загальної електротехніки в Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи 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. Хрків) та ініціативної науково-дослідної роботи, виконаної відповідно протоколу

№ 78/42-2009 про співробітництво НТУ «ХП» з КП «Харківський метрополітен» (КП «Харківський метрополітен, м. Харків). При виконанні цих робіт здобувач був відповідальним виконавцем окремих розділів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Тугая Дмитра Васильовича є високою й базується на аналізі літературних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні і критичному аналізі отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників, і якісному формулюванні отриманих висновків. Теоретичні дослідження виконано з використанням фундаментальних положень теорії електричних кіл, сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужностей, теорії просторових векторів, елементів матричного числення і векторного аналізу, математичного моделювання в прикладних програмних пакетах.

Отримані результати перевірені шляхом критичних переходів одержаних формул до відомих раніше результатів, що підтверджує обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі результатів дослідження.

Достовірність результатів досліджень. Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур теорії миттєвих активної і реактивної потужностей, відповідністю змісту математичних моделей фізичній суті описуваних об'єктів. Отримані результати, висновки і рекомендації логічно і математично аргументовані. Достовірність забезпечується коректною математичною постановкою проблеми обґрунтування і узагальнення положень сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужностей для оцінки енергозберігаючого ефекту від використання в трифазних системах електропостачання з двоспрямованим енергетичним потоком напівпровідникових перетворювачів електроенергії.

Усі методи, що запропоновані в дисертаційній роботі обґрунтовані строгими математичними викладками і підтверджуються результатами чисельних експериментів на ЕОМ.

Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджується задовільним співпаданням даних, які отримані шляхом експериментальних досліджень розроблених методів та алгоритмів на математичних моделях.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- 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 запропоновано концепцію і розроблено метод 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;

– 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 rqr . Також встановлено зв'язок між коефіцієнтами несиметрії струмів за зворотною, за нульовою послідовностями і складовими сумарної потужності втрат, вираженими в rqr координатах і доведено можливість переходу із одної системи складових сумарної потужності втрат до будь-якої іншої системи складових сумарної потужності втрат.

– дістали подальший розвиток положення сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужностей, у відповідності до яких запропоновано визначення терміну «реактивна потужність», під якою розуміється розрахункова величина, що визначає швидкість обміну енергією між фазами навантаження або навантаженням і джерелом трифазної СЕ без впливу на передачу основного потоку енергії, відношення квадрата середньоквадратичного значення якої до квадрату корисної потужності, помножене на величину мінімально можливої потужності втрат, дорівнює однієї зі складових потужності додаткових втрат в СЕ;

– дістали подальшого розвитку методи розрахунку індуктивності фазних реакторів активного випрямляча. Запропоновано узагальнену концепцію вибору індуктивності фазних реакторів АВ для складних динамічних режимів роботи випрямляча, що враховує низькочастотну і високочастотну складові електромагнітних процесів в силовій схемі і, на відміну від існуючої концепції, передбачає зміну релейної системи управління на систему управління з постійною ШІМ, що обирається системою автоматичного регулювання в залежності від стану СЕ;

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання полягає у розроблених інженерних методиках синтезу автоматизованої системи управління рухомим складом:

– розроблено методику вибору індуктивності фазних реакторів САФ, що враховує параметри навантаження і мережі живлення і може використовуватися при проектуванні і виготовленні силових активних фільтрів для реальних об'єктів електропостачання;

– розроблено методику створення багатообмотувального фазозсувного трансформатора для каскадного багаторівневого інвертора напруги, що дозволяє моделювати багатообмотувальні трансформатори за будь-якої кількості інверторних комірок. Результати впроваджено в НПП «ЕОС»;

– використання розрахункового універсального співвідношення для визначення складових сумарної потужності втрат дозволило оцінити ступінь підвищення енергоефективності трифазної системи електропостачання в будь-якому з 288 можливих варіантів і сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження в СЕ САФ;

– запропоновано спосіб вимірювання складових сумарної потужності втрат електроенергії в трифазній системі електропостачання і прилад для його реалізації, що використовують вимірювальну інформацію з датчиків струму і напруги системи управління САФ (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, що працює в системі з частотно-регульованим електроприводом при жорстких умовах показників якості електроенергії в точці підключення і дозволяє забезпечити значення коефіцієнтів нелінійних спотворень мережевого струму і напруги, що не перевищують 5%. Результати моделювання використані при виробництві станції управління занурювальним електровідцентровим насосом з частотним перетворювачем АК06 в ООВ НВО «Вертикаль» (м. Харків);

– створення імітаційних Matlab-моделей енергозберігаючих перетворювачів (паралельного силового активного фільтра, активного випрямляча, перетворювача частоти на базі багаторівневого каскадного інвертора напруги, чотиритактного підвищуючого ШІМ перетворювача постійної напруги в постійну в системі з сонячною батареєю), а також універсальної комп'ютерної моделі трифазної СЕ з САФ дозволило впровадити результати дисертаційних досліджень в навчальний процес на кафедрі теоретичної та загальної електротехніки ХНУМГ ім. О.М. Бекетова та кафедрі промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХП».

Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях та апробація роботи. Результати дисертаційної роботи досить повно відображені у 33 наукових публікаціях, з них 29 статей у наукових фахових виданнях України (12 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, 6 – у Scopus), 3 – у матеріалах доповідей міжнародних науково-технічних конференцій, 1 патент України.

Основні результати роботи доповідались та 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 Федерация, 2009); «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Харків, 2015 р.); IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (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.).

Зв'язок докторської дисертації з кандидатською. Положення, наукові результати та висновки, що виносились на захист кандидатської дисертації, не виносяться на захист докторської дисертації.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Задача мінімізації потужності втрат, що ставиться у роботі, як одна з основних задач дослідження, відноситься до оптимізаційних задач, яка потребує застосування локального методу параметричної оптимізації. Розв'язання екстремальної за-

дачі для параметрів, що визначають енергетичні характеристики трифазної системи електропостачання, може бути використано для розробки оптимальної стратегії управління паралельним силовим активним фільтром. Результати 3 та 4 розділів дисертації не дають уявлення щодо методів оптимізації, а також яку саме стратегію слід застосовувати для синтезу системи управління силовим компенсатором.

2. Теорема Гевеніна справедлива для лінійних електричних кіл, що складаються з комбінації джерел напруги, джерел струму та імпедансу. Еквівалентна схема трифазної системи електропостачання, яка наведена на рис. 3.4, не може бути віднесена до лінійних, тому залишається незрозумілим принцип її отримання.

3. Сформульована в третьому розділі «теорема про мінімум потужності втрат енергії в трифазній системі електропостачання» має однозначне математичне вираження. Натомість математичне доведення теореми в роботі відсутнє. При доведенні теореми доцільно було б скористатись одним із загально відомих формальних методів.

4. Для врахування тривалих за періодичністю енергетичних процесів в трифазній системі електропостачання введено поняття «період повторюваності», під яким розуміється найменший відрізок часу, в який вкладається ціле число періодів повторюваності кривих струмів, напруги, активної та реактивної потужності. Проте всі чисельні розрахунки складових потужності втрат (у тому числі результати яких наведено у додатку А), що виносяться в якості прикладів, усереднюються в періоді напруги мережі живлення.

5. За результатами підрозділу 4.3 автор робить висновок, що отримані співвідношення (4.90), (4.94), (4.97), не зважаючи на їх точність, незручні для практичного застосування. Рівняння (4.117), отримане в наступному підрозділі, що по суті замінює їх, позбавлене вказаного недоліку. Тому незрозумілою є доцільність підрозділу 4.3.

6. Результати комп'ютерного моделювання Matlab-моделі доцільно було б доповнити результатами експериментальних досліджень на стенді, або діючому обладнанні, що додатково підтвердило б достовірність та ефективність розробленого методу підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання засобами силової електроніки.

7. Незрозумілим є фізичний зміст коефіцієнта оптимального ослаблення нульової послідовності σ_0 , що використовується у співвідношенні (4.134).

8. У вступі дисертаційної роботи науково-прикладна проблема сформульована як «...розвиток сучасної теорії потужності для енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів, що використовуються в інтелектуальних системах електропостачання», але у першому розділі дисертації не наведено аналіз теорій потужності і практично не висвітлено сучасний стан з цього питання. Це ускладнює розуміння які саме аспекти теорії потужності потребують розвитку, що важливо при виборі напрямку дослідження.

9. У кінці розділу 1 на основі проведеного аналізу відсутня у явній формі постановка мети та задач дослідження.

10. Визначення місця вимірювання миттєвих значень фазних напруг для точного розрахунку модуля вектора реактивної потужності не є науковою новизною, а лише практичною реалізацією запропонованого способу визначення потужності втрат, обумовленої наявністю в системі реактивної потужності.

11. Підрозділ 2.4, що присвячений дослідженню характеристик чотиритактного підвищуючого імпульсного DC/DC перетворювача напруги для сонячної електростанції, доцільно було б перенести у перший розділ роботи зважаючи на описовий характер цього підрозділу.

12. Доцільно б було привести у додатку А результати розрахунку складових потужності втрат для режимів роботи трифазної системи електропостачання, що функціонує за принципами Smart Grid, із забезпеченням двостороннього потоку енергії.

Висновок. Дисертаційна робота Тугая Дмитра Васильовича на тему «Енергоєфективність інтелектуальних систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії», за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Вона є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-прикладну проблему підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання засобами силової електроніки.

В дисертації отримані науково обґрунтовані результати подальшого розвитку сучасної теорії миттєвих активної і реактивної потужностей для розробки методів розрахунку потужності втрат в трифазній системі електропостачання, що функціонує за принципами Smart Grid і містить енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі і накопичувачі енергії, здатні підтримувати в системі двоспрямований енергетичний потік.

Оформлення роботи відповідає вимогам, які пред'являються до докторських дисертацій, а автореферат повністю відображає основні положення дисертації. Зроблені зауваження принципово не знижують високого наукового і практичного рівня дисертаційної роботи, яка в повній мірі відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. щодо здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор **Тугай Дмитро Васильович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Зав. відділом проблем управління
магнітним полем Інституту технічних
проблем магнетизму
Національної академії наук України,
доктор технічних наук, професор


Б.І. Кузнецов

Підпис д.т.н., проф. Кузнецова Б.І.
Вчений секретар, к.т.н.




П.М. Добродеев