

67-72-93/2
18.09.18

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Мухи Миколи Йосифовича
«Динамічна компенсація реактивної потужності в
суднових автономних електроенергетичних системах»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Актуальність теми. Енергетична ефективність економіки України є одним із найважливіших питань національної безпеки країни. Це обумовлено тим, що Україна не тільки більше як на 40% залежить від імпорту паливних ресурсів (близько 67% газу, 57 % нафтопродуктів, більше 70% ядерного палива та значна частина вугілля), але й низьким рівнем диверсифікації постачання. Особливо залежною від імпорту первинних енергоносіїв є галузь генерування електричної енергії, на долю якої припадає вагома частина первинних паливних ресурсів.

За такої критичної залежності від імпорту енергоносіїв економіка України є однією з найбільш енергоємних в Європі, поступаючись за цим показником Німеччині у 4 рази, Польщі в 2,5 разу та навіть Росії.

Починаючи з 1997 року в Україні було прийнято значну кількість програм енергозбереження, постанов та розпоряджень Кабінету Міністрів, що стосуються проблеми енергоефективності. За цей період було досягнуто прогресу в енергозбереженні за рахунок регулювання енергоринку та тарифної політики, підвищення ефективності обліку енергії та інших напрямів організації функціонування споживачів. При цьому в секторі «генерування – споживання електричної енергії» потенціал підвищення енергетичної ефективності використано лише незначною мірою.

Специфіка підвищення енергетичної ефективності у цьому секторі полягає в значній економії первинних паливних ресурсів за рахунок зниження електроспоживання. Результатом підвищення енергетичної ефективності завжди є зниження негативного впливу на навколишнє середовище, підвищення конкурентоздатності та покращення соціальних стандартів.

Вимога щодо обов'язковості отримання суднами нового міжнародного свідоцтва про енергоефективність, щоб судно могло здійснювати рейси в іноземні порти або до морських платформ, що знаходяться під юрисдикцією іноземної держави, встановлює нові правила управління енергоефективністю судна і шляхи до зниження енергоспоживання на водному транспорті.

Одним із шляхів підвищення енергоефективності експлуатації суден та зниження енергоспоживання є розробка раціональних методів керування електричною енергією. При виробництві, розподіленні, перетворенні та використанні електричної енергії у судновій автономній електроенергетичній системі виникають небажані втрати. Крім того суднові споживачі електроенергії в основному мають активно-індуктивний характер, тобто повний струм генераторів, трансформаторів та кабельних ліній повинен бути збільшений по

відношенню до необхідного активного струму навантаження на величину, обернено пропорційну значенню коефіцієнта потужності, що пропорційно збільшує встановлену потужність електрообладнання і перетин кабельних з'єднань. Тому генеруючі установки повинні забезпечити додаткові реактивні потужності, що в свою чергу знижує їх ефективність роботи через перевитрату палива приводних двигунів.

Саме тому дисертаційна робота М. Й. Мухи, яка присвячена розвитку теорії динамічної компенсації реактивної потужності в автономних суднових електроенергетичних системах (СЕЕС), є актуальною та своєчасною.

Дисертаційні дослідження виконані згідно з концептуальними положеннями Міжнародної конвенції по запобіганню забрудненню з суден та відповідають пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «енергетика та енергоефективність», визначеному Законом України 2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», відповідають рішенням Ради національної безпеки і оборони України «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави», та розпорядженню КМ України від 20 жовтня 2010 року за № 2174 «Про схвалення Транспортної стратегії України на період до 2020 року».

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планами науково-дослідних робіт кафедри суднової електромеханіки і електротехніки Національного університету «Одеська морська академія»: «Розробка високоефективних систем управління судновим допоміжним холодильним і компресорно-насосним обладнанням засобами автоматизованого електроприводу» (номер держреєстрації 0109U001532), «Моніторинг, діагностика та управління процесами та обладнанням суднових енергетичних установок» (номер держреєстрації 0113U000637), «Підвищення ефективності роботи суднових електроенергетичних та електромеханічних систем» (номер держреєстрації 0116U002392), у яких автор дисертаційної роботи був науковим керівником.

Наукова новизна роботи полягає у

- розвитку теорії генерації, передачі та перетворення електричної енергії в суднових автономних електроенергетичних системах у частині підвищення їх енергетичної ефективності шляхом динамічної компенсації реактивної потужності у функції зміни реактивної провідності навантаження, що на відміну від відомого керування у функції реактивного струму чи реактивної потужності дало змогу у перехідних режимах комутації навантаження підвищити швидкість та точність процесу компенсації реактивної потужності та за рахунок цього зменшити втрати в досліджуваних системах;
- визначенні закону оптимального керування процесом компенсації реактивної потужності в режимах пуску асинхронного електропривода зі співвівмірною з генератором потужністю, що у порівнянні з його пуском без компенсації дає змогу суттєво зменшити величину струму автономного генератора та кінетичність на заключному етапі процесу пуску асинхронного двигуна;
- доведенні доцільності та високої ефективності двоканальної (канали керування реактивною потужністю і напругою генератора) системи керування компенсуючим пристроєм генераторної установки;

– розробці принципу оперативного вимірювання та розрахунку реактивної провідності навантаження в автономних суднових електроенергетичних системах, що дало змогу на основі неперервного контролю цього параметра у замкнених системах керування підвищити динамічну і статичну точність компенсації реактивної потужності та стабільність напруги автономної суднової електромережі;

– створенні оптимального інтегрального імпульсного закону компенсації реактивної провідності навантаження у кожний період змінного струму автономної суднової електроенергетичної системи у режимах комутації навантаження генератора, що у порівнянні з відомим усередненим законом дає змогу скоротити час відновлення напруги автономної мережі до 3-4 періодів зміни напруги.

Практична цінність і ефективність дисертаційної роботи для автономних судових електроенергетичних систем полягає в наступному.

Алгоритми динамічної компенсації реактивної потужності в пускових і робочих режимах асинхронних двигунів судових механізмів, методики конфігурування контролерів управління судновою електростанцією та компенсатором реактивної потужності для забезпечення необхідних динамічних характеристик, а також підвищення стійкості та надійності судових автономних електроенергетичних систем в типових експлуатаційних режимах роботи використовуються в «Інституті післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» у навчальному процесі для слухачів курсів підвищення кваліфікації і перевірки компетентності офіцерів машинної команди суден, які проводяться на обладнанні тренажерного комплексу, що підтверджено відповідним актом.

Наукові положення і висновки дисертації використані в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при підготовці магістрів та бакалаврів спеціальності 271 «Річковий та морський транспорт» зі спеціалізацій «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» та «Експлуатація судових енергетичних установок». Результати дисертаційних досліджень впроваджені у створеному в університеті повномасштабному тренажерному комплексі суднової автоматизованої електроенергетичної системи, який використовується для практичної підготовки та перевірки компетентностей майбутніх офіцерів машинної команди і виконання наукових досліджень в галузі експлуатації та автоматизації морських транспортних засобів, що також підтверджено відповідними актами.

Оригінальність технічних рішень, запропонованих в дисертації, захищена патентами України на винаходи № 112396 «Спосіб управління автономною електроенергетичною системою» та № 116656 «Спосіб управління автономною електроенергетичною системою та пристрій для його здійснення».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи обґрунтовані коректним використанням методів узагальненої теорії електромеханічних перетворювачів енергії, методів теорії автоматичного, в тому числі оптимального, керування для розробки і дослідження

систем динамічної компенсації реактивної потужності в автономних суднових електроенергетичних системах.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджена результатами математичного моделювання, актами впровадження результатів дисертаційної роботи, широким обсягом публікацій і апробацій матеріалів дисертації.

Повнота викладу результатів досліджень в опублікованих працях. Результати досліджень за темою дисертації викладені у 34 наукових публікаціях, серед яких 3 монографії, 20 статей у наукових фахових виданнях України (в тому числі 8 у виданнях, що включені до наукометричних баз), 3 – у періодичних іноземних виданнях (з них одне індексується у наукометричній базі Skopus), 2 патентах України на винаходи.

Наведений перелік публікацій, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації, у повному обсязі відображають отримані положення, наукові результати та висновки, свідчать про їх новизну.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Дисертація акуратно оформлена згідно з вимогами до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОНУ від 12.01.2017 року №40, і складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 226 найменувань на 23 сторінках, додатків на 71 сторінці. Загальний обсяг дисертації становить 403 сторінки, у тому числі 285 сторінок основного тексту.

Текст дисертації викладено переважно грамотною технічною мовою. Стиль викладання доказовий. В цілому дисертація є закінченою науковою роботою, яка відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації.

В дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук не виносяться на захист положення та наукові результати, які були захищені здобувачем у кандидатській дисертації.

У **вступі** дана загальна характеристика роботи, обґрунтована її актуальність, визначено об'єкт і предмет дослідження, представлена наукова новизна і практичне значення результатів, а також надані відомості про апробацію дисертаційної роботи.

У **першому** розділі виконано аналіз існуючих принципів, схем та установок компенсації реактивної потужності в автономних суднових енергосистемах, сформульовано задачі, пов'язані з необхідністю генерування реактивної потужності в автономних суднових електроенергетичних системах.

Другий розділ присвячено формулюванню проблематики та методів досліджень. Розглянуті особливості суднових електроенергетичних систем, що впливають на їх статичні характеристики та динамічні процеси, які необхідно враховувати при проектуванні та експлуатації, а саме швидкодіючі електромагнітні перехідні процеси в силових колах мережі, які обумовлюють відповідні зміни напруги та частоти генераторів при перемиканні споживачів, при

включенні на паралельну роботу та при коротких замиканнях, а короткі кабельні лінії силової суднової мережі не обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів в перехідних процесах.

Зазначено, що співставна потужність приводних двигунів і генераторів електроустановок, неоднаковий нахил навантажувальних характеристик приводних двигунів та різна швидкодія їх регуляторів, а також режими паралельної роботи генераторів з різнотипними приводними двигунами суттєво впливають на протікання процесів в автономних багатогенераторних електростанціях, робота генераторів на потужні електроприводи призводить до тяжких перехідних режимів з небезпекою знеструмлення електроенергетичної системи.

Розглянута узагальнена модель генератора змінного струму, яка базується на моделі узагальненої ідеалізованої електричної машини, яка описується рівняннями Парка-Горєва.

У **третьому** розділі зроблений аналіз вимірюваних величин з метою оптимального вибору координати, яка характеризує величину реактивної потужності навантаження для використання її в системі динамічної компенсації з урахуванням того, що в перехідних процесах при зміні навантаження координати реактивної потужності змінюються згідно з динамічними властивостями енергетичної системи.

Доведено, що затримка усередненого значення вимірюваної координати на один період і використання в якості регульованих координат реактивної провідності, реактивного струму або реактивної потужності несуттєво впливають на процеси регулювання напруги СГ.

У **четвертому** розділі досліджено закони керування синхронною генераторною установкою (СГУ) з компенсацією реактивної потужності навантаження, що розглядались як дві взаємопов'язані системи: стабілізації напруги СГ та компенсації реактивної потужності навантаження.

Порівняння законів керування та вибір їх оптимальних параметрів здійснено шляхом їх поступового ускладнення.

В якості базової системи, яка задовольняє висунутим до неї вимогам для судових генераторів, обрана оптимальна система автоматичної стабілізації напруги СГУ з ПП – регулятором без компенсації реактивної потужності. Далі базова схема регулювання СГ була доповнена аналоговим контуром компенсації реактивної потужності.

Порівняння динамічних властивостей синхронних генераторних установок з компенсацією реактивної потужності показало, що найкращі властивості має система з мінімальним періодом дискретності та UI - законом керування.

П'ятий розділ присвячено дослідженню процесів компенсації реактивної потужності в режимах прямого пуску асинхронних двигунів (АД) від автономних судових електростанцій співвимірної потужності.

Дослідження системи «синхронний дизель-генератор – асинхронний двигун» на розробленій комп'ютерній моделі показали, що зміна провідності АД під час пуску крім ступінчастої складової має гармонійну складову. Коливання провідності на початку пуску, які пов'язані із загасанням полів розсіювання в асинхронній машині, а період коливань дорівнює періоду обертання поля, мають

частоту, рівну частоті змінного струму, спадають за експоненціальним законом за 7...10 періодів і досить точно описуються гармонійною затухаючою функцією.

Шостий розділ присвячений регулюванню напруги асинхронного генератора (АГ) шляхом керування реактивною потужністю збудження його статорного кола. Спільність способів керування напругою АГ та реактивною потужністю електроустановок шляхом зміни ємнісного струму навантаження, який протікає в одному і тому ж колі, обумовили доцільність використання однакових законів керування. АГ розглянуто як багатозв'язаний об'єкт керування напругою і частотою генерованого струму.

Оптимізація структури та налагоджувальних параметрів регулятора напруги АГ за швидкодією, яка проведена аналітично та шляхом моделювання перехідних процесів, підтвердила, що найкращим для АГ є імпульсний інтегральний регулятор. Пропорційний імпульсний регулятор не забезпечує необхідної точності стабілізації напруги, а збільшення коефіцієнта підсилення призводить до коливальності, а потім до нестійкості системи.

У **сьомому** розділі виконана оцінка ефективності систем керування напругою СЕЕС, до складу якої входить компенсатор реактивної потужності, зроблений порівняльний аналіз процесів комутації навантаження дизель-генераторних установок з СГ та АГ. Для порівняння різних параметрів регуляторів та структур між собою проаналізовано критерії якості їх роботи, які враховують тривалість перехідного процесу, величину відхилення напруги в статиці і динаміці при комутації навантаження або зміні частоти обертання приводного двигуна. Розв'язана задача параметричної оптимізації цифрового регулятора напруги АГ.

Доведено, що застосування в суднових АЕЕС конденсаторних установок динамічної компенсації реактивної потужності навантаження відкриває можливість збільшення швидкодії каналу регулювання напруги для СГ установок шляхом регулювання реактивного струму статорного кола та спрощує впровадження АГ установок, які мають конструктивні, енергетичні, економічні переваги, завдяки яким можуть бути в майбутньому основними джерелами електроенергії на судах.

Недоліки та зауваження по роботі.

1. В розділі 2.2 дисертації та на стор. 3 автореферату в «методах досліджень» слід було б конкретно розкрити для вирішення яких завдань чи процедур використовувались ті або інші методи.

2. В чому полягає ефективність судової електроенергетичної системи, яким чином вона буде визначатись в контексті указанного на стор. 28 «...коефіцієнта енергоефективності конструкції судна, що представляє собою визначену розрахунковим шляхом величину і вказує обсяг викиду судном двоокису вуглецю у відношенні до обсягу перевезеного вантажу (в грамах на тономілю)...» та як змінюються її складові у разі застосування динамічної компенсації реактивної потужності навантаження електростанції?

3. Одночасне використання двох керуючих впливів (рис.1.15) передбачає узгоджену роботу регуляторів збудження та ємності. В чому полягає «узгодженість» такої роботи?

4. Не зрозуміло при якому початковому навантаженні синхронного генератора оцінювалась швидкодія системи регулювання напруги на рис. 1.18 (крива 4).

5. На стор.147 помилково стверджується, що «...миттєве значення i_p буде дорівнювати: $i_p = I_m \sin(\pi - \varphi) = -I_m \sin \varphi \dots$ », тому що $\sin(\pi - \varphi)$ не дорівнює $-\sin \varphi$.

6. На стор. 157 не розкрито значення функціоналу I_{Du} у виразі (4.8).

7. Потребує пояснення метод оптимізації системи керування синхронним генератором з компенсацією реактивної потужності за критерієм (4.8) та чотирма варіативними параметрами.

8. На стор. 165 стверджується, що виконане порівняння динамічних властивостей синхронної генераторної установки з компенсацією реактивної потужності показало, що UI закон керування можна рекомендувати як оптимальний, а чому не УПІ?

9. При аналізі аналогових законів керування в системах компенсації реактивної потужності під час пуску асинхронного двигуна (розділ 5.2) враховувалася інерційність виконавчого пристрою T_p , що пропонувалось при використанні силових конденсаторних або дросельних установок з неперервно змінними ємностями або індуктивностями. Проте, які саме виконавчі пристрої автор використав для реалізації дискретного компенсатора з імпульсними законами регулювання (розділ 5.3), в тексті дисертації не сказано.

10. На стор. 274 дисертантом використано комплексний інтегральний критерій оптимальності. Оскільки він об'єднує декілька окремих показників, то виникає питання забезпечення їх збалансованості, наприклад, на основі застосування вагових коефіцієнтів, значення яких можуть визначатися різними методами. Проблема ще більше загострюється в разі спроби об'єднати в інтегральний критерій різнорідні показники. Дане важливе питання не знайшов належного відображення в роботі.

11. Не можна погодитись із автором, який на стор. 188 стверджує, що «...пусковий момент зменшується з 3 до 2 в.о., а час розгону електродвигуна скорочується з 1,9 до 1,7 с.». Мова може йти про максимальний пусковий момент.

12. На стор.214 сказано: «...стала часу регулятора повинна бути більше п'ятдесяти періодів квантування $T_p > 50T_0$, рис. 5.13.», але на цьому рисунку зображена структурна схема без позначення сталих часу та періодів квантування.

13. Висновок 3 до розділу 5: « Використання пропорційного закону регулювання дозволяє у $K_{II} + 1$ разів зменшити реактивну провідність мережі в квазісталому режимі» є загальновідомим.

14. На стор. 287 автор стверджує, що: «Генераторна установка з оптимальними налагоджувальними параметрами регулятора збудження

асинхронного генератора робить її практично інваріантною до навантаження.». Система з динамічним провалом напруги 20-30% (рис. 7.6) не може вважатися інваріантною.

15. Різні масштаби на рис. 7.7, 7.8 та 7.9 7.10 ускладнюють визначення переваг асинхронної генераторної установки перед синхронною.

16. Підрозділ 2.4 не стосується теми дисертації та може бути вилученим із неї.

17. В дисертації використовуються не загальноприйняті термінологічні вирази та позначення, наприклад, «замкнена передавальна функція» (стор. 200) замість «передавальна функція замкненої системи», « ω – частота обертання» (стор.188, 295) замість « ω – швидкість обертання».

18. Крім результатів математичного моделювання не наведено жодної осцилограми перехідних процесів в синтезованих системах, знятої на реальному обладнанні, опис якого займає достатньо велику частину загального обсягу дисертації.

19. В тексті дисертації та автореферату зустрічаються орфографічні помилки.

Перелічені недоліки погіршують в цілому позитивне враження від дисертації, але не зачіпають суті виконаних досліджень.

Висновки. Дисертаційна робота Мухи Миколи Йосифовича «Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових автономних електроенергетичних системах» є самостійною завершеною кваліфікаційною науковою роботою, яка містить нове розв'язання науково-прикладної проблеми підвищення енергетичної ефективності суднових автономних електроенергетичних систем шляхом динамічної компенсації реактивної потужності в колі навантаження електростанцій у функції зміни реактивної провідності навантажень, що на відміну від відомого керування у функції реактивного струму чи реактивної потужності дало змогу у перехідних режимах комутації навантажень підвищити швидкодію та точність процесу компенсації реактивної потужності та за рахунок цього зменшити втрати в електричних мережах суден.

Матеріал дисертації викладено послідовно, стиль викладання доказовий. Висновки до кожного розділу і дисертації в цілому тісно пов'язані з її змістом і відображають суть виконаних досліджень. Публікації автора повністю висвітлюють наукові положення і результати наукових досліджень.

За темою і змістом дисертація відповідає спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи і оформлена згідно з вимогами до оформлення дисертацій, затверджених наказом МОНУ від 12.01.2017 року №40. Текст автореферату відповідає змісту дисертації.

В дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук не виносяться

на захист положення та наукові результати, які захищені здобувачем у кандидатській дисертації.

Таким чином дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9,10,12,13 “Порядку присудження наукових ступенів”, а її автор Муха Микола Йосифович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент, доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та електромеханіки
Дніпровського державного технічного університету

О.В.Садовой

Підпис професора Садового О.В.
засвідчую,
перший проректор ДДТУ



В.М.Гуляев