

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Щура Ігоря Зеноновича на дисертаційну роботу Бешти Олександра Олександровича на тему: «Підвищення навантажувальної здатності в системі асинхронного електропривода транспортного засобу з комбінованим джерелом живлення», подану в раду Інституту електродинаміки НАН України для здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми досліджень

Стрімкий розвиток автономних електричних транспортних засобів, який спостерігається в останні два десятиріччя, стримується через проблему забезпечення потрібного рівня енергії бортового джерела засобами з високими питомими показниками енергії та потужності. Через відсутність на даний час одного джерела енергії, що характеризується високими значеннями вказаних показників, застосовуються гібридні системи електричного живлення з двома джерелами чи нагромаджувачами енергії, які доповнюють одне одного. Для їх ефективної роботи необхідно застосовувати додаткові силові електронні перетворювачі параметрів електричної енергії. Такі рішення, безумовно, підвищують складність та вартість системи бортового живлення, керування якою, як правило, здійснюється окремо від системи тягового електроприводу. В останні роки намітився новий напрям досліджень, спрямованих на створення спільних для двох основних підсистем електричного транспортного засобу – підсистеми електроприводу та бортового електричного живлення – засобів керування. Саме у цьому розрізі виконані дослідження здобувачем О.О. Бештою.

У поданій до захисту дисертаційній роботі застосовано оригінальний підхід щодо інтеграції двох джерел живлення – акумуляторної батареї та сонячної фотоелектричної системи – в систему частотно керованого асинхронного електропривода електричного транспортного засобу. Таке рішення дає змогу підвищувати електромагнітний момент тягового двигуна за рахунок додаткового джерела поновлюваної енергії сонця, завдяки чому економиться енергія основного джерела енергії, акумуляторної батареї, та збільшується запас ходу електричного транспортного засобу.

Наукові теоретичні та експериментальні дослідження автор проводив протягом 2014-2015 років в лабораторії електротехніки Есслінгенського університету прикладних наук (Німеччина). Участь здобувача у спільних міжнародних дослідженнях та набутий при цьому досвід наукової роботи за кордоном, безумовно, заслуговують на відзначення та позитивно вплинули на рівень його дисертаційної роботи.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, їх достовірність і новизна

Дослідження, що виконані в дисертаційній роботі, базуються на застосуванні фундаментальних положень електротехніки, теорії електричних машин і теорії електроприводу, математичному моделюванні з різним рівнем деталізації, теорії автоматичного керування, застосуванні сучасних комп'ютерних програм для чисельного дослідження розроблених математичних моделей, а також проведених фізичних експериментах.

Результати математичного моделювання порівнювалися з відповідними експериментальними, отриманими на створеному дослідному стенді. Узгодження цих результатів підтверджує адекватність розроблених математичних моделей та результатів, які були одержані аналітичними методами.

Таким чином, методи дослідження відповідають поставленим задачам і забезпечують достатньо ефективне їх розв'язання та досягнення поставленої в роботі мети. Наведені аргументи дають змогу визнати достовірними наукові результати, основні положення та зроблені висновки досліджень.

Сформульовані в дисертації два наукові положення повністю підтверджуються отриманими результатами досліджень.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному.

1. Визначено закономірності впливу параметрів індуктивності й активного опору схеми під'єднання додаткового джерела енергії на режими його роботи та на систему живлення електропривода транспортного засобу, що дозволяє забезпечити збільшення навантажувальної здатності асинхронного двигуна при одночасному зменшенні коливань його електромагнітного моменту.

2. Науково обґрунтовано спосіб керування ключами інвертора напруги з використанням нульових станів ключів нижнього плеча інвертора, що дало змогу підвищити вихідну напругу інвертора та навантажувальну здатність системи електропривода за рахунок додаткового джерела живлення.

3. Розроблено новий спосіб модифікації просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції інвертора з врахуванням встановленої закономірності коливань його вихідної напруги, зумовлених застосуванням запропонованого включення додаткового джерела живлення, що забезпечило стабілізацію напруги живлення електродвигуна на заданому рівні.

4. Встановлено закономірності впливу коливань напруги живлення асинхронного двигуна на формування його електромагнітного моменту за різних способів керування електроприводом та запропоновано спосіб мінімізації коливань електромагнітного моменту двигуна.

Основні наукові положення за результатами досліджень адекватно відображені у дев'яти пунктах загальних висновків.

Практичне значення та шляхи використання результатів досліджень

Обґрунтовано працездатність досліджуваної схеми включення додаткового джерела живлення асинхронного електропривода транспортного засобу шляхом під'єднання вихідного кола DC-DC-перетворювача через діод, дросель і розрядний резистор до нульової точки статорних обмоток двигуна і "мінусового" терміналу автономного інвертора напруги. Розроблено методику вибору параметрів цієї схеми.

Запропонований алгоритм модифікації комутації ключів інвертора напруги для роботи з комбінованим джерелом живлення, що враховує коливання вихідної напруги, пов'язане з наявністю додаткового джерела ЕРС, забезпечує стабілізацію на заданому рівні вихідної напруги інвертора, що живиться від комбінованого джерела.

Введення додаткових сигналів у систему векторного керування швидкістю асинхронного електропривода, відповідно до запропонованого способу, показало ефективність компенсації коливань електромагнітного моменту асинхронного двигуна.

Розроблено методику техніко-економічного обґрунтування параметрів комбінованого джерела живлення. Показано, що запропоноване схемо-технічне рішення є ефективним з точки зору подовження циклу розряду акумуляторної батареї і зменшує капітальні та експлуатаційні витрати.

Обґрунтовані в дисертації рішення дають змогу застосувати запропоновану систему комбінованого живлення в розробках нових електричних транспортних засобів, які будуть ефективними за експлуатації в регіонах з високою річною інсоляцією.

Оцінка об'єму та змісту дисертації

Дисертація складається зі вступу, 5-х розділів, висновків, списку використаної літератури з 101 позиції та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації 156 сторінок, робота ілюстрована 60 рисунками та містить 10 таблицями.

У *вступі* представлена актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, об'єкт, предмет, задачі та методи досліджень, визначені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів та результати апробації роботи.

У *першому розділі* здійснено аналіз конфігурацій систем електроприводу повністю електричних та гібридних транспортних засобів. Здійснено огляд відомих джерел бортового електричного живлення, які застосовуються в транспортних засобах, проаналізовано їх переваги та недоліки. Показано доцільність гібридизації цих джерел. Як один з варіантів аналізується застосування в ролі допоміжного джерела живлення сонячних фотоелектричних перетворювачів. Описано досліджувану в дисертаційній роботі систему комбінованого електричного живлення у складі акумуляторної батареї як

основного джерела та допоміжної фотоелектричної системи. Показано, що для керування роботою додаткового джерела слід розглядати варіант стану нижніх ключів автономного інвертора напруги (0,0,0) для забезпечення збільшення моменту тягового електричного двигуна.

У *другому розділі* досліджуються умови роботи комбінованої з двох джерел енергії системи живлення в частотно керованому електроприводі транспортного засобу з описаною оригінальною схемою включення додаткового джерела. При цьому детально аналізуються умови роботи двох джерел за різних станів ключів інвертора напруги. Теоретично обґрунтовано доцільні параметри кола додаткового джерела енергії – значення його ЕРС, індуктивності дроселя та активного опору резистора, за яких система є працездатною, забезпечує підвищення вихідної напруги інвертора і тим самим електромагнітного моменту асинхронного двигуна, а також характеризується незначними значеннями струмів нульової послідовності. Слід зазначити, що вказані параметри повинні мати компромісні значення з метою поєднання позитивного ефекту з мінімальними негативними впливами. Все це детально проаналізовано та обґрунтовано у даному розділі.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню коливань напруги інвертора через підключення додаткового джерела енергії та розробленню способу модифікації поширеної просторово-векторної модуляції з метою компенсації цих коливань. Запропонована модифікація полягає в урахуванні змінної складової модуля вектора вихідної напруги інвертора з періодом, у три рази меншим, ніж період обертання вектора напруги при розрахунку часу включення робочих і нульових станів ключів.

У *четвертому розділі* визначаються закономірності впливу на електромагнітний момент асинхронного двигуна несиметричної системи напруг, яка формується інвертором напруги за досліджуваної системи комбінованого живлення від двох джерел енергії. При цьому аналізуються пульсації електромагнітного моменту за різних законів керування запропонованою системою електропривода транспортного засобу: векторного, скалярного, а також за прямого пуску асинхронного двигуна. Показано, що найбільший приріст електромагнітного моменту і найменший рівень його коливань забезпечуються векторним керуванням. Запропоновано закон компенсації коливань моменту асинхронного двигуна в системі векторного керування швидкістю електропривода шляхом використання додаткових сигналів керування, що визначаються за отриманими змінними складовими напруги живлення в синхронній системі координат.

П'ятий розділ дисертації присвячено експериментальним дослідженням, спрямованим на підтвердження отриманих теоретичних результатів. Поставленими експериментами, які проводились у лабораторіях університету прикладних наук міста Есслінген (Німеччина), показані властивості досліджуваної комбінованої з двох джерел системи живлення щодо формування

механічної характеристики електропривода, підвищення енергетичної ефективності та вибору параметрів схеми. Також на основі проведених у роботі досліджень створено методичку техніко-економічного обґрунтування системи електропривода з комбінованим джерелом живлення. Показано, що запропоноване схемо-технічне рішення є ефективнішим з точки зору продовження циклу розряду акумуляторної батареї і має менші капітальні та експлуатаційні витрати в порівнянні з аналогічними відомими.

Загальні висновки висвітлюють одержані наукові результати, а також включають основні рекомендації щодо їх використання.

У **додатках** до дисертації наведено приклад техніко-економічного обґрунтування варіанту компоновки електромобіля за розробленою методикою, а також представлено акти впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес та в практику двох підприємств.

У цілому структура, обсяг та оформлення дисертації відповідають чинним вимогам, які ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія».

Повнота публікацій матеріалів досліджень

Результати дисертаційного дослідження відображені в 6 наукових працях, із них 2 статі в періодичному науковому виданні, що входить до наукометричної бази Scopus, 3 статті у закордонному періодичному виданні, 1 матеріал міжнародної наукової конференції, індексовані у наукометричній базі Scopus. Це дає змогу зробити висновок про те, що у науково-технічних виданнях є повна інформація про результати досліджень.

Дискусійні положення і зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

1. Пункти 1 і 3 наукової новизни є близькими, тож їх варто було б об'єднати. Пункти 5 і 6 наукової новизни є дуже загальними та не відображають конкретики даного дослідження.

2. На с. 38 невірно пояснюються функції контролера заряду акумуляторної батареї від фотоелектричної панелі, а також їх класифікація на два типи: ШІМ-контролер заряду та МРРТ-контролер заряду. У дійсності МРРТ це дійсно функція контролера для забезпечення роботи в точці максимуму потужності, а ШІМ – це спосіб регулювання напруги, який найчастіше застосовується в МРРТ-контролері.

3. У дисертації не раз сказано про застосування інвертора для зв'язку джерела енергії, наприклад, сонячної батареї, з ланкою постійного струму, фактично бортовою мережею постійної напруги. Навіть вводиться термін DC-DC-інвертор замість DC-DC-перетворювач, а під рис. 1.4 пише про застосування двох автономних інверторів напруги, коли фактично є один інвертор і один перетворювач постійної напруги.

4. У підрозділах 2.1 та 2.2, де досліджуються умови живлення обмоток статора асинхронного двигуна від двох ЕРС та обґрунтовуються параметри елементів кола додаткового джерела живлення за різних станів ключів інвертора напруги, обмотки статора розглядаються як пасивне R-L навантаження без врахування ЕРС обертання, які наводяться у цих обмотках. Зважаючи на складність перебігу електромагнітних процесів у досліджуваній системі комбінованого живлення та керування асинхронним приводом транспортного засобу, обґрунтування доцільних параметрів запропонованої схеми включення додаткового джерела живлення, які б гарантували працездатність системи та допустимі значення струмів нульової послідовності, варто було б здійснювати шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання в середовищі Matlab/Simulink.

5. Не зрозуміло, чому автор називає широковідомий спосіб просторово-векторної модуляції (англ. Space Vector Modulation – SVM) конвенціональним законом комутації ключів інвертора напруги.

6. У 3-у розділі дисертації запропоновано спосіб модифікації закону керування ключами інвертора з метою стабілізації напруги інвертора, що, відповідно усуває коливання електромагнітного моменту асинхронного двигуна, в 4-у розділі пропонується спосіб компенсації пульсацій моменту, викликаних коливанням напруги інвертора. Тобто ці два заходи націлені на одну мету – усунення пульсацій електромагнітного моменту, викликаних досліджуваною схемою включення додаткового джерела напруги. Проте у дисертаційній роботі не порівняно між собою ці два підходи, а в загальних висновках по роботі не зроблено відповідні рекомендації щодо їх застосування.

7. На рис. 2.9 і 3.5 отримані як результат розрахунків криві мають явні зломи, причину яких в роботі не проаналізовано.

8. На стор. 96 вперше в роботі наведено параметри асинхронного двигуна у відносних одиницях, які застосовувалися в подальших дослідженнях, проте не наведено абсолютні значення цих параметрів, а також базу їх нормування.

9. У наведених на рис. 4.9, 4.11, 4.14, 4.16 отриманих залежностях приростів електромагнітного моменту від приростів постійної чи змінної складових напруги статора повинні фігурувати амплітудні значення напруг статора V_{1m} , за яких отримано ці залежності.

10. Серед результатів проведених експериментальних досліджень немає осцилограм, які б демонстрували перебіг електромагнітних процесів під час роботи запропонованої системи комбінованого живлення асинхронного приводу.

11. На стор. 131 вказано, що потужність джерела сонячної енергії на електромобілі сягає 3...5 кВт. За сучасного розвитку техніки для такої потужності потрібна площа фотоелектричних панелей щонайменше 15...25 м². Це досяжно хіба що для автобусів чи автопричепів, проте в розрахунках береться привод потужністю 50 кВт для невеликого транспортного засобу, а

потужність DC-DC-перетворювача для сонячних панелей потужністю 3,5 кВт.

12. У техніко-економічних розрахунках потужність DC-DC-перетворювача в базовому варіанті взята в 2,5...5 разів вищою, ніж у пропонованому, а його вартість – у 12 разів більшою (див. Додаток А), що викликає сумніви в коректності отриманих показників ефективності запропонованого рішення. При цьому на стор. 132 хибно вказано, що зростання рівня вихідної напруги DC-DC-перетворювача пов'язано зі зростанням його потужності.

13. Зауваження до оформлення дисертації:

- помічено неправильне чи некоректне вживання термінів: «впливає на екологію» (стор. 38); «опромінення» замість «опроміненість» (стор. 38); «контролер сонячного заряду» (стор. 39); «найбільш компромісний варіант» (стор. 137); «швидкість обертання» чи просто «швидкість двигуна» замість частота обертання або кутова швидкість (неодноразово); «формула» замість вираз чи залежність (у всій роботі).

- упущено dt у підінтегральному виразі першого доданку (2.11);

- показане на рис. 3.9 відносне значення амплітуди фазної напруги V_{1m} не відповідає подано у тексті значенню 0,6667;

- математичні вирази, що описують роботу асинхронного двигуна (4.1)-(4.14), а також системи векторного керування електроприводом на його базі (4.15)-(4.26) є відомими та широко представлені у спеціальній літературі, тому їх повне наведення в дисертації не є доцільним;

- на отриманих осцилограмах (рис. 4.19 та 4.22) неправильно позначені складові струмів статора I_{ld} та I_{lq} ;

- на стор. 112 вказано як доцільну частоту ШІМ автономного інвертора напруги не більшу 2 кГц, а у 7-у пункті загальних висновків – 25 кГц;

- підрозділ 5.2 позначено два рази;

- результати досліджень дублюються шляхом подання в таблицях та на рисунках (табл. 5.4 та рис. 5.5, табл. 5.5 та рис. 5.6, табл. 5.6 та рис. 5.7);

- наведені в роботі графічні залежності мають занадто великий формат порівняно з розміром шрифту.

Зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву вагомим результатам досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Бешти О.О.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Бешти Олександра Олександровича на тему «Підвищення навантажувальної здатності в системі асинхронного електропривода транспортного засобу з комбінованим джерелом живлення» є завершеною, самостійно виконаною працею, в якій отримано нові теоретично та практично обґрунтовані результати, що служать науковою основою для

створення нового типу інтегрованої системи бортового живлення та електроприводу транспортного засобу.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення наукових і практичних задач, новизною і ступенем обґрунтованості отриманих результатів та практичних висновків дисертаційна робота відповідає вимогам, які ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія», а її автор Бешта Олександр Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Завідувач кафедри електромехатроніки
та комп'ютеризованих електромеханічних систем,
Інституту енергетики та систем керування,
Національного університету
«Львівська політехніка» МОН України
д.т.н., професор



І.З. Щур

Підпис проф. Щура І.З. засвідчую

Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»



Р.Б. Брилинський

Госей, до СВР 8
05.11.2020
Машин