ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу Немудрого І.Ю. «Підвищення ефективності електромеханічної системи вітроелектричних установок з аеродинамічною мультиплікацією», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

На розгляд представлені: дисертаційна робота, автореферат та копії друкованих робіт автора за темою досліджень. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел з 116 найменувань (11 сторінок), двох додатків (4 сторінки). Загальний обсяг дисертації – 132 сторінки, 39 рисунків, 16 таблиць та 2 додатків.

Актуальність теми.

Світовий досвід впровадження та виробництва потужних вітроустановок базується на використанні конструкцій з горизонтальною віссю обертання вітроколеса. Головним чином це установки в яких вітроколесо через мультиплікатор поєднується з асинхронним або синхронним генератором. Сумісність генерованої напруги з мережею забезпечується перетворювачем частоти.

Для підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії деякими фірмами (наприклад Enercon) розробляються безмультиплікаторні схеми на базі багатополюсних синхронних генераторів.

Не зважаючи на достатній наявний потенціал вітроенергетики, Україна значно відстає від інших країн як у розробках, так і у впровадженні вітроенергетики, як за встановленою потужністю, так і за кількістю вітроагрегатів.

Українськими розробниками (ПКТБ "Конкорд", м. Дніпропетровськ) розроблена принципово нова вітроустановка з аеродинамічною мультиплікацією, що дозволяє здійснювати роботу генератора з мережею без перетворювача частоти, що значно знижує собівартість такої системи.

Проте така концепція побудови вітроустановки викликає значні складнощі при створенні систем потужністю більше 1000 кВт. При швидкостях вітрового потоку менше 5 м/с знижується ефективність вироблення електроенергії.

В роботі, що розглядається, показані шляхи усунення недоліків електромеханічної системи перетворення енергії, що дозволяє підвищити

енергетичну ефективність процесу, тому дисертаційну роботу слід вважати актуальною і своєчасною.

Таким чином, дисертаційна робота Немудрого І.Ю. спрямована на вирішення наукової задачі, яка полягає у встановленні залежності, що існує між параметрами режимів роботи електромеханічної системи перетворення енергії в вітроустановках з аеродинамічною мультиплікацією, її ККД, сталою генерацією та сумісністю генерованої напруги з мережею і відповідає за критерієм актуальності п.9 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р.

Дисертація виконувалась відповідно до напрямку робіт за Державною комплексною програмою подальшого розвитку інфраструктури та провадження господарської діяльності на о. Зміїний і континентальному шельфі (Постанова Кабінету Міністрів України № 713 від 31.05.2002 р. із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 1402 (1402-2003-п) від 04.09.2003 та № 1807 (1807-2006-п) від 27.12.2006) та напрямами науково-технічної діяльності ТОВ «НДІ «Перетворювач» (госп. договір № 02 від 04.11.2009 р. з ТОВ «Антарес» м. Дніпропетровськ).

Наукові результати та їх новизна.

Перше наукове положення дисертаційної роботи розкриває умови ефективного перетворення вітрової енергії в електричну в вітроелектричній установці з аеродинамічною мультиплікацією при сталій частоті обертання вітротурбін та змінній швидкості вітрового потоку за підтримки балансу потужності вітроколеса і вітротурбін.

Друге наукове положення встановлює залежність відносного значення внутрішнього активного опору джерела до опору навантаження, що залежить від швидкості вітрового потоку і алгоритму керування ключами імпульсного перетворювача, що забезпечує сталу генерацію енергії в номінальних режимах при коливаннях напруги мережі.

Наукові положення вважаю обґрунтованими, бо встановлена залежність витікає із закону збереження енергії з урахуванням обґрунтованих автором припущень, і такими, що дозволяють здійснити управління процесом перетворення енергії в електромеханічній системі вітроелектричних установок з аеродинамічною мультиплікацією.

Наукова новизна отриманих автором результатів полягає в наступному:

1. Одержано залежність максимальної генерованої потужності при фіксованих частотах обертання вітротурбін при змінній частоті обертання вітроколеса в діапазоні швидкості вітрового потоку V_0<5 м/с.

2. Виявлено, що наявність нерівномірної швидкості вітрового потоку по висоті та кута осі турбогенератора до площини обертання лопатей вітроколеса призводить до появи додаткового моменту турбогенератора, який має позитивну сталу (до 3 %) та змінну складову амплітуда якої сягає 6,5 % від номінального значення при номінальній швидкості вітрового потоку 11,5 м/с.

3. Одержано нову аналітичну залежність між вихідною напругою і відносним еквівалентним внутрішнім опором джерела, яке є функцією швидкості вітрового потоку, що дозволяє визначити критичне значення внутрішнього опору джерела.

4. Одержані аналітичні співвідношення, що встановлюють зв'язок між параметрами ємнісного фільтру, періодом модуляції і фазності інвертора, керованого мережею, що забезпечує стійку роботу інвертора, керованого мережею, який працює разом з імпульсним перетворювачем підвищуючого типу при коливаннях напруги мережі живлення.

Практична цінність результатів роботи полягає в реалізації режиму генерації максимальної потужності при швидкості вітрового потоку менше 5 м/с шляхом зниження частоти обертання вітротурбін до 50% від номінального значення та використання допоміжного перетворювача частоти, що приводить до збільшення відбору потужності до 10 %; обґрунтовано використання генераторів з перетворювачами частоти для збільшення потужності до 2000 кВт та підвищення їх ККД на 1,6…2,2 % при практично однаковій масі та габаритах, та реалізація перетворювачів частоти з керованим мережею інвертором для зменшення собівартості вітроелектричних установок, а також розроблено методику розрахунку регулювальних характеристик імпульсного перетворювача напруги підвищуючого типу, яка дозволила встановити параметри джерела живлення та алгоритм керування, що забезпечує сталу генерацію електроенергії.

Ступінь обгрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність підтверджуються коректністю постановки і розв’язання завдань досліджень, застосуванням загальновідомих положень фундаментальних законів електротехніки, теорії напівпровідникових перетворювачів, динаміки електромеханічних систем, імітаційним моделюванням та експериментальними даними.

Результати дисертаційної роботи використані у НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) при розробці і виготовленні ПЧ типу ПЧ-ТТП-320-400-50 УХЛ2 для дослідної установки ВЕУ АМ типу ТГ-750 для ПФГ «Конкорд» (м. Дніпропетровськ) і ПЧ типу МПЧ-Т2ТПТ-418-690-50 У3 для ВЕУ АМ типу ТГ-1000 для ВЕС о. Зміїний, в яких автор приймав безпосередню участь.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності. Дисертація є завершеною науковою роботою. У вступі обґрунтована актуальність досліджень і сформульовані: наукове завдання та мета досліджень; наукові положення, що виносяться на захист; показана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналітичний огляд закордонного та вітчизняного стану побудови електромеханічних систем перетворення вітрової енергії в електричну. Проаналізовані тенденції розвитку закордонної вітроенергетики та елементна база їх електромеханічних систем. Показано, що розроблена в Україні принципово нова вітроелектрична установка з аеродинамічною мультиплікацією дозволяє генерувати електроенергію в мережу без перетворювача частоти, електромеханічна система якої потребує більш детального дослідження.

У другому розділу представлено результати дослідження електромеханічної системи вітроелектричної установки з аеродинамічною мультиплікацією. Наведена її технічна характеристика. Розроблена функціональна схема електромеханічної системи та відповідні рівняння динаміки її підсистем з урахуванням балансу потужності. На базі систем рівнянь динаміки розроблена імітаційна модель, блок-схему схему якої наведено в дисертації. За допомогою моделі одержана залежність генерації максимальної потужності при фіксованих обертах вітротурбін і змінній швидкості вітрового потоку. Встановлено, що для генерації максимальної потужності при швидкості вітрового потоку менше 5 м/с потрібно знизити швидкість обертання вітротурбін в два-три рази, що дозволить підвищити відбір потужності до 10 %. Достовірність моделі підтверджена експериментально.

Встановлено, що конструктивні особливості вітроелектричної установки викликають пульсацію генерованого моменту до 6 %, пов’язану з нерівномірністю вітрового потоку по висоті. Проте це майже не впливає на вихідну генеровану напругу, що пов’язано з симетрією трилопатевого вітроколеса. На імітаційній моделі проведено дослідження впливу зміни швидкості вітрового потоку на момент вітрогенератора. Показано, що при зміні

швидкості на 30 % зміна моменту – не перевищує 1 % завдяки великому моменту інерції вітроколеса.

Третій розділ присвячено аналізу схем перетворення енергії в вітроелектричній установці при роботі з малими швидкостями вітрового потоку – до 5 м/с. Для максимального відбору потужності вітрового потоку потрібно знижувати частоту обертання вітротурбіни (це доведено у другому розділі роботи), що призводить до зміни частоти генерованої напруги. Тому для сумісності з мережею потрібно встановити перетворювач частоти.

В роботі розглянуті базові схеми перетворювачів частоти. В результаті аналізу встановлено, що найбільш доцільними схемами допоміжних перетворювачів, встановлена потужність яких сягає 20 %, є

– перетворювачі частоти з керованим мережею інвертором та випрямлячами, з'єднаними паралельно;

– з імпульсними перетворювачами напруги підвищуючого типу;

– послідовне з'єднання випрямлячів з регулятором напруги збудження генераторів.

Вказані схеми забезпечують мінімальну собівартість та прийнятні показники сумісності з мережею.

Розроблено методику розрахунку регулювальної характеристики імпульсного перетворювача напруги, отримано нову залежність його напруги в функції відносного опору джерела живлення до опору навантаження, який є функцією швидкості вітрового потоку. Встановлено граничне значення відносного опору живлення, при якому забезпечується стала генерація енергії при номінальній і допоміжних частотах обертання вітротурбін. Сформульовані вимоги до алгоритму керування ключами імпульсних перетворювачів.

У четвертому розділі проведено дослідження особливостей перетворення енергії в електромеханічній системі вітроелектричних установок великої потужності, які працюють на промислову мережу або в автоматичному режимі.

В роботі обґрунтовано використання генераторів високої частоти з перетворювачами частоти. Показано, що використання індукторного генератора з частотою до 400 Гц дозволяє без значного збільшення маси і габаритів збільшити потужність генераторів до 1500…2000 кВт при прийнятному значенні ККД системи генератор-перетворювач частоти.

При роботі на промислову мережу рекомендовано використовувати перетворювачі частоти з керованими мережею інверторами, випрямлячами, з імпульсними перетворювачами напруги підвищуючого типу, що дозволяє

забезпечити сталу генерацію електроенергії в мережу при забезпеченні нормованих показників якості електроенергії.

Встановлена залежність постійних фільтру, періоду модуляції імпульсних перетворювачів та фазності інвертора, що забезпечує сталу роботу керованого мережею інвертора при зміні напруги мережі.

Для роботи в автономному режимі запропоновано використовувати трирівневий автономний інвертор напруги, який реалізовано в вітроелектроустановці типу ТГ-1000. В перетворювачі частоти використовуються випрямлячі з імпульсними перетворювачами напруги.

Проаналізовано ряд алгоритмів та частот модуляції для забезпечення потрібної сумісності з мережею, що дозволило встановити раціональну частоту модуляції. Проведена експериментальна перевірка показників якості та ККД, наведені осцилограми вихідної напруги та фотографії перетворювача частоти.

У додатках наведено розрахунок ККД імпульсного перетворювача, акти впровадження результатів дослідження в ТОВ «НДІ «Перетворювач» та ТОВ «Антарес» (м. Дніпропетровськ).

Аналіз структури, змісту та обсягу дисертації дозволяє зробити висновок про її відповідність положенням п.9 , п.11 та п.12 «Порядку присудження наукових ступенів та присвоєння вченого звання…».

Оцінка мови, стилю, оформлення дисертації та ступеню опублікування наукових результатів. Назва дисертаційної роботи відповідає її змісту. Стиль висвітлення – послідовний, лаконічний. Ілюстрації інформативні і за своїм оформленням відповідають діючим нормативам. Робота написана технічно грамотно, оформлена в цілому акуратно, про те є деякі зауваження щодо оформлення формул.

Результати дисертаційних досліджень опубліковані в 10 наукових працях, з них 7 - в фахових наукових виданнях України, в тому числі 2 роботи опубліковані у виданнях, що входять до переліку міжнародних науково-метричних баз даних, 3 – у тезах матеріалів конференцій. Обсяг і рівень висвітлення отриманих наукових результатів у фахових публікаціях, а також в інших наукових виданнях відповідає «Порядку присудження наукових ступенів…». Текст автореферату відповідає змісту дисертації. Структура, обсяг, ілюстрації і мова викладення дисертаційного матеріалу і автореферату відповідають вимогам Атестаційної колегії МОН України.

Важливість одержаних в дисертаційній роботі результатів для науки й народного господарства полягає у встановленні залежності максимальної генерованої потужності вітроелектричної установки з аеродинамічною

мультиплікацією при постійних обертах вітротурбін та змінною швидкістю вітрового потоку, за підтримки балансу потужності, та параметрами опору джерела і опору навантаження, що залежить від швидкості вітру, при яких забезпечується стала генерація енергії, шляхом впровадження результатів роботи та виготовлення перетворювачів частоти для нового типу вітроелектричної установки з аеродинамічною мультиплікацією типу ТГ-750М та ТГ-1000.

Недоліками дисертаційної роботи вважаю наступне:

1. У висновках за першим розділом подається відома інформація щодо наявності в Україні потужної Ботієвської вітроелектростанції, розташованої поряд з селом Приморський Посад Приазовського району Запорізької області. При цьому йдеться мова, що це найпотужніша в Європі ВЕС. Що не вірно. Вона найпотужніша в Україні.

2. На рисунку 2.5 наведені залежності максимальної потужності в функції відносної швидкості вітрового потоку. При цьому в діапазоні відносної швидкості вітрового потоку від 0,05 до 0,3 при різних кутових швидкостях турбогенератора є ділянки з від'ємним значенням потужності. Проте в тексті роботи не пояснюється це явище.

3. При імітаційному моделюванні електромеханічної системи вітроелектричної установки з аеродинамічною мультиплікацією не враховувались втрати енергії, що призвело до збільшення похибок при моделюванні.

4. При розрахунку регулювальних характеристик не враховані втрати напруги від комутації в випрямлячах, що призводить до зниження коефіцієнту посилення імпульсних перетворювачів.

5. При аналізі схем з керованим мережею інвертором не розглянуті показники якості з вищих гармонік.

6. Таблицю 3.7 (розрахунок параметрів ПЧ для різних потужностей) слід було винести у додаток.

7. В розділі 4 йде мова про можливість застосування в якості генератора високочастотних генераторів з частотою 125 та 400 Гц. Проте автор не зовсім коректно навів відомі формули, які пов’язують потужність генератора, його частоту обертання та частоту генерованого струму. (в формулах потрібно замість знака «= – рівно» ставити знак «≡ – пропорційно», як у попередньому виразі.

8. Автор робить висновок, що збільшена частота (у скільки разів?) дозволить зменшити у два рази встановлену потужність компенсуючих конденсаторів. Такий висновок робиться без додаткових розрахунків.

9. В розділі 4 бажано було б навести схему розподілу енергії на о. Зміїному.

10. Зі змісту роботи не зрозуміло, яким чином одержано показник якості трирівневого інвертора.

Не зважаючи на ряд зауважень, вважаю, що робота виконана на високому науковому рівні (враховуючи, що досліджується електромеханічна система принципово нової вітроелектроустановки з аеродинамічною мультиплікацією, важливість і практичну спрямованість отриманих висновків і практичних результатів) і є суттєвим вкладом у розвиток теорії перетворення електроенергії в електромеханічних системах вітроустановок нового типу та їх практичну реалізацію.

Аналіз структури, змісту та обсягу дисертації дозволяє зробити висновок про її відповідність положенням п.9, п.11 та п.12 «Порядку присудження наукових ступенів та присвоєння вченого звання…», а її автор Немудрий Ігор Юрійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент
к.т.н., доцент,
доцент кафедри
відновлюваних джерел енергії **Д.В Ципленков**

Підпис Ципленкова Д.В.
Засвідчую:
вчений секретар
ДВНЗ "НГУ" О.А. Дашко

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД «НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ» і.к. 02070743

Відгук отримано 04.12.15
Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД «НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ» і.к. 02070743