

УДК 621.548:621.314.21

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ Й ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА АВТОНОМНИХ КОНТРРОТОРНИХ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВОК РІЗНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ТРАНСФОРМАТОРАМИ З ОБЕРТОВОЮ ПОЛОВИНОЮ

І. З. Щур, А. І. Ковальчук

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: i_shchur@meta.ua, an_box@mail.ru

Для ефективного використання низькошвидкісного потенціалу вітру використовують малопотужні автономні вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання. Запропоновано нову конструкцію контрроторної безконтактної вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання, в якій два вітроротори обертаються в різні сторони. Створено імітаційну комп'ютерну модель вітроелектроустановки, роботу якої перевірено на тестовому турбулентному вітропотопі, а також підсистему оптимального керування навантаженням синхронного генератора з постійними магнітами, яка враховує аеродинамічні та електротехнічні процеси у вітроелектроустановці з вертикальною віссю обертання. Проведено економічне порівняння нової безконтактної контрроторної конструкції вітроелектроустановки з базовим традиційним енергоефективним варіантом вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання з одним вертикально орієнтованим вітроротором, багатополосним синхронним генератором із постійними магнітами та напівпровідниковим активним випрямлячем. На основі проведених проектних розрахунків та отриманих необхідних мас активних матеріалів визначено вартість генераторів для традиційної та контрроторної конструкції, а також трансформатора з обертовою половиною. Здійснено загальну техніко-економічну оцінку вітроелектроустановки.

Ключові слова: автономна контрроторна вітроелектроустановка, вітроелектроустановка з вертикальною віссю обертання, трансформатор з обертовою половиною, підсистема оптимального керування, синхронний генератор з постійними магнітами, техніко-економічна оцінка.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АВТОНОМНЫХ КОНТРРОТОРНЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВОК РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ С ТРАНСФОРМАТОРОМ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛОВИНОЙ

И. З. Щур, А. И. Ковальчук

Национальный университет «Львовская политехника»

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: i_shchur@meta.ua, an_box@mail.ru

Для эффективного использования низкоскоростного потенциала ветра используют маломощные автономные ветроэлектростанции с вертикальной осью вращения. Предложена новая конструкция контрроторной бесконтактной ветроэлектростанции с вертикальной осью вращения, в которой два ветроротора вращаются в разные стороны. Создана имитационная компьютерная модель ветроэлектростанции, работа которой проверена на тестовом турбулентном ветропотоке, а также подсистема оптимального управления нагрузкой синхронного генератора с постоянными магнитами, учитывающая аэродинамические и электротехнические процессы в ветроэлектростанции с вертикальной осью вращения. Проведено экономическое сравнение новой бесконтактной контрроторной конструкции ветроэлектростанции с базовым традиционным энергоэффективным вариантом ветроэлектростанции с вертикальной осью вращения с одним вертикально ориентированным ветроротором, многополосным синхронным генератором с постоянными магнитами и полупроводниковым активным выпрямителем. На основании проведенных проектных расчетов и полученных необходимых масс активных материалов определена стоимость генераторов для традиционной и контрроторной конструкции, а также синхронного генератора с постоянными магнитами. Осуществлена общая технико-экономическая оценка ветроэлектростанции.

Ключевые слова: автономная контрроторная ветроэлектростанция, ветроэлектростанция с вертикальной осью вращения, трансформатор с вращающейся половиной, система оптимального управления нагрузкой, синхронный генератор с постоянными магнитами, технико-экономическая оценка.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Потенціал енергії вітру на різних територіях України характеризується невисокими середньорічними швидкостями вітрового потоку на рівні 4–5 м/с [1]. Цей потенціал з найбільшою ефективністю можуть використовувати малопотужні автономні вітроелектроустановки (ВЕУ), які встановлюються поблизу споживачів. Завдяки низці переваг, таких як простота і надійність конструкції через відсутність мультиплікатора, можливість монтажу безпосередньо на будинках, незалежність від напрямку вітру, а також малий

рівень шуму, доцільним є використання ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО).

Функціональна залежність між вихідною потужністю вітроротора (ВР) та швидкістю вітру відображається залежністю

$$P_{BP} = 0,5 \rho A C_P(\lambda) V^3, \quad (1)$$

де ρ – густина повітря; A – площа омивання ВР; $C_P(\lambda)$ – коефіцієнт використання енергії вітру ВР, який залежить від конструктивних особливостей ВР та його швидкості $\lambda = \omega r / V$; ω – кутова швидкість ВР; r – радіус ВР.

Розглядаючи малопотужні автономні ВЕУ, основний наголос ставиться на максимальну енергетичну ефективність. Для цього необхідно, щоб робоча точка ВЕУ перебувала в околі максимумів характеристик (1) при різних швидкостях вітру.

Для генерування електричної енергії з максимальною енергетичною ефективністю у ВЕУ з ВВО застосовують синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів (СГПМ).

Застосування контрроторної системи ВЕУ, в якій індуктор СГПМ з'єднаний з ротором, а якорь – з контрротором, що обертається у зворотньому відносно ротора напрямку, дає змогу суттєво зменшити розміри й вартість генератора [2]. Проте в контрроторній ВЕУ виникає проблема у передачі виробленої електричної енергії з якоря СГПМ, який розміщений на рухомій частині установки (контрроторі).

Запропоновано нову конструкцію контрроторної ВЕУ з ВВО, у якій для передачі виробленої електричної енергії з рухомого якоря використовується трансформатор з обертовою половиною (ТзОП), одне півосердя якого обертається разом з якорем СГПМ, а інше є нерухомим [3, 4]. Додатковою функцією ТзОП є регулювання вихідної напруги ВЕУ за допомогою перемикавання відводів на його вторинній нерухомій обмотці. Це дає змогу квазіоптимально регулювати робочу точку ВЕУ з ВВО при різних швидкостях вітру, що забезпечує відбір від вітру максимальної енергії [5].

Попередньо було складено математичну модель ТзОП та проведено його розрахунок. У моделі було враховано наявність повітряного проміжку між півосерддями, а також те, що трансформатор працює від джерела живлення (генератора), напруга та частота якого є змінними [2]. Особливістю конструкції ТзОП також є те, що індуктивність взаємодукції для кожної фази не повинна залежати від кута повороту рухомої частини трансформатора. Верифікація отриманої комп'ютерної моделі ТзОП, що проведена з використанням експериментальних досліджень макетного зразка однієї фази трансформатора, показала адекватність комп'ютерного моделювання [6].

ТзОП розрахований таким чином, щоб утримати значення його вихідної напруги у вузьких межах для найбільш ефективного зарядження акумуляторних батарей.

Нашими дослідженнями визначено, що для ефективної роботи дослідної ВЕУ з визначеними параметрами відводів вторинної обмотки ТзОП [7] у всьому діапазоні швидкості вітру достатньо двох відводів ТзОП: для низької швидкості вітру – робота на першому відводі, а для високої – на другому [6]. Це забезпечує майже максимальну енергетичну ефективність – коефіцієнт використання енергії вітру є близьким до максимального значення.

Метою роботи є дослідження режимів роботи контрроторної безконтактної вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання, створення імітаційної комп'ютерної моделі вітроелектроустановки й

підсистеми оптимального керування навантаженням синхронного генератора, яка враховує аеродинамічні та електротехнічні процеси у вітроелектроустановці з вертикальною віссю обертання, а також, з урахуванням проведених проектних розрахунків, визначення цінової характеристики генераторів для традиційної й контрроторної конструкції і трансформатора з обертовою половиною та здійснення загальної техніко-економічної оцінки.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Основними складовими автономної контрроторної ВЕУ з ВВО є несуча конструкція з двома ВР Н-типу; генератор – СГПМ; ТзОП; електронний блок регулювання, до якого входять симістори, логічний контролер, діодний випрямляч; акумуляторні батареї (рис. 1).

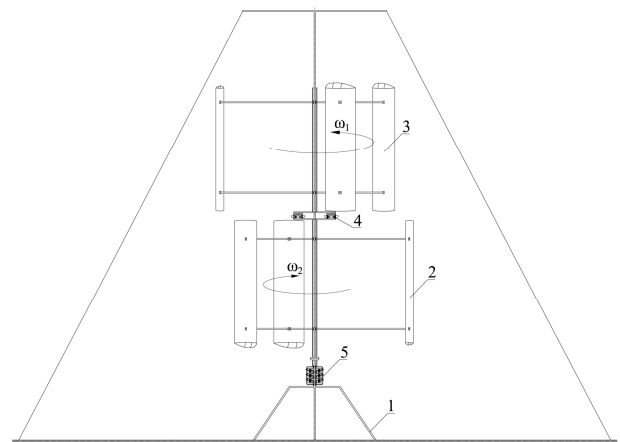


Рисунок 1 – Автономна контрроторна ВЕУ з ВВО:
1 – несуча конструкція; 2 – ВР 1; 3 – ВР 2;
4 – генератор; 5 – ТзОП

Для дослідження роботи автономної контрроторної ВЕУ з ВВО на тестовому профілі вітру, використовуючи засоби прикладних програм MATLAB/Simulink, створено її імітаційну комп'ютерну модель (рис. 2).

Складовими елементами імітаційної комп'ютерної моделі є наступні основні блоки та підсистеми:

- 400m V3_high1 – модель турбулентного вітру;
- Wind turbine Subsystem1 та Wind turbine Subsystem2 – підсистеми, що моделюють два ВР; сума кутових швидкостей двох ВР дорівнює кутовій швидкості генератора;
- Permanent Magnet Synchronous Machine – віртуальна модель СГПМ з бібліотеки SimPowerSystem;
- Transformer1, 2, 3 – моделі окремих фаз ТзОП;
- Subsystem Signal Winding – система керування навантаженням СГПМ за відхиленням його кутової швидкості від заданого оптимального значення;
- Universal Bridge – діодний міст для випрямлення напруги;
- Battery1 – віртуальна модель акумуляторної батареї для накопичення згенерованої електричної енергії.

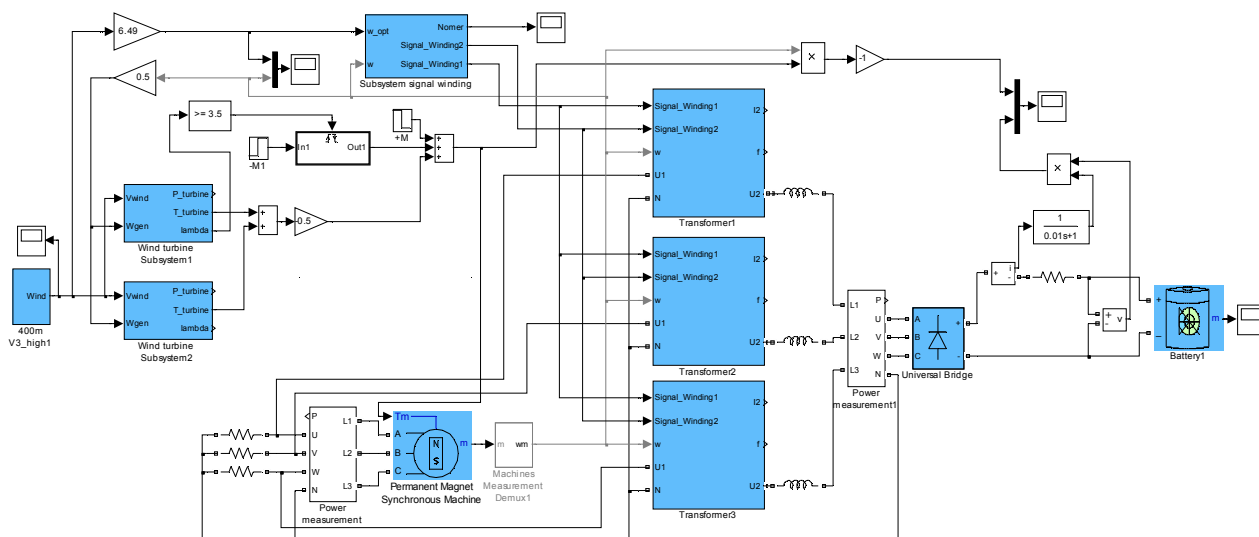
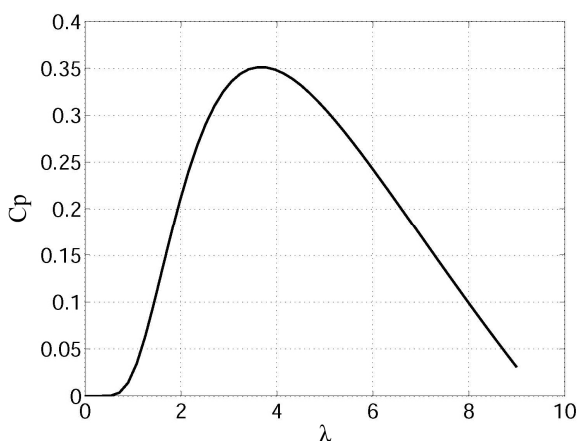


Рисунок 2 – Імітаційна комп'ютерна модель для дослідження роботи автономної контрроторної БЕУ з ВВО

При моделюванні БЕУ застосовувався ВР Н-типу, конструктивні особливості якого зумовлюють вигляд його основної характеристики – коефіцієнта використання енергії вітру залежно від його швидкохідності (рис. 3).

Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта використання енергії вітру ВР $C_p(\lambda)$ від його швидкохідності λ

Залежність $C_p(\lambda)$, що показана на рис. 3 для ВР з ВВО, забезпечує максимальне значення коефіцієнта використання енергії вітру $C_{pmax} = 0,351$ при оптимальному значенні швидкохідності $\lambda_{opt} = 3,67$ і описується виразом [8]

$$C_p(\lambda) = 1,14 \left(\frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) e^{-\frac{6}{\lambda}}. \quad (2)$$

Дослідження проводилися з БЕУ, що відповідає за потужністю та вихідною напругою СГПМ макетному зразку ТЗОП. Для цього контрроторна БЕУ з двома ВР при швидкості вітру $V = 9$ м/с забезпечує на виході СГПН потужність 400 Вт. Один ВР має

висоту 1,13 м та радіус 1,14 м. Для моделювання електричного генератора вибрано багатополісний ($p = 12$) СГПМ з наступними параметрами: $R = 0,8$ Ом; $L_d = L_q = 3,5$ мГн; $\Phi = 0,086$ Вб. Сумарний момент інерції генератора з двома ВР становив $J = 1$ кг·м².

На виході генератора підімкнено три однофазних ТЗОП для кожної фази.

В основу моделі ТЗОП покладено Т-подібну заступну схему [7]. Розроблену комп'ютерну модель однієї фази ТЗОП зображено на рис. 4.

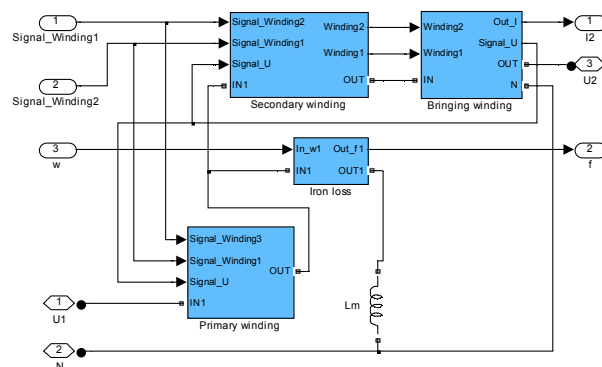


Рисунок 4 – Комп'ютерна модель однієї фази ТЗОП

Вхідними сигналами для моделі однієї фази трансформатора є кутова швидкість генератора w , сигнали на включення першого та другого відводу Signal winding1, Signal winding2 та напруга однієї фази генератора U1-N, а вихідними – частота напруги f , вихідна напруга U2-N, вихідний струм I2. У моделі (рис. 4) використовуються наступні підсистеми: Primary winding, Iron loss, Secondary winding та Bringing winding.

Підсистема Iron loss призначена для моделювання втрат у сталі ТЗОП. Вони моделюються втратами в опорі, величину якого визначено експерименталь-

но за допомогою досліду неробочого ходу [7]. Залежно від кутової швидкості й відповідно до ЕРС СГПМ за допомогою регульованого джерела напруги, яке включається в гілку намагнічування, формується необхідне значення струму в цій гілці.

Підсистема Secondary winding змінює параметри вторинної обмотки ТзОП залежно від того, на якому відводі він має працювати. Тобто ця підсистема моделює вторинну обмотку трансформатора. У моделі задано значення опорів та індуктивностей, які відповідають втратам у вторинній обмотці та потоку розсіювання вторинної обмотки для двох відводів. Перемикання параметрів різних відводів відбувається ідеальними ключами при отриманні сигналу про необхідність підмикання необхідного відводу. При цьому система, перш ніж здійснити комутацію, очікує моменту наступного "переходу" синусоїди вихідної напруги через нульове значення [7].

Підсистема Primary winding, яка моделює первинну обмотку трансформатора, є аналогічною до підсистеми Secondary winding, але змінює тільки індуктивності розсіювання залежно від того, який відвід вторинної обмотки є підімкненим. При цьому активний опір первинної обмотки є однаковим для двох різних відводів вторинної обмотки.

Для створення імітаційної комп'ютерної моделі використовується Т-подібна заступна схема, у якій вторинна обмотка ТзОП приводиться до первинної. Недоліком такого рішення є те, що воно вимагає підімкнення до трансформатора не реального, а приведенного навантаження. Завданням підсистеми Bringing winding є узгодження реального навантаження з Т-подібною заступною схемою. Підсистема реалізована на двох керованих джерелах напруги, одне з яких підмикається до приведенного кола вторинної обмотки трансформатора, а інше – безпосередньо до реального навантаження. Між ними знаходиться відповідна система керування, що забезпечує однаковість вхідної та вихідної потужностей приведення [7].

Завдання оптимального керування навантаженням СГПМ полягає у забезпеченні таких умов роботи БЕУ, коли від вітру відбираємо максимальну кількість електроенергії. При роботі БЕУ процеси аеродинаміки та електротехніки є пов'язаними між собою. Через це автоматичне керування роботою БЕУ необхідно будувати на закономірностях перебігу цих двох процесів.

Для забезпечення максимальної енергетичної ефективності за будь-якої швидкості вітру БЕУ повинна працювати в точці відбору максимуму потужності (ТМВП) [9, 10]. Ця умова виконується тоді, коли сумарне електричне та механічне навантаження генератора є таким, що ВР обертається з оптимальною кутовою швидкістю, за якої від вітру буде відбиратися максимальна потужність. Таким оптимальним точкам роботи відповідає оптимальне значення швидкохідності ВР λ_{opt} , при якому коефіцієнт використання енергії вітру $C_p(\lambda_{opt})$ досягає

свого максимального значення. Звідси випливає лінійна залежність між оптимальним значенням кутової швидкості ВР та швидкістю вітру [11, 12]:

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{r} V_A. \quad (3)$$

Для підтримання значення швидкохідності ВР в околі λ_{opt} використовуються відводи на вторинній обмотці трансформатора. Для того, щоб ефективно керувати БЕУ й відбирати від вітру максимально можливу потужність у кожен момент часу, потрібно алгоритмом керування забезпечити таке навантаження СГПМ, щоб кутові швидкості двох ВР мали значення, близькі до оптимального (3). На рис. 5 наведено підсистему квазіоптимального керування СГПМ.

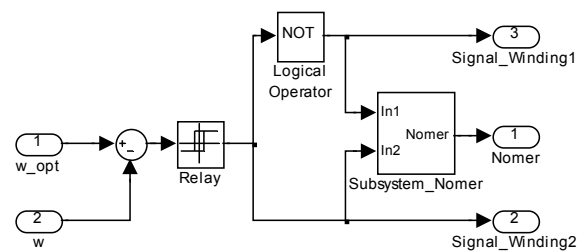


Рисунок 5 – Підсистема Subsystem Signal Winding, що здійснює квазіоптимальне керування СГПМ

Систему квазіоптимального керування навантаженням БЕУ з ВВО побудовано на основі двопозиційного регулятора із заданим гістерезисом, що працює за відхиленням. Швидкість вітру V_B вимірюється анемометром та перетворюється в оптимальне завдання кутової швидкості СГПМ w_{opt} , що дорівнює $2\omega_{opt}$. Для визначення реальної кутової швидкості генератора проводяться непрямі вимірювання: визначається частота напруги f , що переводиться в кутову швидкість генератора w . Відповідно до того, наскільки w відрізняється від w_{opt} , регулятор Relay подає сигнали на перемикання відводів вторинної обмотки ТзОП для підтримання максимальної енергетичної ефективності. При імітаційному моделюванні гістерезис було налаштовано на величину $\Delta\omega = \pm 2$ рад/с. Систему квазіоптимального керування за відхиленням можна легко реалізувати на основі дешевого однокристального мікроконтролера Atmega8.

Для коректного симулювання роботи БЕУ на турбулентному вітрі було створено математичну модель турбулентного вітропотoku, максимально наближену до реального вітру (рис. 6). Комп'ютерна модель дає можливість змінювати середнє значення швидкості вітру та інтенсивність турбулентності. Для отримання достовірних результатів швидкості турбулентного вітропотoku використано підхід Каймала (Kaimal) [13].

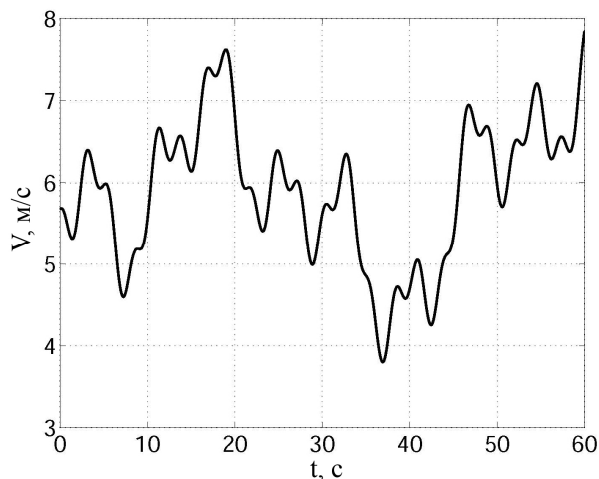


Рисунок 6 – Часова залежність моделі швидкості турбулентного вітропотoku

На рис. 8–10 наведено отримані в ході комп'ютерного симулювання часові діаграми основних координат контрроторної системи БЕУ.

Як видно з рис. 7, система керування забезпечує задовільне слідування кутової швидкості генератора за заданою оптимальною кутовою швидкістю, за якою відбувається максимальний відбір ВР потужності від вітрового потоку. Для цього здійснюється відповідне перемикання відводів вторинної обмотки ТзОП, як показано на рис. 8.

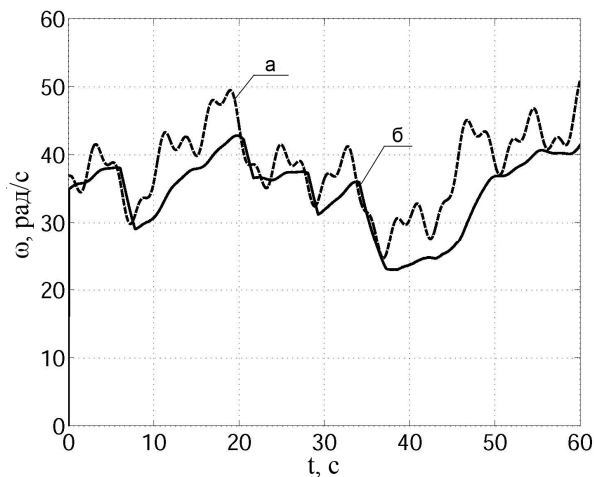


Рисунок 7 – Кутова швидкість генератора:
а) оптимальна; б) реальна

Відібрана ВР механічна потужність, а також вихідна потужність, яка йде на зарядження АБ, наведені на рис. 9. Аналіз результатів симулювання показує, що коли швидкість вітру велика, ТзОП працює на другому відводі.

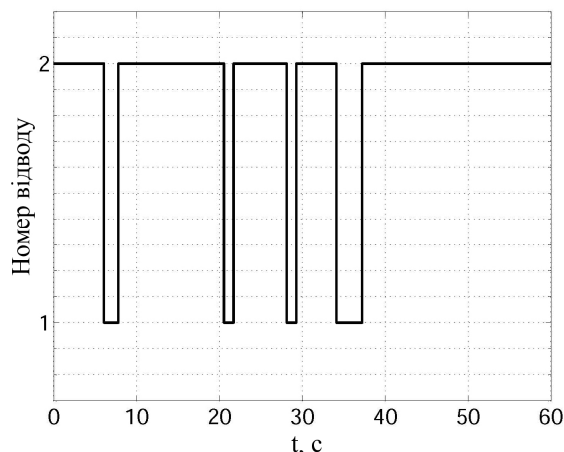


Рисунок 8 – Перемикання відводів вторинної обмотки ТзОП

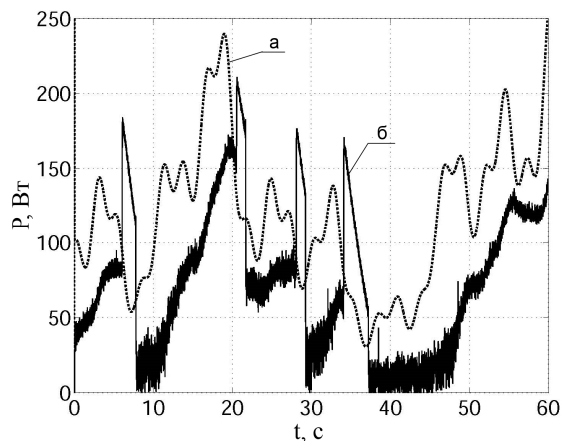


Рисунок 9 – Згенеровані БЕУ потужності:
а) вхідна механічна; б) вихідна електрична

Коли ж швидкість вітру знижується настільки, що оптимальна кутова швидкість генератора є нижчою за реальну на величину гістерезису, то відбувається перемикання на перший відвід (рис. 8). При цьому система стрімко уповільнюється (рис. 7, 8) і протягом деякого інтервалу часу вихідна електрична потужність БЕУ є більшою, ніж прикладена до СГПМ механічна потужність, через те, що до акумулятора віддається також кінетична енергія сумарних махових мас БЕУ (рис. 9). При наростанні швидкості вітру V_B генерована електрична потужність відстає через інерційність системи БЕУ з ВВО (рис. 9).

Ефективність відбору потужності від турбулентного вітру підтверджується перебуванням значень коефіцієнта використання енергії вітру в безпосередній близькості до максимального значення $C_{Pmax} = 0,351$ (рис. 10).

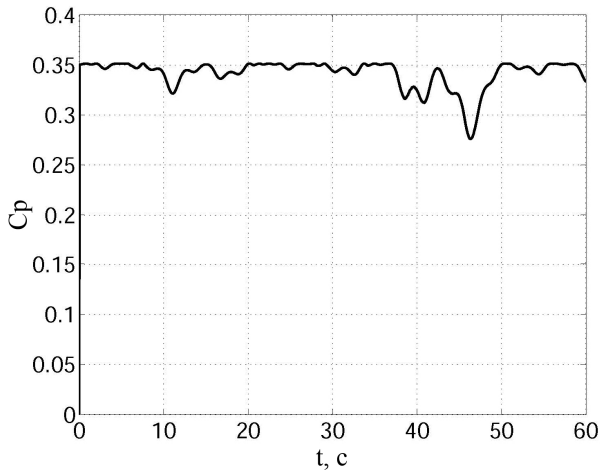


Рисунок 10 – Коефіцієнт використання енергії вітру

Щоб переконатися в перспективності застосування нової конструкції ВЕУ, необхідно провести її техніко-економічну оцінку. Такі дослідження варто здійснити для обох варіантів ВЕУ: традиційного та запропонованого (рис. 11).

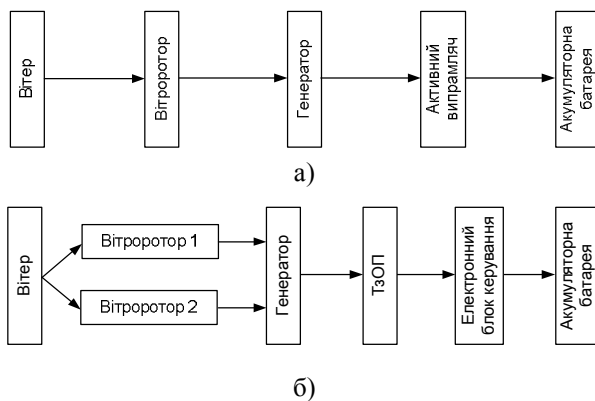


Рисунок 11 – Функціональні схеми автономної ВЕУ: а) базовий варіант з одним ВР; б) нова контрроторна конструкція

Вартість механічної частини класичної ВЕУ з ВВО визначено на підставі аналізу ринку ВЕУ та проведеної експертної оцінки співвідношення вартостей основних її складових [14]. Для контрроторних ВЕУ вартість механічної частини збільшено на 20 %. Ця складова враховує як ускладнення обертових вузлів у контрроторній ВЕУ, так і застосування двох менших ВР порівняно з одним великим у базовому зразку. Результати цього аналізу для автономних ВЕУ з ВВО різної потужності наведено в табл. 1.

Для генерування електричної енергії використовується багатополісний аксіальний СГПМ. Конструктивні параметри таких генераторів для низки вказаних у табл. 1 потужностей визначено за результатами проведених проектних розрахунків відповідно до розробленої методики. На підставі отриманих електричних, магнітних і масо-

габаритних показників визначено вартість активних матеріалів конструкції генератора. Вартість генераторів у цілому визначалась за виразом

$$C_G = k_\delta k_m (m_{Cu} c_{Cu} + m_{Fe} c_{Fe}) + m_{pm} c_{pm}, \quad (4)$$

де $k_p = 1,4$ – коефіцієнт, що враховує вартість виготовлення; $k_m = 1,3$ – коефіцієнт, що враховує вартість матеріалів, необхідних для виготовлення опорно-поворотного пристрою; m_{Cu} , m_{Fe} , m_{pm} – маси міді, сталі та магнітів з NdFeB відповідно; c_{Cu} , c_{Fe} , c_{pm} – ринкові ціни міді, сталі та магнітів відповідно.

Коефіцієнти k_p та k_m у виразі (4) не охоплюють показників магнітів через їх високу вартість та порівняно невелику трудозатратність у встановленні.

Кутова швидкість генератора для контрроторної ВЕУ є у два рази вищою, ніж у класичній конструкції. Це означає, що він має у два рази меншу кількість пар полюсів p . Оскільки значення потужностей та струмів якоря СГПМ у традиційній та контрроторній ВЕУ мають бути однаковими, то співвідношення між їх моментами та кутовими швидкостями повинні бути наступними:

$$M_{cr} = M_{cl} / p;$$

$$\omega_{cr} = p \omega_{cl}. \quad (5)$$

де індекси cr та cl відповідають контрроторному та класичному варіантам відповідно.

Габарити генератора будуть зменшуватися зі зменшенням його числа пар полюсів у контрроторній ВЕУ порівняно з класичною. З метою отримання добрих техніко-економічних показників генератора необхідно зберегти в обох конструкціях незмінним амплітудне значення індукції в повітряному проміжку $B_\delta = const$. Для цього, за збереження незмінної осевої довжини l_δ генераторів, між їх діаметрами D та кількостями провідників N обмотки якоря на одиницю довжини кола розтки статора мають виконатися наступні умови:

$$D_{cr} = D_{cl} / p^\alpha;$$

$$N_{cr} = N_{cl} / p^{-\alpha}, \quad (6)$$

де α – коефіцієнт, значення якого лежить у межах $0 \leq \alpha \leq 1$.

Електромагнітне навантаження активної частини електричних машин визначається сталою Арнольда:

$$C_A = \frac{D_{cr}^2 l_\delta \omega_{cr}}{P_e}, \quad (7)$$

де P_e – електромагнітна потужність.

Підставивши вирази (5) та (6) у (7), отримаємо:

$$C_A = \frac{D_{cl}^2 l_\delta p \omega_{cl}}{p^{2\alpha} P_e}. \quad (8)$$

Таблиця 1 – Вартість електромеханічної системи автономної ВЕУ з ВВО (грн.)

Складові елементи ВЕУ з ВВО	Тип ВЕУ з ВВО									
	Класична з одним вітроротором та керованим випрямлячем					Контрроторна безконтактна із ТзОП				
Потужність ВЕУ, кВт	0,4	1	2	5	10	0,4	1	2	5	10
Механічна частина	1965	4700	8970	20290	32040	2358	5640	10764	24348	38448
Генератор	4113	5432	6820	13591	22904	2920	3857	4842	9650	16262
Активний випрямляч	5175	6412	7725	11850	17860	-	-	-	-	-
ТзОП	-	-	-	-	-	959	1884	2975	5862	9680
Електронний блок керування	-	-	-	-	-	250	250	250	340	370
ВЕУ з ВВО в цілому	11253	16544	23515	45731	72804	6487	11631	18831	40200	64760

З виразу (8) видно, що стала Арнольда залишається постійною тільки тоді, коли $\alpha = 0,5$. Це значення й використовувалося для обчислення мас активних матеріалів конструкцій генераторів для контрроторних ВЕУ, виходячи з відповідних мас для генераторів тих же потужностей, але з більшим у два рази значенням p для класичних ВЕУ.

Використовуючи вищенаведене, можна записати залежності для визначення мас активних матеріалів генератора для контрроторної конструкції ВЕУ:

$$m_{Cu.cr} = p^{0,5} m_{Cu.cl}; \quad (9)$$

$$m_{Fe.cr} = p^{0,5} m_{Fe.cl}; \quad (10)$$

$$m_{pm.cr} = p^{0,5} m_{pm.cl}. \quad (11)$$

Вартість генераторів для контрроторної ВЕУ наведено у табл. 1.

ТзОП для контрроторної ВЕУ з ВВО можна віднести до нетипових об'єктів електромеханіки [3]. Враховуючи всі особливості конструкції та функціональне призначення, створено методику проектування таких трансформаторів [2]. Проведено техніко-економічну оптимізацію параметрів конструкції ТзОП для низки потужностей автономних контрроторних ВЕУ з ВВО [14]. Технічним критерієм у задачі оптимізації розглядався ККД об'єкта, а економічним – його вартість. Вартість трансформаторів з оптимальними параметрами наведено в табл. 1.

Вартість активних випрямлячів напруги, які є одним з елементів класичної ВЕУ з ВВО (табл. 1), отримано на підставі аналізу ринку таких пристроїв. У контрроторній системі ВЕУ замість цього елемента використовується простий електронний блок, що забезпечує безконтактну комутацію відводів ТзОП. До складу цього блока входять симістори, простий логічний контролер та діодний міст. Його орієнтовну вартість також наведено в табл. 1.

Вартість акумуляторних батарей (АБ) є сталою

для контрроторної та класичної систем ВЕУ через однакову потужність цих систем. Через це, а також через інші фактори, які впливають на ємність АБ, їх не включено в сумарну вартість електромеханічної системи автономної ВЕУ з ВВО.

ВИСНОВКИ. Розроблена система оптимального керування здійснює регулювання роботи ВЕУ з ВВО, враховуючи аеродинамічні та електротехнічні процеси в ній. Система слідує за оптимальною кутовою швидкістю СГПМ та перемикає відводи вторинної обмотки ТзОП таким чином, щоб реальна кутова швидкість максимально повторювала форму оптимальної. Коректна робота системи керування підтверджується високим коефіцієнтом використання енергії вітру, а отже й високою ефективністю відбору потужності від турбулентного вітрового потоку.

Техніко-економічна оцінка нової конструкції контрроторної безконтактної ВЕУ з ВВО показала, що вона є конкурентоспроможною з класичною системою ВЕУ з одним вертикально орієнтованим ВР. Її вартість на 11–42 % нижча вартості традиційної конструкції ВЕУ з ВВО в діапазоні потужностей від 0,4 до 10 кВт, причому ця вартісна перевага зростає зі зменшенням потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Титко Р., Калініченко В. Відновлювані джерела енергії (досвід Польщі для України). – Варшава: OWG, 2010. – 532 с.
2. Ковальчук А.І. Трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2012. – Вип. 736. – С. 59–63.
3. Ковальчук А.І. Обертовий трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання // 36. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та опти-

мізації», 28–29 березня 2012 р. – Кременчук: КрНУ, 2012. – С. 122–123.

4. Заявка на патент № u201207720. Безконтактна контрроторна вітроустановка / Макачук О.В., Щур І.З., Ковальчук А.І.; заявл. 25.06.2012, рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель від 21.11.2012. – 5 с.

5. Щур І.З., Ковальчук А.І. Квазіоптимальне дискретне регулювання навантаження синхронного генератора з постійними магнітами в безконтактній контрроторній автономній вітроустановці // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 431–434.

6. Щур І.З., Ковальчук А.І., Дзьоба Т.Я. Математичне та комп'ютерне моделювання автономної контрроторної вітроустановки з трансформатором із обертовою половиною // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – Вип. 36/2013 (1009). – С. 191–194.

7. Щур І.З., Ковальчук А.І. Імітаційне моделювання трансформатора з обертовою половиною у складі контрроторної вітроелектроустановки // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 330–335.

8. Muteanu I., Bratcu A.I., Cutululis N.A., Ceangă E. Optimal Control of Wind Energy Systems. – London: Springer, 2008. – 284 p.

9. Datta R., Ranganathan V.T. A method of tracking the peak power points for variable speed wind energy conversion system // IEEE Trans. on Energy Convers. – 2003. – Iss. 18. – № 1. – PP. 163–168.

10. Karrari M., Rosehart W., Malik O.P. Comprehensive control strategy for variable speed cage machine wind generation unit // IEEE Trans. on Energy Convers. – 2005. – Iss. 20. – № 2. – PP. 415–423.

11. Helle L., Blaabjerg F. Wind turbine systems // Control in Power Electronics. Academic Press. – 2002. – PP. 483–510.

12. Щур І.З., Турленко О.Р. Енергетична ефективність різних способів відбору потужності від синхронного генератора з постійними магнітами у вітроенергоустановці // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка». – 2009. – Вип. 654. – С. 55–57.

13. Eisenhut C., Krug F. Wind-turbine model for system simulations near cut-in wind speed // IEEE Trans. On Energy Conversion. – 2007. – Iss. 22. – № 2. – PP. 414–420.

14. Щур І.З., Ковальчук А.І. Техніко-економічна оптимізація параметрів трансформатора з обертовою половиною для різних потужностей вітроелектроустановок // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка». – 2014. – Вип. 785. – С. 95–101.

COMPUTER SIMULATION AND TECHNO-ECONOMIC EVALUATION OF AUTONOMOUS CONTRA-ROTATING VARIOUS POWER WIND TURBINES WITH A TRANSFORMERS WITH ROTATING HALF

I. Shchur, A. Kovalchuk

National University "Lviv Polytechnic"

vul. S. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: i_shchur@meta.ua, an_box@mail.ru

For efficient use of low-speed wind potential, low-power autonomous wind turbines with vertical axis of rotation are used. A new design of contra-rotating contactless vertical axis of rotation in which two wind rotors rotate in opposite directions is proposed. A computer imitative model of wind turbine, whose work was checked on a test turbulent wind flow was created and also a subsystem with an optimum control of the permanent magnet synchronous generator load, which takes into account the aerodynamic and electrotechnical processes in vertical axis of rotation were created. An economic comparison of a new contactless contra-rotating construction of wind turbine with a basic version of the traditional energy efficient vertical axis of rotation with one vertically oriented wind rotor, multipolar permanent magnet synchronous generator and a semiconductor active rectifier was held. On the basis of the made design calculations and of the obtained required weight of active materials, the value of the generators for traditional and contra-rotating design and transformer with rotating half were specified. A general feasibility study wind-driven is implemented.

Key words: autonomous contra-rotating wind turbine, wind turbine with a vertical axis of rotation, transformer with rotating half, an optimal load system, synchronous generator with permanent magnets, techno-economic evaluation.

REFERENCES

1. Tytko, R. and Kalinichenko, V. (2010), *Vidnovliuvani dzherela energii (dosvid Polshchi dlya Ukrainy)* [Renewable Energy Sources (Experience of Poland to Ukraine)], OWG, Warsaw, Poland. (in Ukrainian)

2. Kovalchuk, A. (2012), "Transformer for contra rotor wind turbine with vertical axis", *Visnyk Natsionalnogo Universytetu "Lvivska Politehnika", Electroenergetychni ta Electromehanichni Systemy*, Vol. 736, pp. 59–63. (in Ukrainian)

3. Kovalchuk, A. (2012), "Rotating transformer for contra rotor wind turbine with vertical axis", *Conference*

proceedings "Electromechanical and energy systems, modeling and optimization methods", March 28–29, 2012, Kremenchuk. pp. 122–123. (in Ukrainian)

4. Makarchuk, O.V., Shchur, I.Z., and Kovalchuk, A.I. (2012), Patent of Ukraine № u201207720, *Bezkontaktna kontrrotorna vitroustanovka* [Brushless contra rotor wind turbine]. (in Ukrainian)

5. Shchur, I. and Kovalchuk, A. (2012), "Quasi-optimal discrete control of load of synchronous generator with permanent magnets in contactless contra-rotating autonomous wind turbine",

"*Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*", Vol. 3, no. 19, pp. 431–434. (in Ukrainian)

6. Shchur, I., Kovalchuk, A. and Dzjoba, T. (2013), "Mathematical and computer modeling of the autonomous wind turbine with the transformer with rotating half", *Visnyk Natsionalnogo Tehnichnogo Universytetu "Kharkivskiy Politekhnicniy Institut": "Problemy automatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika"*, Vol. 36, no. 1009, pp. 191–194. (in Ukrainian)

7. Shchur, I. and Kovalchuk, A. (2013), "Computer simulation of work of the transformer with rotating half in composed of contra-rotor wind turbine", "*Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*", Vol. 2, no. 22, pp. 330–335. (in Ukrainian)

8. Muteanu, I., Bratcu, A.I., Cutululis, N.A. and Ceangă, E. (2008), *Optimal Control of Wind Energy Systems*, London: Springer, 284 p.

9. Datta, R., Ranganathan, V.T. (2003), "A method of tracking the peak power points for variable speed wind energy conversion system", "*IEEE Trans. on Energy Convers*", Vol. 18, no. 1, pp. 163–168.

10. Karrari, M., Rosehart, W. and Malik, O.P. (2005), "Comprehensive control strategy for variable speed cage machine wind generation unit", *IEEE Trans. on Energy Convers*, Vol. 20, no. 2, pp. 415–423.

11. Helle, L. and Blaabjerg, F. (2002), "Wind turbine systems", *Control in Power Electronics. Academic Press*, pp. 483–510.

12. Shchur, I. and Turlenko, O. (2009), "Energy efficiency of different ways of selecting power from the synchronous generator with permanent magnets in wind turbine", *Visnyk Natsionalnogo Universytetu "Lvivska Politekhnik"*: *Electroenergetychni ta Electromekhanichni Systemy*, Vol. 654, pp. 55–57. (in Ukrainian)

13. Eisenhut, C. and Krug, F. (2007), "Wind-turbine model for system simulations near cut-in wind speed", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 22, no. 2, pp. 414–420.

14. Shchur, I. and Kovalchuk, A. (2014), "Technical and economic optimization of parameters of the transformer with rotating half for wind turbines of various powers", *Visnyk Natsionalnogo Universytetu "Lvivska Politekhnik"*: *Electroenergetychni ta Electromekhanichni Systemy*, Vol. 785, pp. 95–101. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 13.05.2014.