

УДК 621.311.24:621.548

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКОЮ НА БАЗІ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА
З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОРОТОРА****А. О. Лозинський, В. І. Щур**

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна. E-mail: lozynsky@polynet.lviv.ua, vsevolod.shchur@gmail.com

Для розвитку малої вітроенергетики виникає потреба в удосконаленні відомих алгоритмів керування вітроелектроустановками з метою покращення їх енергоефективності. Для дослідження обрано вітроелектроустановку з вертикальною віссю обертання потужністю один кіловат. Найбільш поширеним способом керування такою вітроелектроустановкою є регулювання моменту навантаження генератора пропорційно до квадрату його кутової швидкості – регулювання за збуренням швидкості вітру. Така система керування забезпечує постійний пошук точки відбору максимальної потужності від вітру, проте має низьку швидкодію, особливо при малих і турбулентних швидкостях вітру. Це, а також зміни аеродинамічної характеристики вітроротора залежно від параметрів навколишнього середовища, зокрема швидкості вітру та температури, призводить до зниження кількості отриманої електроенергії. У роботі розроблено систему керування вітроелектроустановкою, яка дозволяє on-line визначити оптимальний, з точки зору максимуму вихідної електричної потужності, момент навантаження векторно керованого синхронного генератора з постійними магнітами за дії вказаних збурюючих факторів. Така система керування базується на використанні нечіткого регулятора, на вхід якого поступають сигнали швидкості вітру й температури навколишнього середовища, а на виході отримуємо коректуючий сигнал моменту навантаження генератора. Для покращення динамічних характеристик системи до регулятора за збуренням додано також регулятор за відхиленням кутової швидкості вітроротора від заданої. Ефективність запропонованого рішення перевірена імітаційним комп'ютерним симулюванням у середовищі MATLAB/Simulink роботи дослідної вітроелектроустановки з розробленою й традиційною системами керування на турбулентних вітрах. Результати проведених досліджень підтвердили зростання кількості отриманої за тестовий період роботи дослідної вітроелектроустановки електроенергії до 7 % при застосуванні розробленої системи керування порівняно з традиційною залежно від параметрів навколишнього середовища.

Ключові слова: вітроелектроустановка, вітроротор з вертикальною віссю обертання, нечіткий регулятор.**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКОЙ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА
С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОРОТОРА****А. О. Лозинский, В. И. Щур**

Национальный университет «Львовская политехника»

ул. Степана Бандеры, 12, г. Львов, 79000, Украина. E-mail: lozynsky@polynet.lviv.ua, vsevolod.shchur@gmail.com

Для более широкого развития малої ветроэнергетики возникает потребность в усовершенствовании известных алгоритмов управления ветроэлектростанциями с целью улучшения их энергоэффективности. Для проведения исследований была выбрана ветроэлектростанция с вертикальной осью вращения мощностью один киловатт. Наиболее распространенным способом управления такой ветроэлектростанцией является регулирование момента нагрузки генератора пропорционально квадрату его угловой скорости – регулирование по возмущению скорости ветра. Такая система управления обеспечивает постоянный поиск точки отбора максимальной мощности от ветра, однако имеет низкое быстродействие, особенно при малых и турбулентных скоростях ветра. Это, а также изменения аэродинамической характеристики ветроротора в зависимости от параметров окружающей среды, а в частности, скорости ветра и температуры, приводит к снижению количества полученной электроэнергии. В исследовании разработана система управления ветроэлектростанцией, которая позволяет on-line определять оптимальный, с точки зрения максимума выходной электрической мощности, момент нагрузки векторно управляемого синхронного генератора с постоянными магнитами при действии указанных возмущающих факторов. Такая система управления базируется на использовании нечеткого регулятора, на вход которого поступают сигналы скорости ветра и температуры окружающей среды, а на выходе получается корректирующий сигнал момента нагрузки генератора. Для улучшения динамических характеристик системы к регулятору по возмущению добавлен также регулятор по отклонению угловой скорости ветроротора от заданной. Эффективность предложенного решения проверена имитационным компьютерным моделированием в среде MATLAB/Simulink работы исследуемой ветроэлектростанции с разработанной и традиционной системами управления на турбулентных ветрах. Результаты проведенных исследований подтвердили рост количества полученной за тестовый период работы исследуемой ветроэлектростанции электроэнергии до 7 % при использовании разработанной системы управления по сравнению с традиционной в зависимости от параметров окружающей среды.

Ключевые слова: ветроэлектростанция, ветроротор с вертикальной осью вращения, нечеткий регулятор.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Більшість відомих систем керування вітроелектроустановками (ВЕУ)

[1] розроблялися для достатньо потужних ВЕУ з орієнтацією їх роботи на середніх та високих швид-

костях вітру. У таких умовах роботи ці ВЕУ характеризуються високими показниками відбору енергії вітру. Як показали наші дослідження [2], застосування традиційних систем керування в малопотужних ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО), особливо при їх роботі на низькошвидкісних турбулентних вітрах, супроводжується зниженням їх енергетичної ефективності. З урахуванням того, що саме такі вітри переважають на території України, постає завдання розроблення нових систем керування, які б забезпечували високу енергетичну ефективність при роботі в таких умовах.

Водночас щоразу більше останніх досліджень [3–5] підтверджують залежність аеродинамічних параметрів вітрогенератора (ВР) від швидкості вітру V_w , а створюваний вітропоток з швидкістю V_w момент залежатиме також ще й від температури ϑ навколишнього середовища. Неврахування вказаних умов роботи ВР призводитиме до відхилень від точок оптимальної роботи ВЕУ в усталених режимах (при постійних швидкостях вітру), що, у свою чергу, знижує кількість отриманої електричної енергії.

Метою роботи є підвищення енергоефективності роботи малопотужних ВЕУ з ВВО, що переважно працюють на малих турбулентних вітрах, шляхом удосконалення системи керування з використанням нечіткого регулятора.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Потужність та момент на валу ВР залежно від швидкості вітру V_w виражаються відомими залежностями [6]:

$$P_{wr} = 0,5 \rho A C_p(\lambda) V_w^3; \quad (1)$$

$$M_{wr} = 0,5 \rho A r \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} V_w^2, \quad (2)$$

де ρ – густина повітря; $A = \pi r^2$ – площа омивання ВР; $C_p(\lambda)$ – коефіцієнт використання ВР потужності вітру; λ – швидкохідність ВР; ω – кутова швидкість ВР; r – радіус ВР.

Швидкохідність ВР – це відношення максимальної лінійної швидкості його частини (краю ВР) до швидкості вітру:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_w}. \quad (3)$$

Залежність $C_p(\lambda)$, яка лежить в основі виразів (1) і (2), визначає у відносних одиницях конструктивні особливості ВР і зазвичай вважається незалежною від умов праці ВР. У подальшому цю залежність моделюватимемо одним із виразів, отриманих для ВР Дар'є з прямими лопатями – Н-типу [7]:

$$C_p(\lambda) = 1,14 \left(\frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) e^{-\frac{6}{\lambda}}. \quad (4)$$

Залежність (4), показана на рис. 1, має явно виражений максимум $C_{pmax} = 0,3514$ при оптимальному значенні швидкохідності ВР $\lambda_{opt} = 3,675$. При роботі ВР із швидкохідністю λ_{opt} він відбиратиме від вітру максимальну потужність, значення якої, відповідно до (1), буде пропорційне кубові швидкості вітру. При цьому оптимальні значення кутової швидкості ВР, відповідно до (3), будуть прямо пропорційні швидкості вітру:

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{r} V_w. \quad (5)$$

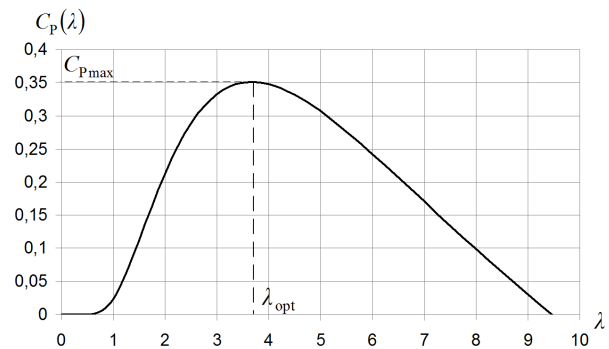


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта використання потужності вітру від швидкохідності ВР λ

Підставивши значення координат, що відповідають точці максимальної потужності, отримуваної ВР від вітру, а також швидкість вітру, визначену з (5), у вираз (2), отримаємо вираз для оптимального моменту на валу ВР у цій точці:

$$M_{wr,opt} = k_M \omega_{opt}^2, \quad (6)$$

де

$$k_M = 0,5 \rho A C_{pmax} \left(\frac{r}{\lambda_{opt}} \right)^3 - \quad (7)$$

сталий для конкретного ВР коефіцієнт.

На основі залежностей (6) і (7) ґрунтується основний спосіб бездавачевого (без давача швидкості вітру) керування ВЕУ, який полягає в тому, що момент навантаження ВР, який створюється електричним навантаженням генератора за допомогою напівпровідникового силового перетворювача, є пропорційним квадрату кутової швидкості ВР [8]. Такий спосіб є фактично керуванням за збуренням від швидкості вітру, а одним із його авторів є S. Morimoto [9].

При керуванні за збуренням на вхід електронного перетворювача подається такий сигнал завдання на момент (6), який відповідає оптимальному навантаженню при конкретній кутовій швидкості синхронного генератора з постійними магнітами (СПГМ) ω , яку можна виміряти як прямим, так і непрямим (через частоту напруги генератора) способами. При

цьому момент навантаження генератора буде меншим за оптимальний, якщо кутова швидкість генератора буде нижчою, ніж отримана за виразом (5) для конкретної швидкості вітру. І навпаки, момент навантаження генератора буде більшим за оптимальний, якщо кутова швидкість генератора буде вищою, ніж отримана за виразом (5) для конкретної швидкості вітру. В обох випадках це призводитиме до відповідно зростання чи спадання кутової швидкості генератора з ВР і прямування останньої до оптимального для конкретної швидкості вітру значення ω_{opt} , де ВЕУ працюватиме в усталеному для цієї швидкості режимі в точці максимуму залежності $C_{Pmax}(\lambda_{opt})$ (рис. 1).

Особливістю й перевагою системи керування за Morimoto є те, що вона без перерегулювання знаходить необхідну точку оптимального навантаження за відсутності інформації про швидкість вітру. Проте при високотурбулентних вітрах із малими швидкостями в малопотужних ВЕУ її застосування характеризується зниженням ефективності через низьку швидкодію. Тому із задачею швидкого пошуку точки максимального відбору потужності від вітру краще справляється система керування за відхиленням кутової швидкості ВР від оптимальної, визначеної з (5). Однак для цього необхідно мати давач швидкості вітру чи естиматор для її розрахунку за іншими координатами та параметрами системи.

Як показали дослідження останніх років [3, 4], аеродинамічна характеристика ВР $C_p(\lambda)$, яка зазвичай приймається сталою, змінюється зі швидкістю вітру за закономірністю, яку відображено на рис. 2 сімейством кривих для досліджуваного ВР. У цьому сімействі крива, показана на рис. 1, відповідає швидкості вітру 6 м/с. Залежності, показані на рис. 2, описуються на основі (4) виразом

$$C_p(\lambda, V_w) = 1,14 \left(\frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) e^{-\frac{f(V_w)}{\lambda}}, \quad (8)$$

де $f(V_w) = 0,003869V_w^2 - 0,128V_w + 6,627$.

Як видно з рис. 2, зі зміною швидкості вітру буде змінюватися робоча точка оптимальної з аеродинамічної точки зору роботи ВЕУ, оскільки змінюватимуться параметри $\lambda_{opt}(V_w)$ і $C_{Pmax}(V_w)$.

Крім цього, як видно з рис. 3, густина повітря залежить від його температури ϑ та висоти над рівнем моря h [10]. Для висоти над рівнем моря 0 м температурну залежність густини повітря на підставі рис. 3 можна описати виразом

$$\rho(\vartheta) = 0,00001661\vartheta^2 - 0,004764\vartheta + 1,2924. \quad (9)$$

Залежність (9) разом з параметрами точки максимуму потужності $C_{Pmax}[\lambda_{opt}(V_w), V_w]$ змінюють закон (6) оптимального навантаження ВР моментом, створюваним генератором, через відповідний вплив

на величину коефіцієнта регулювання k_M (7), який з урахуванням умов роботи ВЕУ набуде вигляду

$$k_M(V_w, \vartheta) = 0,5 \rho(\vartheta) A C_{Pmax}(V_w) \left[\frac{r}{\lambda_{opt}(V_w)} \right]^3. \quad (10)$$

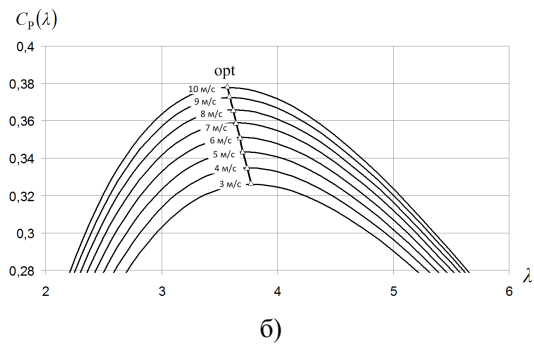
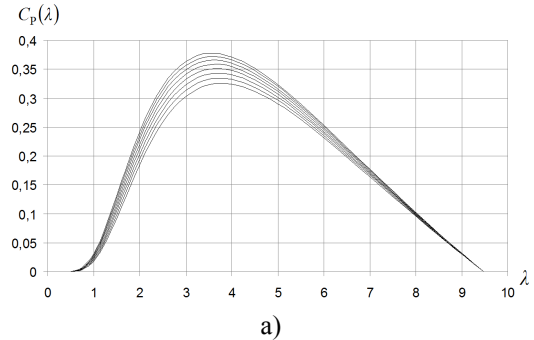


Рисунок 2 – Залежності $C_p(\lambda)$ при різних швидкостях вітру для досліджуваного ВР: а) загальний вигляд; б) фрагмент в околі точок максимуму

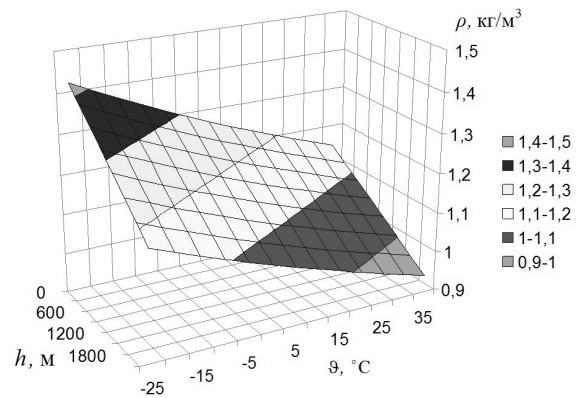


Рисунок 3 – Залежність густини повітря ρ від температури повітря ϑ і висоти над рівнем моря

Неврахування в залежності (10) впливів швидкості вітру й температури повітря призводитиме до відхилень від точок оптимальної з аеродинамічної точки зору роботи ВЕУ в усталених режимах (при постійних швидкостях вітру) й зниження кількості отриманої енергії.

Робота ВЕУ в усталеному режимі в точках максимуму характеристики $C_p(\lambda, V_w)$ забезпечує максимальний відбір потужності ВР від вітру, проте це не означає, що отримана на виході електрична потужність буде максимальною. Це пов'язано з тим, що потік потужності від вітропотуку проходить через ланцюг перетворень, який складається, як мінімум, з ВР та генератора. Оскільки метою роботи ВЕУ є максимум отриманої електроенергії, то критерієм ефективності відбору потужності від вітру є мінімум сумарних втрат потужності у ВР та СГПМ. Аналіз показує, що цьому мінімуму відповідає робоча точка на кривій $C_p(\lambda, V_w)$, дещо зміщена від точки $C_{pmax}[\lambda_{opt}(V_w), V_w]$. При цьому знижується ефективність відбору ВР потужності від вітру (зростають аеродинамічні втрати потужності), проте зростає ККД генератора (знижуються втрати потужності в ньому). Сумарні ж втрати потужності у системі ВР–СГПМ стають мінімальними, що забезпечує максимальну потужність електроенергії на виході ВЕУ. Для ВЕУ з конкретними параметрами ВР та СГПМ для заданих умов праці (V_w, ϑ) такій точці оптимальної роботи відповідатиме оптимальне з електроенергетичної точки зору значення кутової швидкості ВР з генератором $\omega_{opt.e}$. Для отримання масиву таких точок, як функції умов праці ВЕУ, необхідно побудувати математичну модель, що відображає процес перетворення потужності в системі, причому всі змінні повинні бути функціями кутової швидкості ω .

Електрична потужність на виході генератора становить

$$P_{el}(\omega) = P_{em}(\omega) - \Delta P_g(\omega), \quad (11)$$

де $P_{em}(\omega)$ – електромагнітна потужність генератора; $\Delta P_g(\omega)$ – втрати потужності в генераторі.

Електромагнітну потужність генератора можна виразити через його електромагнітний момент $M_{em}(\omega)$:

$$P_{em}(\omega) = M_{em}(\omega)\omega, \quad (12)$$

а значення останнього в усталеному режимі (за постійної кутової швидкості) можна знайти з рівняння балансу моментів на валу, що зв'язує ВР з генератором:

$$M_{em}(\omega) = M_{wr}(\omega) - M_{st} - M_{wr}(\omega), \quad (13)$$

де M_{st} – момент сухого тертя на валу; $M_{wr}(\omega) = b\omega$ – момент в'язкого тертя на валу; b – коефіцієнт в'язкого тертя.

Момент ВР як функцію його кутової швидкості та умов праці отримуємо на основі (2) з урахуванням (8) та (9):

$$M_{wr}(\omega) = 0,5 \rho(\vartheta) A r \frac{C_p(\lambda, V_w)}{\lambda} V_w^2. \quad (14)$$

Втрати потужності в генераторі у випадку багатополосного СГПМ практично зводяться до втрат у міді обмоток якоря, оскільки на малих швидкостях вітру, коли електричне навантаження генератора невелике, його кутова швидкість, а отже, і втрати в сталі є теж невеликими, а на великих швидкостях вітру й високих частотах обертання, коли втрати в сталі зростають, потужність електричного навантаження зростає в кубі до кутової швидкості й втрати в міді є значно переважаючими.

Найефективніше формувати електричне навантаження СГПМ можна за допомогою напівпровідникового активного випрямляча напруги (АВН) з векторним керуванням проєкціями струму якоря генератора в обертовій з його ротором системі координат dq , зорієнтованій віссю d у напрямку потоку пари полюсів постійних магнітів [11]. Загальну функціональну схему автономної ВЕУ з ВВО наведено на рис. 4. До складу силового енергетичного каналу системи входять ВР, СГПМ, АВН мостового типу на IGBT транзисторах, акумуляторна батарея (АБ) та коло навантаження, під'єднане паралельно до АБ. Система керування реалізована на мікроконтролері, до якого підключені: абсолютний багатоточковий давач положення ротора – енкодер Е, давачі швидкості вітру й температури повітря з метеорологічної станції, а також три давачі фазних струмів генератора ДС, побудовані на ефекті Хола. Система керування АВН – векторного типу, з формуванням узагальненого вектора струму якоря генератора за напрямком вектора його узагальненої ЕРС, тобто фазні струми генератора повинні співпадати за фазою з відповідними фазними ЕРС. Регулювання фазних струмів відбувається в замкнених системах із гістерезисними регуляторами струмів ГРС. Таке векторне керування навантаженням генератора забезпечує в усталених та перехідних режимах значення $\cos \varphi = 1$, що суттєво знижує втрати енергії в обмотках генератора при середніх та високих швидкостях вітру [12].

У випадку розміщення постійних магнітів генератора на поверхні його ротора, що й реалізується в багатополосних СГПМ, індуктивності обмотки якоря відносно осей d і q є однаковими: $L = L_d = L_q$. У такому разі мінімум втрат у міді обмотки якоря досягається при керуванні струмом якоря за умовою $I_d = 0$. При цьому струм якоря генератора формується синфазно до ЕРС його обертання, амплітуда якої дорівнює:

$$E(\omega) = p \Phi_m \omega, \quad (15)$$

де p – кількість пар полюсів СГПМ; Φ_m – амплітуда потокозчеплення обмотки якоря, зумовленого однією парою полюсів магнітів.

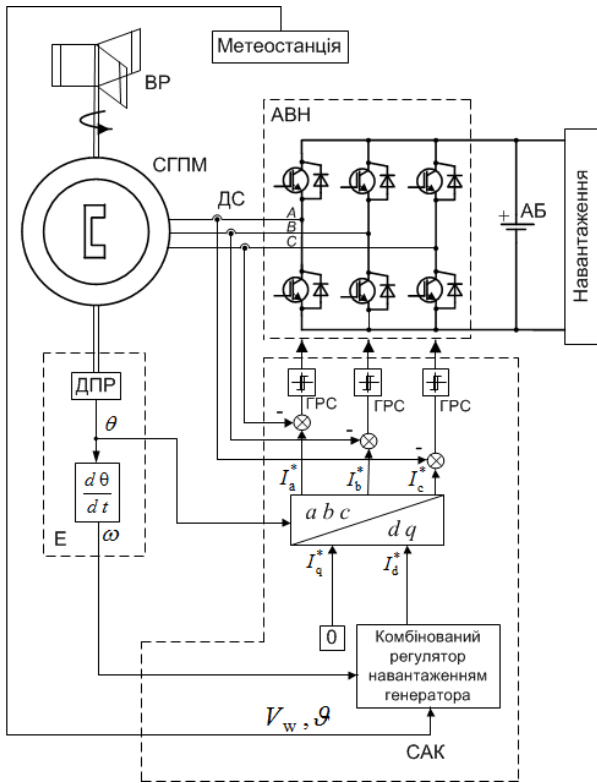


Рисунок 4 – Загальна функціональна схема системи автономної ВЕУ з ВВО

Величина амплітуди струму, необхідної для продукування електромагнітного моменту $M_{em}(\omega)$, становить

$$I(\omega) = \frac{2}{3} \frac{\omega M_{em}(\omega)}{E(\omega)} \quad (16)$$

Втрати в міді обмотки якоря СГПМ від протікання струму дорівнюють:

$$\Delta P_g(\omega) = \frac{3}{2} I^2(\omega) R, \quad (17)$$

де R – активний опір фазної обмотки якоря.

Підставивши в (11) вирази (12)–(17), отримаємо функцію електричної потужності на виході СГПМ від його кутової швидкості $P_{el}(\omega)$ за конкретних умов праці ВЕУ – швидкості вітру V_w і температури повітря ϑ . Дослідження цієї функції на максимум дає змогу визначити оптимальні з електроенергетичної точки зору точки роботи ВЕУ значення кутової швидкості ВР – $\omega_{opt.e}$. Для вирішення таких задач чисельним способом розроблено програму в середовищі MathCad.

Для подальших досліджень взято ВЕУ з ВВО з номінальною вихідною потужністю 1 кВт при швидкості вітру 10 м/с. Розраховані значення параметрів основних елементів такої ВЕУ є наступними.

ВР: трилопатевий Н типу, радіус 1,4 м, площа омивання 5,258 м², аеродинамічна характеристика

$C_p(\lambda, V_w)$ показана на рис. 2.

СГПМ: номінальна потужність $P_{g,n} = 1000$ Вт, номінальна кутова швидкість $\omega_{g,n} = 27$ рад/с, $p = 20$, $\Phi_m = 0,13$ Вб, $R = 0,35$ Ом, $L = 4$ мГн.

Механічна частина ВЕУ: сумарний момент інерції ВР разом з ротором генератора $J = 19$ кг·м², $M_{st} = 1,5$ Н·м, $b = 0,05$ Н·м·с.

Використовуючи наведені параметри, за розробленою програмою проведено серії розрахунків $\omega_{opt.e}$ для ВЕУ, яка працює з різними швидкостями вітру та за різними температурами повітря (рис. 5).

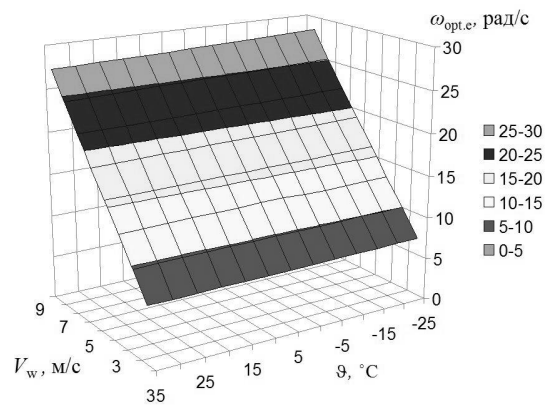


Рисунок 5 – Залежність оптимальної з електроенергетичної точки зору кутової швидкості ВР від швидкості вітру V_w і температури повітря ϑ

Як видно з отриманих результатів, для конкретної швидкості вітру отримані оптимальні з електроенергетичної точки зору значення $\omega_{opt.e}$, а отже, і значення $\lambda_{opt.e}(V_w) = \omega_{opt.e} r / V_w$ та $C_{Popt.e}(V_w)$, відповідно до виразу (8), практично не залежать від температури, тому в подальшому враховуватимемо лише їх залежності від V_w . На рис. 6 показано, як розміщено точки оптимальної з електроенергетичної точки зору роботи ВЕУ порівняно з точками, оптимальними з аеродинамічної точки зору. Для оцінки зсуву точок максимальної електричної потужності відносно відповідних точок максимальної механічної потужності на рис. 7 зображено залежності $\lambda_{opt.e}(V_w) / \lambda_{opt}(V_w)$ та $C_{Popt.e}(V_w) / C_{Pmax}(V_w)$ від V_w . Відповідно до нових точок оптимальної роботи ВЕУ $C_{Popt.e}[\lambda_{opt.e}(V_w), V_w]$, а також до значень температури повітря, будуть змінюватися й нові значення коефіцієнта $k_{M.e}(V_w, \vartheta)$, який визначає оптимальний з точки зору отримуваної на виході ВЕУ електричної потужності момент навантаження на валу ВР відповідно до виразу (10). Їх доцільно надати у вигляді добутку базового значення сталого коефіцієнта $k_M = 0,06282$ Н·м·с², визначеного за виразом (7) для не залежної від умов праці ВР характеристики

$C_p(\lambda)$, показаної на рис. 1, та коефіцієнта корекції вказаного базового значення k_M :

$$k_\kappa(V_w, \vartheta) = \frac{k_{M.e}(V_w, \vartheta)}{k_M} \quad (18)$$

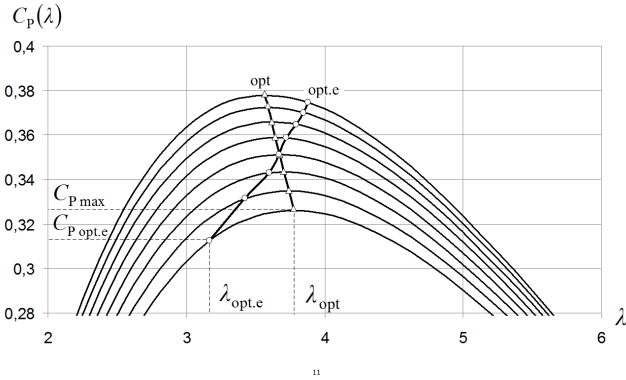


Рисунок 6 – Положення оптимальних робочих точок ВЕУ на кривих $C_p(\lambda, V_w)$: *opt* – оптимальні з аеродинамічної точки зору, *opt.e* – оптимальні з електроенергетичної точки зору

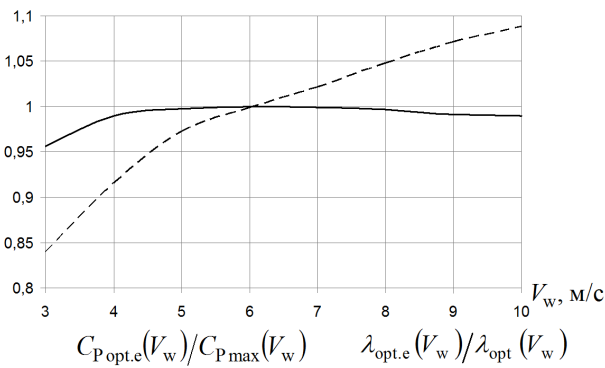


Рисунок 7 – Залежності відносних змін координат точок, оптимальних з електроенергетичної та аеродинамічної точок зору, від швидкості вітру

За такого оптимального навантаження ВЕУ генеруватиме при сталих значеннях швидкості вітру й температури повітря максимальну вихідну електричну потужність (рис. 8).

Для on-line отримання значень коефіцієнта корекуючого зворотного зв'язку за збуреннями швидкості вітру й температури $k_{M.e}(V_w, \vartheta)$ доцільно застосувати нечіткий коректор. Нечітка логіка знаходить щоразу більше використання в сучасних системах керування, зокрема й ВЕУ [13–15].

На рис. 9 зображено вибрані функції належності першого входу (а) нечіткого коректора, на який поступає сигнал швидкості вітру, та другого входу (б), яким є температура навколишнього середовища. Приведені функції належності охоплюють реальні діапазони зміни вказаних збурюючих чинників. Функції належності швидкості вітру розташовані

густіше в ділянці низьких швидкостей вітру, де найбільше проявляється ефект від корекції коефіцієнта k_M .

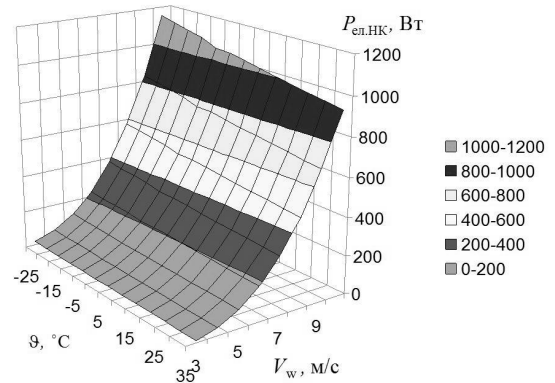


Рисунок 8 – Залежність вихідної електричної потужності на виході ВЕУ від швидкості вітру й температури повітря

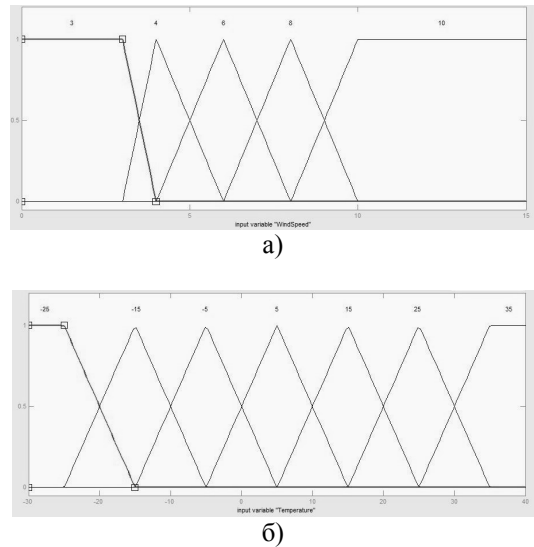


Рисунок 9 – Функції належності входів нечіткого коректора: а) перший вхід – швидкість вітру; б) другий вхід – температура повітря

Базуючись на отриманих даних про коефіцієнт $k_{M.e}(V_w, \vartheta)$, який визначає оптимальний момент навантаження на валу ВР, в табл. 1, відповідно до виразу (18), записано базу правил для нечіткого коректора, на виході якого отримуємо $k_\kappa(V_w, \vartheta)$.

Таблиця 1 – База правил нечіткого коректора

| $V_w, \text{ м/с}$ | $\vartheta, \text{ }^\circ\text{C}$ | -25 | -15 | -5 | 5 | 15 | 25 | 35 |
|--------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3 | k_κ | 1,505 | 1,468 | 1,440 | 1,409 | 1,386 | 1,359 | 1,340 |
| 4 | | 1,260 | 1,228 | 1,199 | 1,169 | 1,145 | 1,122 | 1,098 |
| 6 | | 1,109 | 1,078 | 1,050 | 1,024 | 0,999 | 0,975 | 0,953 |
| 8 | | 1,038 | 1,012 | 0,987 | 0,963 | 0,940 | 0,919 | 0,900 |
| 10 | | 0,972 | 0,947 | 0,926 | 0,908 | 0,895 | 0,874 | 0,856 |

Враховуючи те, що на виході нечіткого коректора нам потрібно отримувати значення коефіцієнта $k_k(V_w, \vartheta)$, які є відомими в точках, показаних в табл. 1, доцільно застосувати нечітку базу знань Сугено [16]. Сформовану поверхню «входи–вихід нечіткого коректора» зображено на рис. 10.

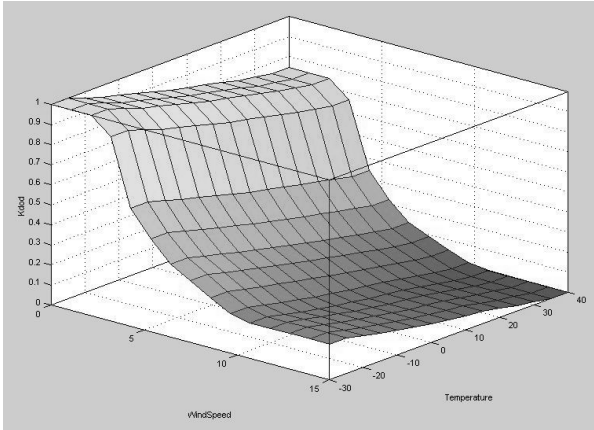


Рисунок 10 – Залежність виходу нечіткого коректора від його двох входів

Для оцінки енергетичної ефективності роботи розробленого нечіткого коректора порівняємо значення отримуваних досліджуваною ВЕУ вихідних електричних потужностей при застосуванні нечіткого коректора $P_{el.FL}(V_w, \vartheta)$ за конкретних умов роботи з аналогічними значеннями при застосуванні коректора за Моримото $P_{el.M}(V_w, \vartheta)$. Оцінку здійснюватимемо за допомогою коефіцієнта відносної енергетичної ефективності

$$k_{ef.e}(V_w, \vartheta) = \frac{P_{el.FL}(V_w, \vartheta)}{P_{el.M}(V_w, \vartheta)} \quad (19)$$

Залежність $P_{el.FL}(V_w, \vartheta)$, отриману на основі розробленої математичної моделі, приведено на рис. 8.

Залежність $P_{el.M}(V_w, \vartheta)$ необхідно отримати з урахуванням того, що параметри й характеристики реального ВР залежать від умов його роботи (V_w, ϑ) , а значення коефіцієнта k_M є незмінним. Воно обчислюється відповідно до виразу (7) і в даному дослідженні відповідає характеристикі $C_p(\lambda)$, що описується виразом (4), який відповідає середній швидкості вітру $V_w = 6$ м/с та середньому значенню температури $\vartheta = 13^\circ\text{C}$: $k_M = 0,06282 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$. При такому керуванні за Моримото на реальних залежних від швидкості вітру характеристиках ВР (8), а також залежній від температури густини повітря (9) ВЕУ прямуватиме до роботи в нових точках усталеного режиму. Відповідно до принципу керування за Моримото, їх можна знайти, порівнявши реальний момент, що розвивається ВР, до моменту його навантаження, що визначається за Моримото й формується генератором:

$$0,5\rho(\vartheta)A r \frac{C_p[\lambda(\omega, V_w), V_w]}{\lambda(\omega, V_w)} V_w^2 = k_M \omega^2 \quad (20)$$

Розв'язки нелінійного рівняння (20) для конкретних умов роботи ВЕУ дають значення робочих кутових швидкостей ВР при керуванні за Моримото $\omega_M(V_w, \vartheta)$. Як показали дослідження, ці точки, на відміну від керування за допомогою нечіткого коректора, залежать також і від температури, як показано на рис. 11.

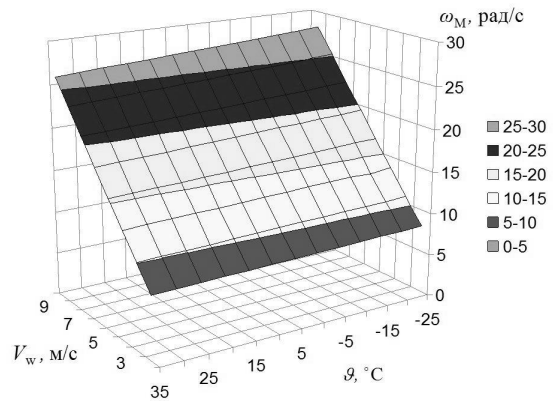


Рисунок 11 – Залежність робочої кутової швидкості ВР ω_M при керуванні за Моримото від швидкості вітру й температури повітря

Виходячи з отриманих значень $\omega_M(V_w, \vartheta)$, знаходяться відповідні значення робочих точок на кривих $C_p(\lambda, V_w)$ (рис. 12).

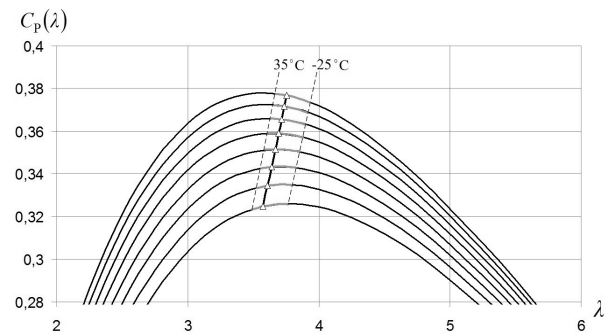


Рисунок 12 – Положення робочих точок ВР при керуванні за Моримото за різними значеннями швидкості вітру й температури повітря

За отриманими значеннями робочої точки ВЕУ, керованої за Моримото, обчислено відповідні значення вихідної електричної потужності за різними значеннями швидкості вітру й температури повітря $P_{el.M}(V_w, \vartheta)$. Зіставивши їх із відповідними значеннями вихідної електричної потужності ВЕУ, керованої за допомогою нечіткого коректора, отримано, відповідно до виразу (17), значення коефіцієнта відносної енергетичної ефективності (рис. 13).

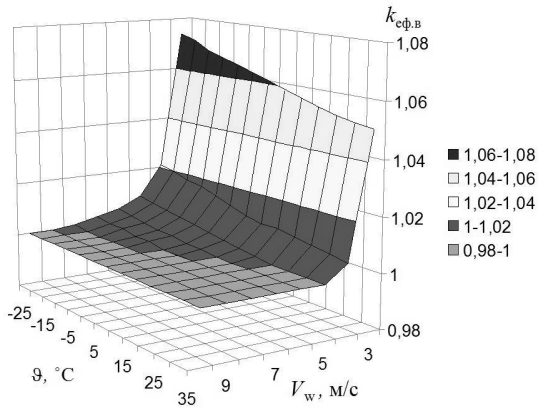


Рисунок 13 – Залежність відносної енергетичної ефективності роботи БЕУ з нечітким коректором порівняно з аналогічною БЕУ з коректором за Могімото від швидкості вітру й температури повітря

Оскільки в системі повинен бути присутній двач швидкості вітру, то доцільно розвинути структуру системи керування, додавши до регулювання за збуренням ще й регулювання за відхиленням. Це особливо доцільно при роботі на вітрах з низькою швидкістю, коли механічна стала часу ВР зростає [2]. На рис. 14 надано структуру комбінованого регулятора: за відхиленням від оптимальної кутової швидкості та за збуренням від швидкості вітру й температури повітря.

Регулювання за збуренням здійснюється розробленим вище нечітким коректором НК. Його вихідний сигнал у вигляді відносних значень коректуючого коефіцієнта k_k денормується за виразом $x = x_{min} + x^*(x_{max} - x_{min})$, отриманим з (19). Абсолютне значення отриманого коефіцієнта k_k після множення на базове значення коефіцієнта

$k_M = 0,06282 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ та ω^2 дає значення оптимального моменту навантаження ВР M_{opt} .

Регулювання за відхиленням здійснюється за допомогою пропорційного регулятора швидкості РШ, на вході якого порівнюються сигнали завдання та від'ємного зворотного зв'язку за вимірюваною кутовою швидкістю генератора з ВР ω . Сигнал завдання на оптимальну кутову швидкість отримується з вимірної швидкості вітру за виразом $\omega_{opt,e} = \lambda_{opt,e}(V_w)/r$.

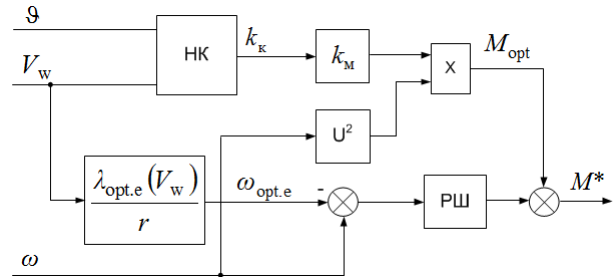


Рисунок 14 – Структурна схема комбінованого регулятора

Величина коефіцієнта передачі РШ визначає швидкість регулювання. Як показали дослідження [18], існує так звана оптимальна швидкість роботи БЕУ, за якою сума аеродинамічних втрат потужності ВР та електричних втрат потужності в обмотках СГПМ є мінімальною. Значення коефіцієнта передачі РШ, який забезпечує оптимальну швидкість, можна знайти лише шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання.

Комп'ютерну модель БЕУ із вказаними параметрами, побудовану в середовищі MATLAB/Simulink відповідно до показаної на рис. 4 функціональної схеми, зображено на рис. 15 [2].

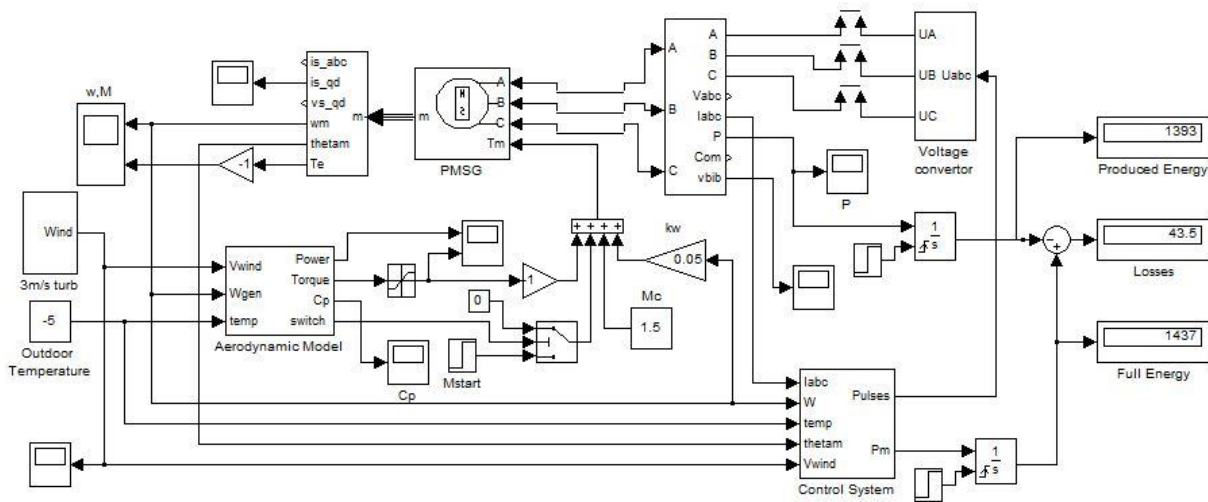


Рисунок 15 – Комп'ютерна модель БЕУ, побудована в середовищі MATLAB/Simulink

Комп'ютерна модель ВЕУ складається з таких основних функціональних блоків:

- Wind 3 m/s turb – підсистема турбулентного вітропотoku із середньою швидкістю вітру 3 м/с;
- Aerodynamic Model – підсистема моделі ВР з урахуванням зміни залежності $C_p(\lambda)$ від швидкості вітру й температури;
- PMSG – стандартна модель СГПМ, взята з бібліотеки MATLAB/Simulink;
- Control System – підсистема керування електричним навантаженням генератора ВЕУ;
- Voltage Converter – підсистема імітації навантаження на активний випрямляч.

Підсистема турбулентного вітропотoku реалізована на базі попередніх досліджень [17] і дає змогу достатньо вірогідно відтворити турбулентний вітропотік. Середня швидкість симульованого вітру взята невисокою – 3 м/с, за якої максимально проявляються переваги описаної вище системи керування ВЕУ над стандартною за Morimoto.

Аеродинамічна модель ВР (Aerodynamic Model) виступає перетворювачем енергії вітру в механічний момент, який прикладається до СГПМ. У підсистемі реалізовано залежність $C_p(\lambda)$ за виразом (8), яка залежить від швидкості вітру. Також в аеродинамічній моделі враховано вплив температури навколишнього середовища на густину повітря $\rho(\theta)$.

Підсистема керування навантаженням генератора ВЕУ (Control System) складається з комбінованого регулятора, структуру якого зображено на рис. 14, та системи векторного керування АВН.

Комбінований регулятор складається з нечіткого коректора, який перетворює входні сигнали швидкості вітру й температури повітря згідно із залежністю, зображеною на рис. 10. Оскільки електромагнітний момент СГПМ при розміщенні магнітів на поверхні ротора та векторному керуванні струму якоря дорівнює

$$M = \frac{3}{2} p \Phi_m I_q, \quad (21)$$

то при завданні на проекцію струму якоря $I_d^* = 0$ завдання на проекцію струму по осі q формується за виразом

$$I_q^* = \frac{2}{3p \Phi_m} (M_{opt} - M_{st} - b\omega). \quad (22)$$

Пропорційний коефіцієнт РШ, який забезпечує оптимальну швидкість системи й становить 0,28, було знайдено експериментально шляхом комп'ютерного симулювання.

На вхід системи векторного керування АВН поступають сигнали кутового положення ротора θ та струми трьох фаз генератора I_{abc} . Із сигналу кута положення ротора в електричних градусах встановлюються значення \sin і \cos , які поступають разом із

визначеним завданням I_q^* та заданим $I_d^* = 0$ на блоки зворотних перетворень координат Парка і Кларка.

За отриманими сигналами завдання фазних струмів I_a^* , I_b^* , I_c^* та вимірними за давачами значеннями струмів якоря I_a , I_b , I_c у підсистемі реалізовано систему гістерезисного регулювання фазних струмів якоря СГПМ.

З метою симулювання роботи системи на тривалих відтинках часу імпульсне навантаження СГПМ на активний випрямляч імітовано гладкими функціями. При цьому АВН з ШІМ замінено трьома віртуальними керованими джерелами напруги. Останні керуються системою векторного керування й забезпечують еквівалентне АВН, але гладке навантаження СГПМ.

За допомогою блока зворотних перетворень координат Парка і Кларка в підсистемі Control System також реалізовано обчислення фазних ЕРС обертання СГПМ E_{abc} , які разом із фазними струмами I_{abc} використовуються для отримання значень електромагнітної потужності генератора.

Порівняння ефективності ВЕУ, керованою за Morimoto, та системою керування з комбінованим регулятором проведено шляхом комп'ютерного симулювання їх роботи протягом 300 с на турбулентному вітрі із середньою швидкістю 3 м/с (рис. 16) при температурі навколишнього середовища -5°C . З метою отримання адекватних результатів симулювання починається й закінчується в усталеному режимі роботи при стабільній швидкості вітру 3 м/с. На рис. 17–20 приведено отримані осцилограми основних координат роботи ВЕУ.

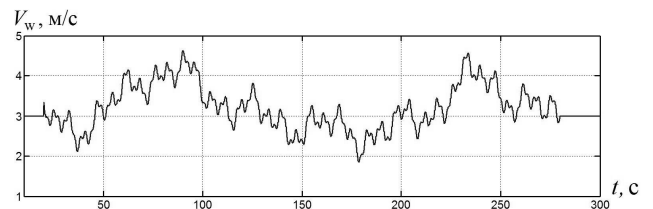


Рисунок 16 – Осцилограма змодельованого турбулентного вітропотoku із середньою швидкістю вітру 3 м/с

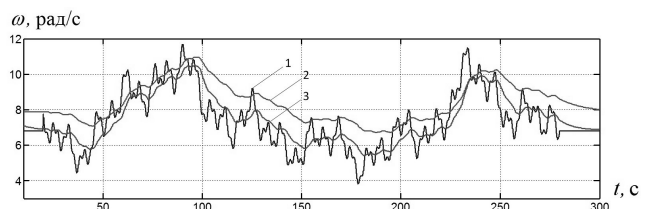


Рисунок 17 – Осцилограми кутової швидкості ВР: 1 – оптимальна з електроенергетичної точки зору $\omega_{opt.e}$; 2 – ВЕУ, керованої за системою Morimoto; 3 – ВЕУ, керованої комбінованим регулятором

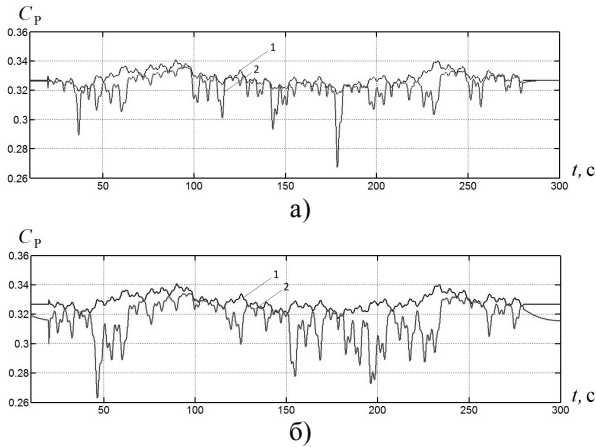


Рисунок 18 – Осцилограми коефіцієнта відбору ВР потужності вітру C_p : 1 – максимально можливого з аеродинамічної точки зору; 2 – для ВЕУ, керованої за системою Morimoto (а) та керованої комбінованим регулятором (б)

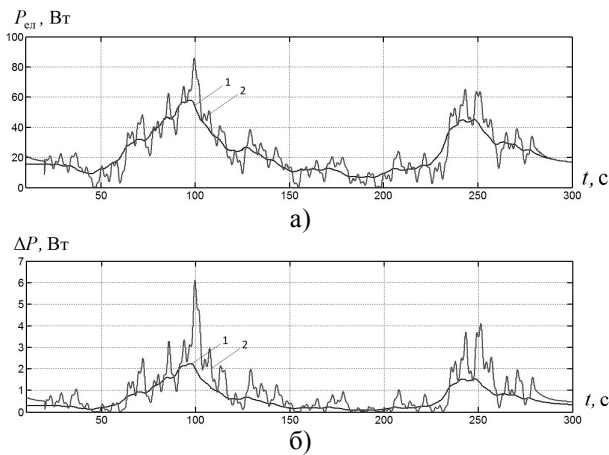


Рисунок 19 – Осцилограми електричної потужності на виході ВЕУ (а) та потужності втрат у генераторі (б) за різними системами керування: 1 – за Morimoto; 2 – з комбінованим регулятором

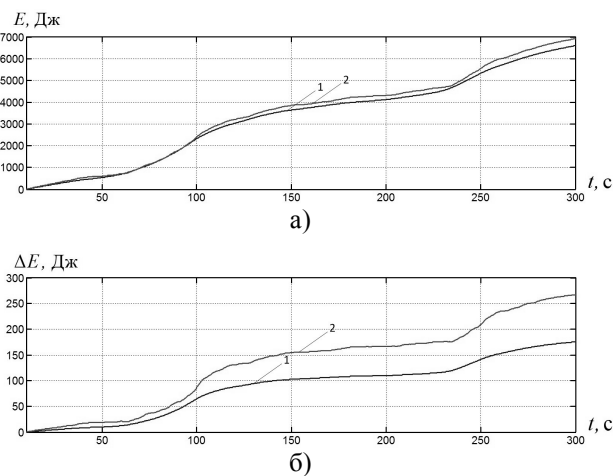


Рисунок 20 – Осцилограми електричної енергії, інтегрованої за час роботи ВЕУ (а) та втрат енергії в обмотках генератора (б) за різними системами керування: 1 – за Morimoto, 2 – з комбінованим регулятором

Як видно з отриманих осцилограм, ВЕУ, керована розробленим комбінованим регулятором, характеризується кращою (оптимальною) динамікою порівняно з керуванням за Morimoto (рис. 17). Вона забезпечує кращий відбір ВР потужності від вітру (рис. 18). При цьому втрати енергії в обмотках СГПМ дещо зростають (рис. 20,б), але сумарна отримана на виході ВЕУ електрична енергія зростає порівняно з керуванням за Morimoto на 4,9 % (рис. 20,а).

ВИСНОВКИ. Урахування в системі керування ВЕУ з ВВО залежності аеродинамічних параметрів ВР від зміни умов роботи – перш за все, швидкості вітру й температури повітря – дало змогу знайти оптимальні з точки зору отримуваної на виході ВЕУ електричної потужності значення коефіцієнта регулювання за збуренням кутової швидкості ВР $k_M(V_w, \theta)$. Це забезпечило, порівняно з традиційним бездавачевим керуванням за Morimoto, зростання генерованої ВЕУ електричної потужності в усталених режимах роботи, яке особливо проявляється на малих вітрах і може досягати понад 7 % (рис. 13).

Застосування нечіткого коректора дало можливість простої й ефективної реалізації отриманих складних функціональних залежностей коефіцієнта регулювання за збуренням від найбільш дієвих координат, що характеризують умови роботи ВЕУ, – швидкості вітру й температури повітря.

Наявність у системі регулювання давача швидкості вітру дало змогу створити комбінований регулятор оптимального навантаження ВЕУ, додавши до регулювання за збуренням швидкості вітру ще й регулювання за відхиленням кутової швидкості ВР від оптимального значення. Підбір оптимального значення пропорційного регулятора кутової швидкості забезпечив прискорення регулювання порівняно із системою за Morimoto, що дало додаткове підвищення генерованої електричної енергії, особливо на малих вітрах.

Давач швидкості вітру в розробленій системі комбінованого керування відіграє допоміжну роль, коректуючи базове значення коефіцієнта k_M при зміні швидкості вітру та форсуючи перехідні процеси кутової швидкості ВР на турбулентних вітрах. Виходячи з цього, до точності вимірювання швидкості вітру не ставляться високі вимоги, тому цей давач може бути простим і недорогим.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bianchi F., Battista H., Mantz R. Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design. – London: Springer, 2007. – 206 p.
2. Щур І., Щур В. Оптиміальне керування вітроустановками різної потужності в умовах турбулентних вітрів // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту «Львівська політехніка». – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2012. – Вип. 736. – С. 146–152.
3. Goude A., Bülow F. Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system

with passive rectifiers and mutual DC-bus // *Renewable Energy*. – 2013. – Iss. 60. – PP. 284–292.

4. Jiang J., Zheng X., Zhang L., Li Z., He L. Aerodynamic performance of a double-H type vertical-axis wind turbine: designed by a stream-tube and CFD method // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 346. – PP. 90–95.

5. Pourrajabian A., Mirzaei M., Ebrahimi R., Wood D. Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran // *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.* – 2014. – Iss. 126. – PP. 1–10.

6. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В. Кривцов, А. Олейников, А. Яковлев. – Харьков: ХАИ, 2004. – 261 с.

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

8. Tan K., Islam S. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors // *IEEE Trans. on Energy Convers.* – 2004. – Iss. 19/2004 (2). – PP. 392–399.

9. Marimoto S., Nakayama H., Sanada M., Takeda Y. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG // *IEEE Trans. on Ind. Electron.* – 2005. – Iss. 41 (1). – PP. 60–67.

10. The Free Encyclopedia Wikipedia. Density of air. – *Електронний ресурс*. – 2014. – Режим доступу: http://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air.

11. Щур І., Турленко О. Енергетична ефективність різних способів відбору потужності від синхронного генератора з постійними магнітами у вітроенергоустановці // *Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту «Львівська*

політехніка». – Львів: Вид-во Націон. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. – Вип. 654. – С. 272–277.

12. Bose B. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.

13. Wang Q., Chang L. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems // *IEEE Trans. on Power Electronics*. – 2006. – Iss. 19 (5). – PP. 1242–1249.

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

15. Eltamaly A.M., Farh H.M. Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control // *Electric Power Systems Research*. – 2013. – Iss. 97. – PP. 144–150.

16. MATLAB&Toolboxes. Проектирование систем управления // *Fuzzy Logic Toolbox*. Штовба С.Д. «Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику». – *Електронний ресурс*. – Режим доступу: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/>.

17. Щур В. Математична модель турбулентного вітропотоків для комп'ютерного і фізичного моделювання роботи вітроустановок // *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Матер. X Міжн. наук.-техн. конф. мол. учених і спец., 28–29 березня 2012 р., м. Кременчук*. – Кременчук: Кременч. націон. ун-т імені Михайла Остроградського. – С. 199–200.

18. Щур І., Білецький Ю. Енергоформуюче оптимальне керування навантаженням вітроелектроустановки з синхронним генератором на постійних магнітах // *Наук. праці Донецького націон. техн. ун-ту, серія «Електротехніка і енергетика»*. – 2013. – Вип. 2 (15). – С. 286–292.

CONTROL SYSTEM FOR WIND TURBINE BASED ON FUZZY LOGIC CONTROLLER IN VIEW OF AERODYNAMIC CHANGES OF WIND ROTOR PARAMETERS

A. Lozynsky, V. Shchur

Lviv Polytechnic National University

vul. Stepana Bandery, 12, Lviv, 79000, Ukraine. E-mail: lozynsky@polynet.lviv.ua, vsevolod.shchur@gmail.com

For a more extensive development of small wind energy there is a need to improve the known control algorithms of wind turbines (WT) in order to improve their energy efficiency. For the research has been selected vertical axis WT with one kilowatt rated power. The most common way to control such WT is to regulate generator's load torque proportionally to the square of its angular velocity – perturbation regulation by the wind speed. This control system provides the maximum wind power point tracking, but has a low speed, especially at low wind speeds and turbulence. This factor, as well as changes in the aerodynamic characteristics of wind rotor depending on environmental parameters, such as wind speed and air temperature reduces the amount of generated by WT power. This article presents the developed WT's control system, which allows on-line to determine the optimal in terms of the maximum output electric power load torque for vector controlled synchronous generator with permanent magnets, during the influences of mentioned disturbing factors. Such control system based on a fuzzy logic controller, which receives input signals of the wind speed and air temperature. On the output of controller is generator's load torque correction signal. To improve the dynamic characteristics of the system, to the perturbation regulator is added deviation regulator of the angular velocity of the wind rotor. The power efficiency of the proposed solution was tested using computer simulation in MATLAB/Simulink workspace. New developed WT's control system was compared with traditional one on simulated turbulent winds. The results of the research confirmed the increase of produced by WT's generator energy during test period to 7%, compared with the traditional control system, depending on the environmental parameters.

Key words: wind turbine, vertical axis wind rotor, fuzzy logic controller.

REFERENCES

1. Bianchi, F., Battista, H. and Mantz, R. (2007), *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer, London.
2. Shchur, I. and Shchur, V. (2012), "Optimal control of wind turbines with different rated power in conditions of turbulent winds", *Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska Politehnika"*, Vol. 736, pp. 146–152. (in Ukrainian)
3. Goude, A. and Bülow, F. (2013), Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system with passive rectifiers and mutual DC-bus, *Renewable Energy*, Vol. 60, pp. 284–292.
4. Jiang, J., Zheng, X., Zhang, L., Li, Z. and He, L. (2012), "Aerodynamic performance of a double-H type vertical-axis wind turbine: designed by a stream-tube and CFD method", *Advanced Materials Research*, Vol. 346, pp. 90–95.
5. Pourrajabian, A., Mirzaei, M., Ebrahimi, R. and Wood, D. (2014), "Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran", *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn*, Vol. 126, pp. 1–10.
6. Kryvtsov, V., Oleynikov, A. and Yakovlev, A. (2004), *Neischerpayemaya energiya. Kn. 2. Vetroenergetika* [Inexhaustible energy. Vol. 2. Wind energy], KhAI, Kharkiv. (in Russian)
7. Helle, L. and Blaabjerg, F. (2002), "Wind turbine systems", *Control in Power Electronics, Academic Press*, pp. 483–510.
8. Tan, K. and Islam, S., (2004), "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors", *IEEE Trans. on Energy Convers*, Vol. 19, no. 2, pp. 392–399.
9. Marimoto, S., Nakayama, H., Sanada, M. and Takeda, Y. (2005), "Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG", *IEEE Trans. on Ind. Electron*, Vol. 41, no. 1, pp. 60–67.
10. The Free Encyclopedia Wikipedia (2014), "Density of air". *Electronic resource. Available at* http://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air.
11. Shchur, I. and Turlenko, O. (2009), "Energy efficiency of different methods of taking off power from synchronous generator with permanent magnets in wind-energy installationc", *Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska Politehnika"*, Vol. 654, pp. 272–277. (in Ukrainian)
12. Bose, B. (2002), *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR.
13. Wang, Q. and Chang, L. (2006), "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1242–1249.
14. Muteanu, I., Bratcu, A., Cutululis, N. and Ceangă, E. (2008), *Optimal Control of Wind Energy Systems*, Springer, London.
15. Eltamaly, A.M. and Farh, H.M. (2013), Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control, *Electric Power Systems Research*, vol. 97, pp. 144–150.
16. MATLAB&Toolboxes. *Proektirovaniye sistem upravleniya* [Design of Control Systems], *Fuzzy Logic Toolbox*, Shtovba S.D. *Vvedenie v teoriyu nechotnykh mnozhestv i nechotkuyu logiku* [Introduction to the theory of fuzzy sets and fuzzy logic], *Electronic resource. Available at* <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/>. (in Ukrainian)
17. Shchur, V. (2012), "A mathematical model of turbulent wind for computer and physical modeling of wind turbines work", *Electromechanichny ta energetychny systemy, metody modelyuvannya ta optymizatsiyi. Materialy X Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi molodykh uchenykh i specialistiv*, [Electromechanical and Energy Systems, Modelling and Optimization Methods. Conferens proceedings of the 10 th International conferens of students and young researches], Kremenchuk, KrNU, March 28–29, 2012, pp. 199–200. (in Ukrainian)
18. Shchur, I. and Biletsky, Yu. (2013), "Energy formative optimal load control of wind turbines with synchronous generator with permanent magnets", *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, seriya "Electrotehnica i enerhetyka"*, vol. 2, no. 15, pp. 286–292. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 24.03.2015.