

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ І
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 697.133

Д.М.СТЕПАНЧИКОВ

Херсонський національний технічний університет

**АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ
НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

У статті наведено результати успішного застосування нечіткої логіки для покращення робочих характеристик і керованості вітроенергетичної установки змінної швидкості. Вихідна потужність повітряної турбіни нелінійно залежить від швидкості вітру, швидкості обертання вітроколеса і кута повороту лопатей. Контролери на основі нечіткої логіки застосовано з боку ротора для керування потужністю повітряної турбіни. Усі компоненти вітроенергетичної установки і система керування на основі нечіткої логіки змодельовані у MATLAB. Застосовано і детально проаналізовано три алгоритми нечіткого виводу (Мамдані, Сугено і Ларсена). Результати моделювання довели відмінні робочі характеристики нечіткого керування для покращення якості виробленої потужності і стабільності роботи повітряної турбіни.

Ключові слова: нечітка логіка, кут повороту лопаті, відслідковування точки максимальної потужності, повітряна турбін.

Д.М.СТЕПАНЧИКОВ

Херсонский национальный технический университет

**АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

В статье приведены результаты успешного применения нечеткой логики для улучшения рабочих характеристик и управляемости ветроэнергетической установки переменной скорости. Выходная мощность воздушной турбины нелинейно зависит от скорости ветра, скорости вращения ветроколеса и угла поворота лопастей. Контроллеры на основе нечеткой логики применены со стороны ротора для управления мощностью воздушной турбины. Все компоненты ветроэнергетической установки и система управления на основе нечеткой логики смоделированы в MATLAB. Применены и детально проанализированы три алгоритма нечеткого вывода (Мамдани, Сугено и Ларсена). Результаты моделирования доказали наилучшие характеристики нечеткого управления для улучшения качества вырабатываемой мощности и стабильности работы воздушной турбины.

Ключевые слова: нечеткая логика, угол поворота лопасти, отслеживание точки максимальной мощности, воздушная турбина.

D.M. STEPANCHIKOV

Kherson National Technical University

FUZZY LOGIC BASED ALGORITHMS OF A WIND TURBINE GENERATOR CONTROL

This paper gives results of a successful application of fuzzy logic to enhance the performance and control of a variable speed wind generation system. The power output from wind turbines varies nonlinearly with the wind speed, the speed of the turbine blade tips and the blade pitch angle. Fuzzy logic controllers are applied to rotor side converter for active power control of wind turbine. All power system components and fuzzy control are simulated in MATLAB software. Three fuzzy logic control algorithm (Mamdani, Sugeno and Larsen) has been applied and validated by detailed simulation. Simulation results prove the excellent performance of fuzzy control unit as improving power quality and stability of wind turbine.

Keywords: fuzzy logic control, pitch angle, maximum power point tracking, wind turbine.

Постановка проблеми

Вітроенергетика виявилась перспективною альтернативою традиційним технологіям генерації електроенергії. Але поряд з безумовними перевагами вітроенергетики, такими як доступність, невичерпність, незалежність від кон'юнктури цін на світових ринках енергоносіїв, мала негативна дія на оточуюче середовище, відсутність потреби масштабних будівництв, зон відчуження, необхідно враховувати й недоліки – неможливість постійного вироблення необхідної потужності вітроенергетичною установкою (ВЕУ) при зміні параметрів вітру. Слід відмітити, що при швидкості вітру меншій за базове значення необхідно виробляти максимально можливу потужність, а при швидкості вітру вищій за базову – обмежувати потужність її номінальним значенням. Виникає задача автоматичного регулювання потужності, яку виробляє ВЕУ для забезпечення ефективної роботи у широкому діапазоні швидкостей вітру.

В задачах керування режимами роботи вітроенергетичної установки і прийняття рішень в умовах мінливості джерела енергії, з'являються проблеми, які важко розв'язати традиційними методами. У реальній моделі обов'язково присутній технологічний розкид параметрів, обумовлений нестійкістю характеристик механічних елементів. Цей факт є причиною неточності регулюючих дій. Для розв'язку даної проблеми необхідно використовувати нечіткі поняття і знання, які описують процес регулювання за допомогою продукційних правил "якщо - то". У зв'язку з цим в останній час розповсюдження отримують адаптивні інтелектуальні системи керування, які здатні підстроюватися під зміни стану об'єкта і вхідні збурення. До найбільш важливих переваг такого методу регулювання відноситься можливість використання досвіду експерта без складання диференціальних рівнянь. Використання апарату нечіткої логіки для задач регулювання найбільш корисне для систем з погано формалізованими процесами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вимоги ефективності, надійності і безпеки функціонування ВЕУ передбачають наявність надійно працюючої системи керування, яка забезпечить надійну експлуатацію обладнання без щоденного втручання оператора. В основі таких систем керування лежать алгоритми нечіткої логіки. Апарат нечіткої логіки на сьогодні широко використовується для рішення задач підвищення енергоефективності режимів роботи ВЕУ.

В роботі [1] розглянуто керування вітровою турбіною з асинхронним генератором з подвійним живленням за допомогою апарату нечіткої логіки. Алгоритм на основі нечіткої логіки показав відмінну здатність до підтримування стабільності параметрів мережі та покращив якість виробленої енергії.

Можливість регулювання частоти і напруги асинхронного генератора ВЕУ при використанні нечітких алгоритмів описано у [2]. Запропоновані алгоритми керування чинили регулюючий вплив на частоту і напругу системи, щоб покращити її динамічні характеристики. Алгоритм керування на основі нечіткої логіки використовували для робочого циклу вмикання конденсаторної батареї, яка регулювала кінцеву напругу асинхронної машини. Також нечіткий вивід застосовувався для зміни кута атаки лопаті ВЕУ. У порівнянні з регулюванням на основі пропорційного та інтегрального керування, результати моделювання з використанням алгоритму нечіткої логіки виявились більш ефективними.

Керування ВЕУ з короткозамкненим ротором і змінною швидкістю обертання на основі алгоритмів нечіткої логіки описано у [3]. Вироблення максимальної енергії здійснюється за допомогою трьох регуляторів із закладеними у них алгоритмами нечіткого виводу. За першим алгоритмом відслідковують швидкість генератора під час роботи, щоб забезпечити аеродинамічну ефективність ВЕУ. Другий алгоритм побудований відносно магнітного потоку машини таким чином, щоб оптимізувати ефективність системи перетворення. Третій алгоритм робить регулювання швидкості у залежності від коливань моменту турбіни і вітру. По результатах досліджень зроблені висновки про успішне розв'язання усіх поставлених завдань дослідження.

В роботі [4] показано успішне застосування алгоритмів на основі нечіткого логічного виводу у внутрішніх циклах керування і для зміни частоти обертання вітроколеса у залежності від швидкості вітру. Таке регулювання дозволило підвищити ефективність вироблення потужності ВЕУ за рахунок її роботи на максимумі при будь-якій швидкості вітру.

Таким чином, отримання нових методів, алгоритмів і результатів, які забезпечують ефективність вироблення потужності ВЕУ при використанні апарату нечіткої логіки у системах регулювання є актуальним, доцільним і своєчасним.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка та дослідження алгоритмів керування аеродинамічною підсистемою вітроенергетичної установки на основі теорії нечітких множин для підвищення режимної керуваності та вироблення оптимальної потужності.

З метою вирішення цього завдання використано моделювання у системі комп'ютерної математики MATLAB/Simulink/Fuzzy Logic Toolbox, де реалізовано модель трилопатної горизонтально-осьової ВЕУ, яка складається з аеродинамічної частини у складі вітротурбіни і редуктора-мультиплікатора, електричної частини у складі асинхронного генератора і трифазної лінії електропередачі і системи керування швидкістю обертання ротору ВЕУ і зміною кута повороту лопаті ВЕУ на основі алгоритмів нечіткої логіки. При цьому буде

проведено співставлення роботи нечіткої системи регулювання швидкості обертання ротора і регулювання кута повороту лопаті вітрогенератора із застосуванням трьох алгоритмів нечіткого виводу: Мамдані, Ларсена і Сугено.

Викладення основного матеріалу дослідження

Кінетична енергія вітру перетворюється вітродвигом у механічну енергію і далі ця енергія за допомогою генератора перетворюється в електричну. У механічну енергію вітроенергетична установка може перетворити лише частину повної енергії повітряного потоку, який проходить крізь переріз вітроколеса. Ця частина оцінюється коефіцієнтом використання енергії вітру (коефіцієнтом потужності) C_p . Коефіцієнт C_p – один з головних параметрів вітрогенератора, він визначає середнє вироблення електроенергії на ВЕУ. Максимально можливе значення коефіцієнту потужності дорівнює $C_{pmax} = 0,593$, яке називають границею Бетца [5].

Коефіцієнт потужності знаходиться у суттєвій нелінійній залежності від коефіцієнту швидкохідності λ і кута повороту лопаті β . Для трьохлопатної горизонтально-осьової вітрогенератора пропелерного типу ця залежність апроксимується рівнянням [6]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_c} - c_3 \beta - c_4 \right) \exp \left(- \frac{c_5}{\lambda_c} \right) + c_6 \lambda_c, \tag{1}$$

де

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{u}{v}; \quad \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}, \tag{2}$$

ω – кутова швидкість вітроколеса, R – радіус кола, яке охоплюють кінці лопатей, u – окружна швидкість кінців лопатей, v – швидкість вітру, $c_1 = 0,5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0,4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, $c_6 = 0,0068$.

Механічна потужність яку виробляє горизонтально-осьова ВЕУ, визначається за формулою [7]:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S}{2} v^3, \tag{3}$$

де ρ – густина повітря, S – площа, яку охоплюють лопаті при обертанні.

Аеродинамічна частина ВЕУ описується на підставі математичних рівнянь (1-3). Модель ВЕУ була реалізована у програмі MATLAB з використанням елементів бібліотеки Simulink, головні характеристики аеродинамічної частини ВЕУ наведені у табл.1. Модель має три вхідних параметри: 1) кутову швидкість генератора ω , 2) кут повороту лопаті β , 3) швидкість вітру v і три вихідних: 1) обертальний момент на валу генератора, 2) вихідну потужність, 3) відносний коефіцієнт потужності.

Таблиця 1

Характеристики аеродинамічної частини вітроенергетичної установки

Тип вітроколеса – трилопатне, горизонтально-осьове	
Номінальна механічна потужність, МВт	1,5
Базова швидкість вітру, м/с	14
Критична швидкість вітру, м/с	25
Пускова швидкість вітру, м/с	3
Початковий кут повороту лопаті, градуси	0

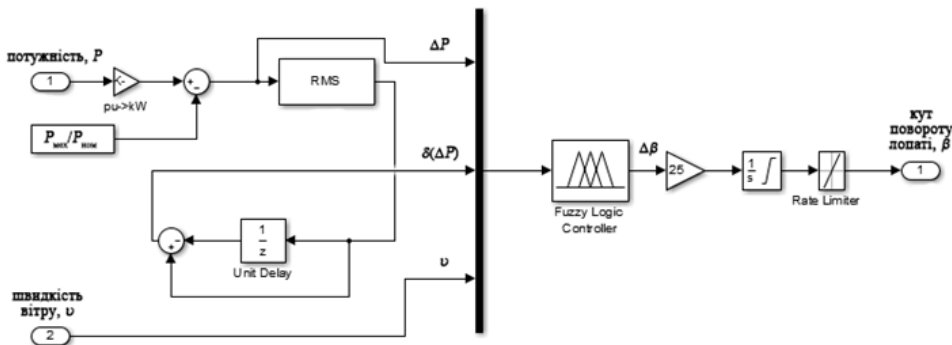


Рис. 1. Блок зміни кута повороту лопаті ВЕУ

Блок зміни кута повороту лопаті із застосуванням алгоритму на основі нечіткого логічного виводу [8] і реалізований у системі MATLAB/Simulink, представлено на рис.1. Вхідні величини – зміна потужності ΔP , останній приріст потужності $\delta(\Delta P)$ і поточна швидкість вітру v – спочатку перетворюються у відповідні нечіткі множини з інтуїтивними лінгвістичними значеннями, такими як “великий”, “середній”, “малий”, “нульовий”. Це відбувається у блоці фазифікації (Fuzzy Logic Controller) [9], де змінні ΔP , $\delta(\Delta P)$, v , а також вихідна величина зміни кута повороту лопаті $\Delta\beta$ описуються функціями належності, які показані на рис.2.

Правила для вхідних і вихідних змінних наведені у табл.2. Потім вихідні нечіткі множини, які вказують зміну кута повороту лопаті $\Delta\beta$ надходять до дефазифікатора, де перетворюються у дійсні числа, які вказують вимірювані (нормовані) значення кута повороту β . Позначення на рис.2 і у табл.2 слід трактувати наступним чином: NL – від’ємне дуже велике; NML – від’ємне велике; NM – від’ємне середнє; NS – від’ємне мале; ZE – нульове; PS – додатне мале; PM – додатне середнє; PML – додатне велике; PL – додатне дуже велике.

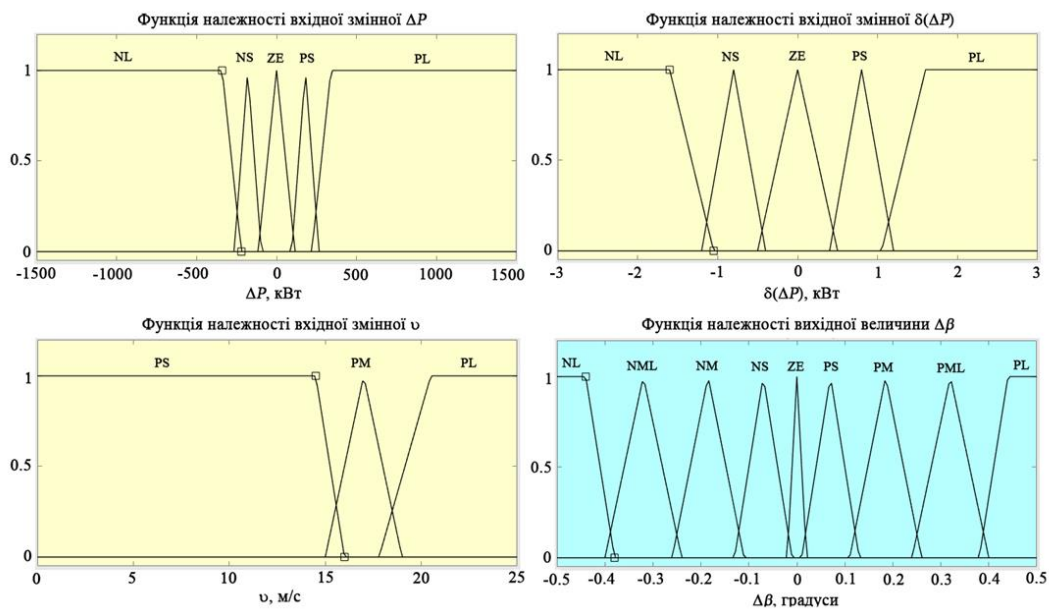


Рис. 2. Функції належності нечіткого регулятора кута повороту лопаті

Таблиця 2

Правила для нечіткого алгоритму регулювання кута повороту лопаті $\Delta\beta$

v	PS					PM					PL				
ΔP	NL	NS	ZE	PS	PL	NL	NS	ZE	PS	PL	NL	NS	ZE	PS	PL
$\delta\Delta P$															
NL	NL	NML	NM	NM	PS	NL	NM	NM	NS	PS	NML	NM	NS	NS	PS
NS	NL	NM	NS	PS	PM	NML	NM	NS	PS	PM	NML	NM	NS	ZE	PS
ZE	NML	NS	ZE	PS	PML	NM	NS	ZE	PS	PM	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NM	NS	PS	PM	PL	NM	NS	PS	PM	PML	NS	ZE	PS	PM	PML
PL	NS	PM	PM	PML	PL	NS	PS	PM	PM	PL	NS	PS	PS	PM	PML

Блок зміни швидкості обертання ротора із застосуванням алгоритму на основі нечіткої логіки реалізований у системі MATLAB/Simulink наведено на рис.3. На вхід блоку подаються вхідні величини: остання зміна потужності ΔP , остання зміна швидкості обертання ротора $\Delta\omega$ і поточне значення швидкості вітру v . На виході блоку – рекомендована швидкість обертання ротора ω_r .

Принцип роботи алгоритму полягає у збільшенні або зменшенні швидкості обертання ротора у відповідності до збільшення або зменшення передбачуваної вихідної потужності. Якщо зміна потужності ΔP є додатною при останній додатній зміні швидкості ротору $\Delta\omega$, пошук продовжуємо у тому самому напрямку. Якщо додатна зміна $\Delta\omega$ веде до від’ємної зміни ΔP , напрям пошуку змінюється. Таким чином, під час цих покрокових змін швидкості ротору, контролер відслідковує зміни у вихідній потужності ВЕУ і зберігає сталою швидкість ротора, для якої ці зміни вихідної потужності дорівнюють нулю. Якщо значення ω_1 сильно відрізняється від ω_2 , контролер буде задавати більше значення кроку $\Delta\omega$ для прискорення досягнення максимальної потужності. Аналогічно, якщо поточна швидкість генератора є

близькою до ω_2 , то контролер повинен задавати менше значення кроку $\Delta\omega$, щоб уникнути коливань і забезпечити стабільність системи [10].

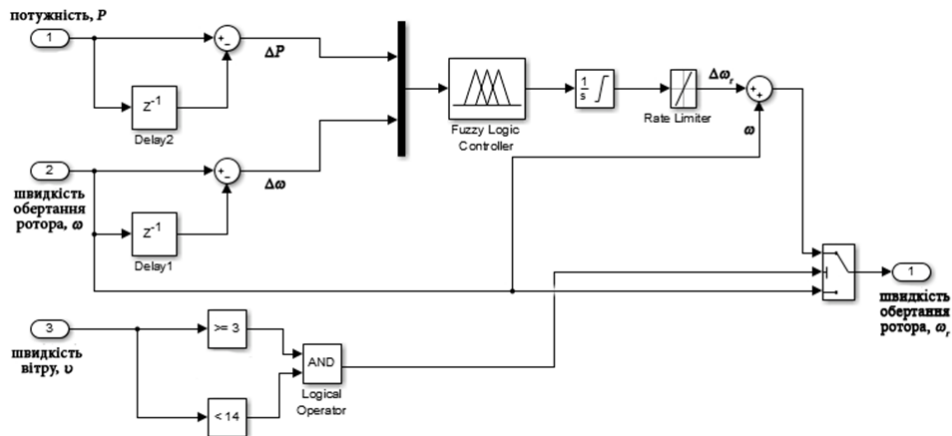


Рис. 3. Блок зміни швидкості обертання ротора ВЕУ

Вхідні величини – зміна потужності ΔP і зміна швидкості обертання генератора $\Delta\omega$, а також вихідна величина зміни швидкості обертання ротору $\Delta\omega_r$ описуються функціями належності, які показані на рис.4. Правила для вхідних і вихідних змінних наведені у табл.3.

Таблиця 3

Правила для алгоритму регулювання швидкості обертання ротора $\Delta\omega_r$

ΔP \ $\Delta\omega$	P	ZE	N
PVB	PVB	PVB	NVB
PB	PB	PVB	NB
PM	PM	PB	NM
PS	PS	PM	NS
ZE	ZE	ZE	ZE
NS	NS	NM	PS
NM	NM	NB	PM
NB	NB	NVB	PB
NVB	NVB	NVB	PVB

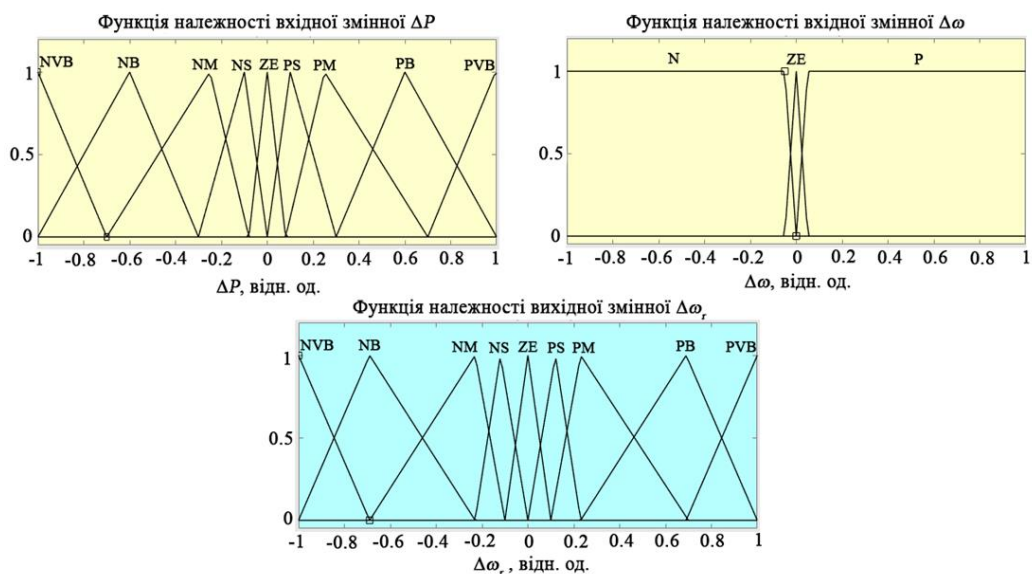


Рис. 4. Функції належності нечіткого регулятора швидкості обертання ротора ВЕУ

Позначення на рис.4 і у табл.3 мають наступний зміст: NVB – від’ємне дуже велике; NB – від’ємне велике; NM – від’ємне середнє; NS – від’ємне мале; N – від’ємне; ZE – нульове; P – додатне; PS – додатне мале; PM – додатне середнє; PB – додатне велике; PVB – додатне дуже велике [10].

При роботі ВЕУ у режимі обмеження потужності в системі керування аеродинамічною системою ВЕУ задіяна тільки підсистема зміни кута повороту лопаті. Стратегія керування у цьому режимі – обмеження потужності її номінальним значенням шляхом підтримання сталої швидкості обертання ротора. На рис.5 представлені головні характеристики роботи ВЕУ при синусоїдальному законі зміни швидкості вітру (зміщення 16 м/с, амплітуда 1 м/с, частота $2\pi/60$ рад/с). Після встановлення режиму (починаючи з $t \approx 8$ с), вироблена потужність при задіяному алгоритмі Ларсена демонструє більші і стабільні ($\sim 1,5$ МВт) значення у порівнянні з алгоритмами Мамдані і Сугено, для яких починаючи з моменту часу $t \approx 37$ с спостерігається помітне “провисання” потужності. Зміна кута повороту лопаті для алгоритму Ларсена є більш плавною у порівнянні з алгоритмами Мамдані та Сугено, де спостерігаються декілька зламів.

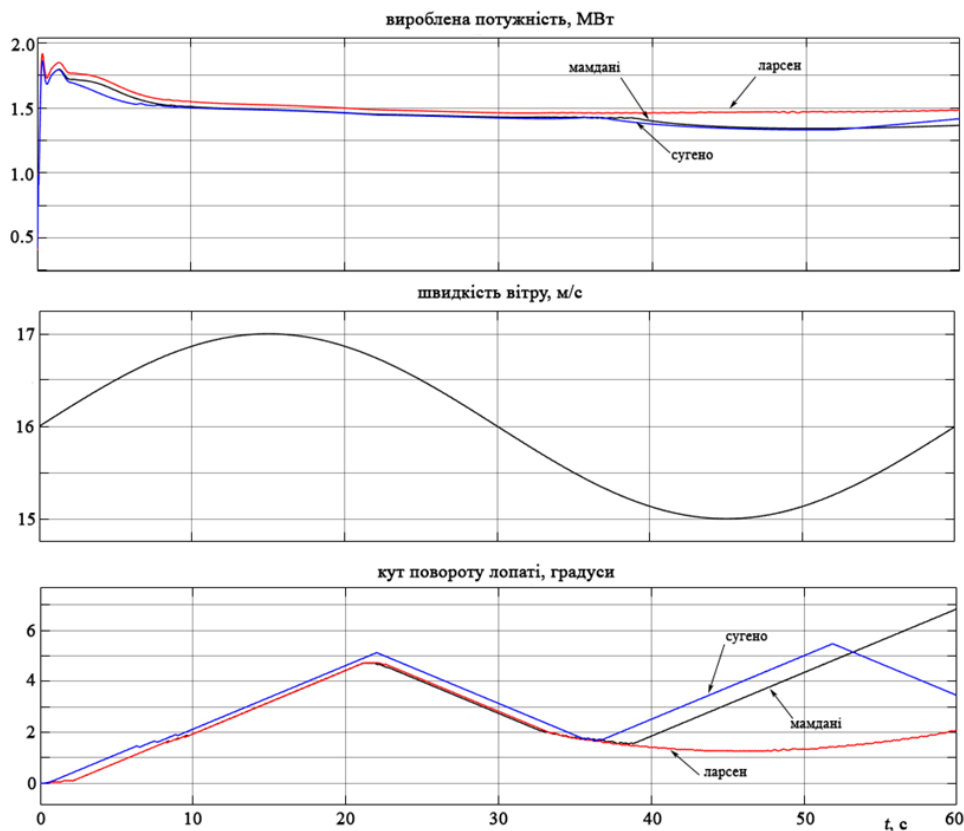


Рис. 5. Режим обмеження потужності ВЕУ при синусоїдальній моделі вітру для різних алгоритмів дефазифікації

У режимі змінної потужності в системі керування аеродинамічною системою ВЕУ задіяна тільки підсистема зміни передавального відношення редуктора-мультиплікатора, кут повороту лопаті лишається рівним нулю. Стратегія керування у цьому режимі – вироблення максимально можливої потужності для даної швидкості вітру. На рис.6 представлені головні характеристики роботи ВЕУ при синусоїдальному законі зміни швидкості вітру (зміщення 12 м/с, амплітуда 1 м/с, частота $2\pi/60$ рад/с). Графіки потужності також мають приблизно синусоїдальний характер. При цьому найбільша амплітуда коливань потужності спостерігається коли задіяний алгоритм Ларсена, найменша – для алгоритму Мамдані. Якщо розглядати амплітуду зміни швидкості обертання ротора ВЕУ, то найбільша величина спостерігається для алгоритму Мамдані ($\sim 0,28$ відн.од.), найменша – для алгоритму Ларсена ($\sim 0,07$ відн.од.).

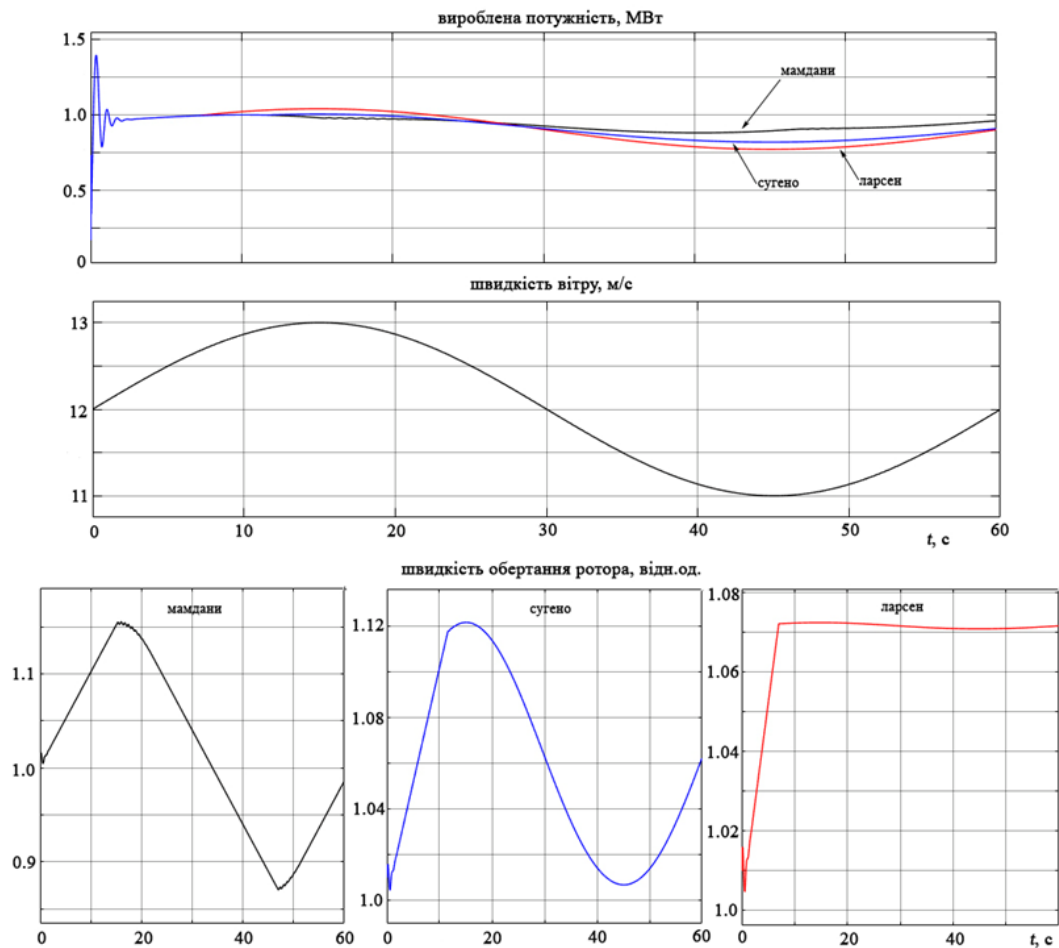


Рис. 6. Режим змінної потужності ВЕУ при синусоїдальній моделі вітру для різних алгоритмів дефазифікації

Висновки

Аналіз результатів проведеного дослідження підтверджує принципову можливість і перспективність використання алгоритмів нечіткої логіки у системах керування ВЕУ, зокрема у підсистемах зміни кута повороту лопаті і передавального числа редуктора-мультиплікатора.

Проведено порівняння результатів роботи нечіткої системи регулювання потужності ВЕУ для алгоритмів дефазифікації Ларсена, Мамдані і Сугено. Проаналізовано особливості роботи кожного із задіяних алгоритмів. Для режиму обмеження потужності більшу ефективність показав алгоритм Ларсена. Для режиму змінної потужності найбільш ефективним виявився алгоритм Мамдані.

Розглянуті способи керування потужністю ВЕУ на основі алгоритмів нечіткої логіки можна застосовувати до різних конструкцій вітроустановок, що дозволяє сконцентруватися на дослідженні способів керування і застосовувати отриманий досвід для усього різноманіття вітроенергетичних установок.

Список використаних джерел

1. Karimi-Davijani H. Fuzzy Logic Control of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine/ H. Karimi-Davijani, A. Sheikholeslami, H. Livani and M. KarimiDavijani// World Applied Sciences Journal. – 2009. – №6(4). – p. 499–508.
2. Hussein F. Soliman Fuzzy Algorithm for Supervisory Voltage/Frequency Control of a Self Excited Induction Generator/ Hussein F. Soliman, Abdel-Fattah Attia, S. M. Mokhymar, M. A. L. Badr// Acta Polytechnica. – 2006. – V. 46, №6. – p.36–48.

3. Bimal K. Bose. Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System/ Bimal K. Bose, Marcelo G. Simoes // United States Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, EPA/600/SR – 97/010, March 1997. – p.6.
4. Vinod Kumar. Fuzzy logic based light load efficiency improvement of matrix converter based wind generation system/ Vinod Kumar, R. Joshi // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2007. – p.79 – 89.
5. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэнергетика/ В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2004. – 519 с.
6. Lamchich M. Matlab Simulink as Simulation Tool for Wind Generation Systems Based on Doubly Fed Induction Machines / M. Lamchich, N. Lachguer. – 2012.
7. Суббота А.М. Система управления ветроэнергетической установкой / А.М. Суббота, И.Ю. Дыбская, А.В. Заболотный // Радиоэлектронні і комп’ютерні системи. – 2009. - №3(37). – С.61-67.
8. Jianzhong Z. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines/ Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu: DRPT2008, 6–9 April, 2008.
9. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTECH. –СПб.:БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
10. Adzic E. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control/ E. Adzic, Z. Ivanovic, M. Adzic, V. Katic //Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 6, No. 1. – 2009. – p.131– 149.