

*Для реалізації оптимально можливої ефективності функціонування електромеханічного комплексу вітроенергетичної установки обґрунтована та пропонується для практичної реалізації її конструкція. Розроблена структура електромеханічної частини вітроенергетичного комплексу і система управління ним з прогнозованим потенціалом надійності і якості електропостачання споживачів електричної енергії підземних виробок залізрудних шахт. Теоретичні аспекти підтверджено експериментальними дослідженнями*

*Ключові слова: вітроенергетична установка, електромеханічний комплекс, залізрудна шахта, закон керування, нечіткий регулятор*

*Для реализации оптимально возможной эффективности функционирования электромеханического комплекса ветроэнергетической установки обоснована и предлагается для практической реализации её конструкция. Разработана структура электромеханической части ветроэнергетического комплекса и система управления им с прогнозируемым потенциалом надёжности и качества электроснабжения потребителей электрической энергии подземных выработок железорудных шахт. Теоретические аспекты подтверждены экспериментальными исследованиями*

*Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, электромеханический комплекс, железорудная шахта, закон управления, нечеткий регулятор*

# ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ПІДЗЕМНИХ ВИРОБКАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

**О. М. Сінчук**

Професор, доктор технічних наук,  
завідуючий кафедрою

Кафедра автоматизованих електромеханічних  
систем в промисловості та транспорті  
ДВНЗ «Криворізький національний університет»  
вул. XXII Партз'їзду, 11,  
м. Кривий Ріг, 50027, Україна  
E-mail: speet@ukr.net

**С. М. Бойко**

Аспірант

Кафедра систем електроспоживання та  
енергетичного менеджменту  
Кременчуцький національний університет  
ім. Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук,  
39600, Україна  
E-mail: bsn1987@i.ua

## 1. Вступ

Одним з 4-х заходів, що пропонуються Міжнародним енергетичним агенством (МЕА) для підвищення енергоефективності в країнах світу, є збільшення використання сонячної енергетики та енергії вітру в загальному обсязі виробництва електричної енергії (ЕЕ). Передбачається, що до 2020 року частка їх у світовому виробництві енергії досягне 12 % проти 1,2 % у 2011 році [1].

В більшості європейських держав, робляться реальні кроки до втілення в життя широкомасштабного видобутку ЕЕ альтернативними джерелами.

Безумовно, що пошук альтернативних джерел виробництва ЕЕ – задача світового масштабу. Проте у сучасних умовах державотворення проблема пошуку таких джерел виробництва ЕЕ – це задача в тому числі і відомча, котра безумовно повинна реалізуватись в рамках загальнодержавної стратегії розвитку.

Одним, з поки-що нереалізованих напрямків застосування ВЕУ, є багато чисельні підприємства гірничо-металургійної промисловості, котрі дісталися

Україні в спадок від СРСР і котрі на даний час споживають більш 40 % ЕЕ від загально споживаних вітчизняною промисловістю обсягів.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вирішення проблеми незалежного – автономного – живлення електроспоживачів електричної енергії шляхом використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) знаходить своє втілення на підприємствах, де традиційно такий спосіб раніше навіть не прогнозувався. Такими видами підприємств, наприклад, є залізрудні шахти [1].

Енергоефективними типами електротехнічних комплексів ВЕУ є зразки з використанням асинхронних генераторів (АГ) з конденсаторним збудженням [2]. Однак при цьому виникає проблема – стабілізація напруги на виході АГ при змінному навантаженні на лопаті вітроколеса ВЕУ. На жаль, вирішення цієї задачі різними дослідниками бачаться по-різному – адресно для конкретного рішення без достатнього рівня універсальності.

**3. Мета і задачі досліджень**

Розробка теоретичних аспектів та практичної реалізації по розробці електромеханічного комплексу вітроенергетичної установки адаптованої для роботи в підземних виробках залізрудних шахт та рудників.

**4. Розробка теоретичних аспектів та практичної реалізації по розробці електромеханічного комплексу вітроенергетичної установки**

В результаті досліджень було розроблено та апробована структура електромеханічної частини з підвищеною енергоефективністю та на цій основі синтезовано конструкцію вітрогенератора для системи автономного живлення приймачів електричної енергії підземних гірничих виробок залізрудних шахт [3].

У даному проєкті вітроколеса передбачений відбивач потоків повітря, що збільшує коефіцієнт використання вітру вітроколеса та коефіцієнт корисної дії БЕК в цілому. На рис. 1 зображено вітроколесо з відбивачем вид з боку [4].

Пристрій працює наступним чином. Коли з'являється потік повітря, лопаті вітроколеса починають рухатися. Повітровідбивач флюгером 8 розвертається так, щоб його центральна вісь знаходилася перпендикулярно до векторів потоку повітря. Повітряний потік, який падає на відбивач ВК, оминувши лопать, відбивається від його поверхні під кутом, рівним куту падіння, і середній струмінь потоку взаємодіє з поверхнею лопаті, що знаходиться в межах дії відбитого повітряного потоку від відбивача.

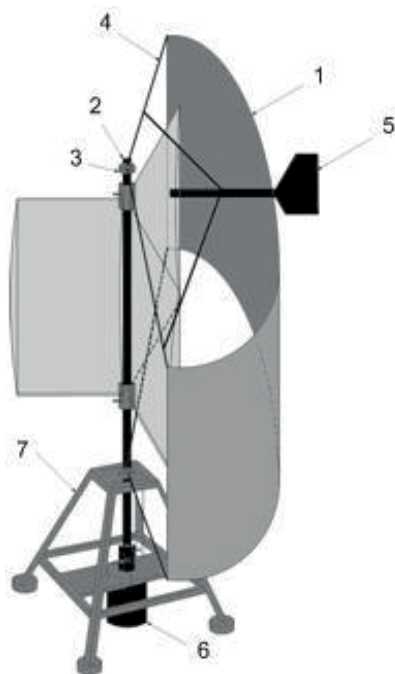


Рис. 1. Вітроколесо з повітровідбивачем. Вид з боку:  
 1 – повітровідбивач потоку; 2 – вал вітроколеса;  
 3 – підшипник; 4 – тримач повітровідбивача; 5 – флюгер;  
 6 – генератор, 7 – металева опора вітроколеса

На рис. 2 зображено вітроколесо з повітровідбивачем, вид зверху.

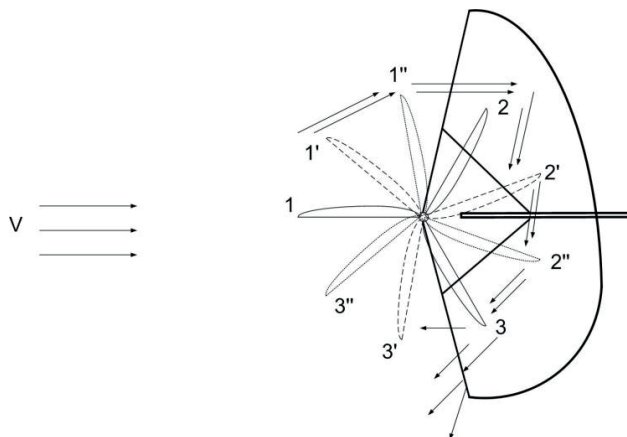


Рис. 2. Вітроколесо з повітровідбивачем вид зверху: 1, 2, 3; 1', 2', 3'; 1'', 2'', 3'' – проміжні положення лопатей під час руху ВК; v – швидкість повітряного потоку

Розглянемо рух лопатей вітрового колеса на прикладі лопаті 2 (рис. 2). Коли повітряний потік потрапляє до ввігнутої частини лопаті 2, вона починає переміщуватися за годинниковою стрілкою і через деякий час опиняється у положенні 2'. Вектори повітряного потоку продовжують діяти на лопать 2. Коли вектори потоку повітря потрапляють на повітровідбивач, вони відбиваються від нього і переміщують лопать 2 з положення 2' у положення 2'', діючи на неї під майже прямим кутом, що забезпечує максимальне використання енергії повітряного потоку. Далі відбиті вектори, ще протягом якогось часу, діють на лопать, переміщуючи її, та коли вона опиняється поза зоною дії відбивача, на неї продовжують діяти вектори повітряного потоку зі своїм напрямком, які переміщують лопать 2 з положення 2'' у початкове положення 2. Те саме відбувається і з двома іншими лопатями, рух яких зображено пунктирною та штрих пунктирною лініями. Якщо ж потік повітря змінює свій напрямок, то флюгер, встановлений зверху повітровідбивача, розвертає його до напрямку потоку повітря, і рух лопатей здійснюється у звичайному порядку [4].

На виді збоку зображено зовнішній вигляд вітрового колеса та його складових без проміжних положень лопатей у просторі. Дане креслення наведено з метою продемонструвати інший вид конструкції для більш чіткого уявлення про її будову.

Такий пристрій забезпечить додатковий обертальний момент вітроколеса в сторону його обертання. Отже швидкість обертання лопатей вітроколеса збільшується, а це означає, що і потужність вітроустановки зростає.

Потужність, яку виробляє вітрова установка, залежить не лише від швидкості потоку, але і від геометричних розмірів вітрового колеса, коефіцієнту використання енергії вітру, густини середовища (у даному випадку шахтного повітря). Можлива величина потужності, вироблена вітроустановкою розраховується за формулою:

$$N_{\text{vek}} = \frac{\rho v^3 SE}{2}, \tag{1}$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – швидкість повітряного потоку,  $\text{м/с}$ ;  $S$  – площа, описана лопатями вітрового колеса,  $\text{м}^2$ ;  $E$  – коефіцієнт використання енергії вітру, %.

Площа, описана лопатями вітрового колеса визначається за формулою:

$$S = 2\pi Rb, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус вітрового колеса,  $\text{м}$ ;  $b$  – висота вітрового колеса,  $\text{м}$ .

Коефіцієнт використання енергії вітру ідеального вітряка був обчислений Н. С. Жуковським і становить 0,593. Для ортогональних вітряків КВЕВ становить від 0,15 до 0,35. У даному випадку, враховуючи постійний напрямок повітряного потоку можна прийняти  $E = 0,3$ .

Густина рудничного повітря відрізняється від густини атмосферного. Температура порід в копальні протягом року практично постійна. Через велику протяжність підземних гірничих виробок температура повітря, що проходить по руднику, стає рівною температурі порід, тобто на виході з копальні (у вентиляційному стовбурі) температура повітря також протягом року має постійне значення. Температура повітря, що подається в рудник (у повітроподаючому стовбурі) залежить від кліматичних умов, а, отже, значення її змінюється досить в широких межах. Так в літню пору року, коли температура зовнішнього повітря значно вище температури порід рудника, в повітроподаючій стовбур буде надходити тепле повітря (легший). На виході ж з рудника видаватиметься більш холодний (в порівнянні з атмосферним), а, отже, більш важке повітря. При цьому в копальні виникає перепад гідростатичних тисків, в результаті чого більш легкий повітря буде прагнути піднятися вгору, а важчий – опуститися вниз. Це явище носить назву природна тяга (теплова депресія).

При відпрацюванні корисних копалин підземним способом питання надійності вентиляції є одним з найважливіших. Тому, у зв'язку з тим, що природна тяга робить значний вплив на процес провітрювання, необхідно враховувати це явище як невід'ємну складову вентиляційної системи.

Величину густини рудничного повітря можна визначити за формулою:

$$\rho = \frac{0,465P}{273,15+t}, \quad (3)$$

де  $P$  – абсолютний тиск,  $\text{мм.рт.ст.}$ ;  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Отже, враховуючи, що тиск на горизонті 1312 м становить 889  $\text{мм.рт.ст.}$ , а температура за рахунок вентиляційного охолодження повітря відрізняється від повітря на поверхні на 5... 7 градусів (при середній температурі повітря 24  $^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 29...31$   $^{\circ}\text{C}$ ) розрахуємо значення густини шахтного повітря для різної глибини шахти:

$$\rho = \frac{0,465 \cdot 889}{273,15+30} = 1,36 \text{ кг/м}^3.$$

Для спрощення розрахунку проводяться для середньої глибини шахти 1000м та швидкості повітряного потоку 10  $\text{м/с}$ , густина рудничного повітря 1,36  $\text{кг/м}^3$ . Далі приведений розрахунок параметрів для досліджуваної вітрової установки. Вхідні дані для обчислень приведені в табл. 1.

джуваної вітрової установки. Вхідні дані для обчислень приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні дані для розрахунку параметрів вітроелектроенергетичної установки

Параметр	Одиниці виміру	Значення
КВЕВ E	%	0,3
Густина повітря $\rho$	$\text{кг/м}^3$	1,36
Швидкість повітря V	$\text{м/с}$	10
Ширина лопаті a	$\text{м}$	0,8
Висота лопаті b	$\text{м}$	3,3
Радіус ВК R	$\text{м}$	0,95

Площа, описана лопатями вітрового колеса:

$$S = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,95 \cdot 3,3 = 19,7 \text{ м}^2.$$

За формулою (1) визначаємо потужність, вироблену вітровим колесом. Оскільки густина та швидкість величини змінні, а потужність безпосередньо від них залежить, то і її величина також буде змінною. Величина потужності, вироблена вітровим колесом за даних параметрів становить:

$$N = \frac{1,36 \cdot 10^3 \cdot 19,7 \cdot 0,3}{2} = 4016,3 \approx 4 \text{ кВт}.$$

Як відомо, частота обертання генераторів може бути регульованою за умови сталості частоти генерованих коливань ( $f_1 = \text{const}$ ,  $\omega_r = \text{var}$ ) або залишатися постійною ( $\omega_r = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{var}$ ). У загальному випадку можлива робота генератора зі змінною частотою обертання і змінною частотою  $f_1(\omega_r = \text{var}; f_1 = \text{var})$  [3]. При використанні АГ у складі вітроенергетичних установок, експлуатованих в умовах залізрудних шахт, характерними умовами роботи є нестабільність обертання ротора АГ, залежно від дії вентиляційного потоку на лопаті вітроколеса, оскільки швидкість вентиляційних потоків на різних ділянках діючих виробках шахт регламентується документом «Єдині правила безпеки при розробці рудних, нерудних та розсипних родовищ корисних копалин підземним способом». При цьому діапазони швидкостей вентиляційних потоків повітря для різних ділянок залізрудних шахт знаходяться в діапазоні 4...12  $\text{м/с}$ .

При керуванні вітровою енергетичною установкою доводиться стикатися з певною мірою невизначеними вихідними даними, параметрами системи. Вітроенергетичний агрегат працює за некерованим графіком. Особливістю системи автоматичного керування ВЕУ є те, що вона є нелінійним нестационарним об'єктом керування і знаходиться під впливом динамічних вітрових навантажень. Вироблена вітроустановкою потужність залежить не лише від швидкості повітряного потоку, а й від конструктивних її особливостей, насамперед габаритних розмірів.

Необхідність розробки системи керування полягає головним чином у тому, щоб забезпечити споживачів стабільною напругою з постійною частотою незалежно від зміни параметрів у будь-якій ланці системи. На шляху вирішення цього питання вирішено, що лише мікропроцесорна система керування, що працює за спеціально створеним законом керування (програмою), здатна забезпечити постійні вихідні параметри вітроелектротехнічного комплексу.

При роботі вертикально-осьового електромеханічного комплексу ВЕУ існує поняття роботи в точці відбору максимальної потужності. Максимальний відбір потужності від вітрового колеса буде при певній оптимальній швидкості обертання вітрового колеса, при збільшенні якої коефіцієнт потужності буде падати.

Розглянемо ідеологію побудови такої системи керування вертикально-осьовою ВЕУ, яка працює не на окреме навантаження, а на електричну мережу. В даному випадку необхідно підтримувати оптимальну швидкість обертання вітрового колеса і максимум потужності, що відбирається від нього, шляхом керування ємнісним струмом та баластним навантаженням ВЕУ: якщо змінювати ці параметри ВЕУ, змінюватиметься амплітуда вихідної напруги установки а також амплітуда напруги на виході інвертора, що призведе до зміни струму навантаження (струму, який віддається у мережу умовно необмеженої ємності), а це в свою чергу впливатиме на зміну моменту навантаження вітрового колеса і до отримання оптимальної швидкості обертання вітрового колеса відповідно до поточної швидкості вітру. Така система дасть змогу автоматично підтримувати кутову частоту обертання вітрокола, шляхом регулювання моменту навантаження ВЕУ, при цьому швидкість буде стабілізуватися за рахунок збільшення струму віддачі у мережу.

Важливою складовою розв'язку поставленої задачі є особливість конструктивного виконання ВЕУ.

Виходячи з попередніх результатів аналізу випромінювань електроустаткування рудних шахт, можна зробити висновок про те, що випромінювання ВЕУ в порівнянні з випромінюваннями промислового електроустаткування є незначним.

Таким чином, ВЕУ повною мірою не позбавлені недоліків у випромінюванні електромагнітних хвиль і ультразвуку. При установці і експлуатації ВЕУ необхідно в першу чергу враховувати їх взаємодію з електротехнічними джерелами перешкод. Аналіз електромагнітних і ультразвукових випромінювань електроустаткування, дозволяє зробити висновок про те, що, розташований ВЕУ у виробках рудних шахт, не несе загрозу навколишньому середовищу і рівень випромінювань не перевищуватиме санітарних норм встановлених для підприємств гірничорудної промисловості.

ВЕУ можуть бути застосовані для автономного живлення споживачів електричної енергії залізрудних шахт. При цьому встановлено, що енергоефективним варіантом структури енергетичного комплексу таких ВЕУ є система з асинхронним генератором (АГ). Однією з найбільш важливих проблем, що виникають при використанні АГ з конденсаторним збудженням в автономних системах електропостачання, є стабілізація напруги при змінній частоті обертів ротора та змінному навантаженні. Частота обертання генерато-

рів може бути регульованою за умови сталості частоти генерованих коливань або залишатися постійною. У загальному випадку можлива робота генератора зі змінною частотою обертання ВК і змінною частотою ротора АГ [5].

Проведений аналіз NiCd, NiMh, Pb, Li-іонних електрорічмічних систем показує, що для ВЕК в підземних виробках залізрудних шахт найбільш оптимальним є варіант використання Li-іонних акумуляторних батарей. Використання літій-іонних акумуляторів як складових ВЕК для роботи в підземних виробках залізрудних шахт дозволяє зменшити масогабаритні параметри акумуляторної батареї, забезпечивши при цьому високі енергетичні характеристики. Літій-іонні акумулятори при підвищенні температури мають якнайкращі електротехнічні характеристики, що важливо для температурного режиму роботи в умовах залізрудної шахти.

Завдання контролю стану акумуляторних батарей вирішується таким чином, що образ виявлення неполадок в акумуляторних батареях передбачає постійний контроль справності акумуляторної батареї у всіх режимах її роботи за допомогою системи контролю.

Неполадки в акумуляторній батареї визначають шляхом порівняння напруг на двох половинах акумуляторної батареї. Систему контролю виконують у вигляді дільника напруги і пристрою контролю відмінності напруг. При цьому дільник напруги виконують за допомогою послідовно сполучених резисторів, які підключають до контактів акумуляторної батареї. Пристрій контролю відмінності напруги підключають між середньою точкою акумуляторної батареї і середньою точкою дільника напруги. Акумуляторну батарею з пристроєм контролю підключають до навантаження або зарядного пристрою.

Процес виявлення неполадок в акумуляторній батареї реалізується таким чином. Пристрій контролю різниці напруг на двох половинах акумуляторної батареї «а» і до середньої точки дільника напруги «б». Дільника напруги виконуємо у вигляді послідовно сполучених резисторів  $R1, R2$ , які підключаємо до контактів акумуляторної батареї («+», «-») [5].

При справній акумуляторній батареї в будь-яких експлуатаційних режимах, - як при зарядці, так і у вантажному режимі, - напруга між середньою точкою батареї і середньою точкою дільника напруги близько до нуля.

При будь-яких неполадках в акумуляторній батареї, - таких як короткі замикання або обриви усередині окремих елементів, короткі замикання або обриви зовнішніх з'єднань елементів батареї, зміна внутрішніх опорів і опорів міжелементних з'єднань, зміна місткості, переполюсовка елементів і т.п., - баланс збуджується і з'являється напруга, яка фіксується пристроєм контролю.

Своєчасне виявлення неполадок акумуляторних батарей дозволяє обмежити їх розряд і понизити витрати на експлуатацію.

При використанні АГ у складі електромеханічних вітроенергетичних комплексів, експлуатованих в умовах залізрудних шахт, характерними умовами роботи є нестабільність обертання ротора АГ, залежно від дії вентиляційного повітряного потоку на лопаті вітрокола.

Важливою умовою підвищення техніко-економічних показників ВЕУ є відповідність характеристик агрегату вітровому режиму. На даний час існує багато систем керування ВЕК, які, зокрема, дозволяють працювати ВЕУ із нерегульованою швидкістю, забезпечуючи при цьому відбір максимальної потужності від вітроколеса, шляхом регулювання моменту навантаження генератора [4].

Необхідність розробки системи керування полягає головним чином у тому, щоб забезпечити споживачів стабільною напругою з постійною частотою незалежно від зміни параметрів у будь-якій ланці системи. На шляху розв'язання цього питання вирішено, що лише мікропроцесорна система керування, що працює за спеціально створеним законом керування здатна забезпечити постійні вихідні параметри електромеханічного комплексу (ЕМК) ВЕУ. Структурна схема ЕМК ВЕУ з системою керування представлена на рис. 3.

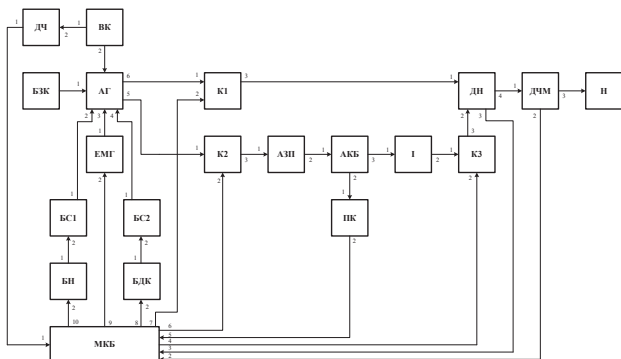


Рис. 3. Структурна схема автоматизованої системи керування асинхронним генератором у складі електромеханічної системи вітроелектротехнічного комплексу

На рис. 3. до складу схема автоматизованої системи керування асинхронним генератором у складі електромеханічної системи вітроелектротехнічного комплексу входять такі елементи: ВК – вітрове колесо; АГ – асинхронний генератор з короткозамкненим ротором; БЗК – батарея збуджуючих конденсаторів; ЕМГ - електромагнітне гальмо; ДН – датчик напруги; ДЧ – датчик частоти обертів ВК; ДЧМ – датчик частоти напруги мережі; АЗП – автоматичний зарядний пристрій; АКБ – акумуляторна батарея; ПК – пристрій контролю стану АКБ; І – інвертор; БДК – батарея додаткових конденсаторів; БН – баластне навантаження; БС1, БС2 – блоки ключів (симісторів); МКБ – мікропроцесорний блок; К1-К3 – керовані комутатори; Н – навантаження.

При нормальній роботі ВЕУ, відбувається електропостачання споживачів Н і заряд АКБ. При аварійній ситуації, за допомогою відключення керованого комутатора К1, відбувається відключення навантаження Н від генератора АГ, а за допомогою комутатора К3 відбувається підключення навантаження до АКБ через інвертор І. Заряд АКБ через комутатор К2 відбувається до того часу, поки пристрій контролю стану АКБ ПК не виявить несправності або повного заряду АКБ або автоматичний зарядний пристрій АЗП, в результаті невідповідності параметрів струму або напруги заряду, відключить АКБ від генератора.

Під час обертання вітрового колеса та валу генератора, мікроконтролер аналізує величину сигналів, що надходять до нього, і робить висновок про величину заданої напруги для блоків симісторів. До того часу, доки ємність додаткових конденсаторів дозволяє регулювати величину вихідної частоти та напруги, ці параметри регулюються батареєю робочих конденсаторів. Якщо ж керування ємністю не приносить бажаного результату, а частота та напруга продовжують зростати, то задана напруга подається на другу групу симісторів, які підключають баластне навантаження, яке регулює вихідну напругу та частоту.

Схема роботи блоку нечіткого керування заданою напругою блоків ключів показано на рис. 4.



Рис. 4. Схема роботи блоку нечіткого керування заданою напругою блоків ключів

Доповнення закону керування можна провести із застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить регулювати величину керуючого сигналу, який задається на блоки симісторних ключів, а отже, й вихідні напругу та частоту [6].

На вхід нечіткого регулятора швидкості пропонується подавати такі сигнали: кутову швидкість обертання вітрового колеса  $\omega_k$ ; швидкість вітрового потоку  $V_B$ ; похідну від ковзного значення швидкості вітру  $dV_B^k/dt$ , яка обчислюється блоком обчислення ковзного середнього та його похідної; оптимальне значення кутової швидкості  $\omega_{опт}$ , при якому від вітроколеса відбирається максимум потужності, причому  $\omega_{опт}$  обчислюється блоком залежності  $P(\omega)$ . Вихідним сигналом нечіткого регулятора є сигнал завдання за напругою  $U_{зад}$ , який буде вхідним сигналом для блоків симісторних ключів, через які підключено батарею конденсаторів та баластне навантаження.

Істотним зауваженням по використанню існуючих законів управління за принципом power point tracking є спрощений підхід визначення залежності між швидкістю вітру в даний момент часу й швидкістю вітрового колеса, що дозволяє знайти координати точки відбору максимальної потужності. Недостатнє врахування всіх факторів, що впливають на різницю між відносними значеннями швидкості вітру й швидкості обертання вітрового колеса призводить до погіршення стійкості систем автоматичного керування, відхилення напруги на виводах ВЕУ, що ускладнює її експлуатацію при паралельній роботі з мережею. Зазначеними факторами є відносна вологість повітря, наявність опадів, запиленість, атмосферний тиск у зоні розташування ВЕУ й т.ін. Ці величини змінюються (іноді досить істотно) протягом доби, сезону, року. Облік таких факторів також обумовлює використання математичного апарату нечітких множин для побудови моделі автоматичного регулятора [7].

У такому разі управління буде мати нечіткий характер, що дозволить застосувати метод нечіткого управління в області вітроенергетики.

Рішення поставленої задачі може бути здійснено завдяки визначенню функції оптимальної потужності вітрової турбіни з вертикальною віссю обертання й застосуванню теорії нечітких множин для синтезу цифрових нечітких регуляторів. Використання нечітких регуляторів дозволяє підвищити динамічну точність та швидкодію систем автоматичного керування нестационарними об'єктами за рахунок формалізації процесу прийняття рішень на основі нечіткої логіки при кількісних параметрах стану системи. Системи автоматичного управління для поновлюваних енергетичних установок на основі нечітких регуляторів у багатьох випадках довели свою ефективність завдяки тому, що дозволяють одержати більш високу якість регулювання (менше похибки в перехідних і сталих режимах).

Доповнення закону управління можна провести із застосуванням елементів нечітких множин, дозволить реалізувати контур регулювання швидкості обертання вітрового колеса автоматичного регулятора збудження на контролері з підтримкою команд Fuzzy Logic і поліпшити якість регулювання потужності ВЕУ в умовах дій стохастичних навантажень вітру. Таким чином, була розроблена структура системи управління асинхронним генератором з короткозамкнутим ротором у складі вітроенергетичного комплексу, яка функціонує наступним чином [8].

Для функціонування математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформувати експертну базу знань нечітких правил, що містить лінгвістичні правила залежності  $Y = f(X)$  [5].

На рис. 5 схематично зображено роботу блоку нечітких правил керування заданою напругою.

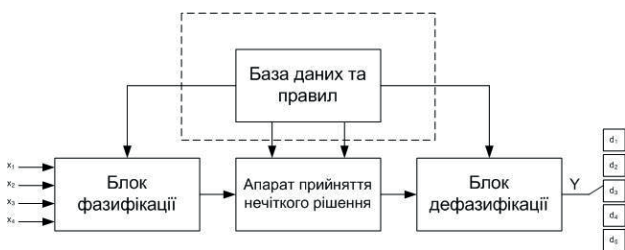


Рис. 5. Структурна схема блоку нечіткого логічного висновку системи керування ВЕУ з нечітким висновком про зміну заданої напруги

При виборі первинних вимірювальних перетворювачів струму та напруги слід враховувати, що дані величини є постійними-пульсуючими. Аналізуючи сенсори струму та напруги, слід виділити перетворювачі на основі ефекту Холла, що мають високі показники надійності та точності, малу похибку нелінійності, низький температурний дрейф, оптимальний час затримки, завадозахищеність, не високі масо-габаритні показники. Крім того сенсори на основі ефекту Холла дозволяють гальванічно розв'язати силові та вимірювальні кола. Отже були обрані сенсор струму – АТ50В5, та сенсор напруги – ДНХ.

Основним критерієм вибору сенсорів швидкості вітрового потоку є висока точність та надійність. Такі первинні вимірювальні перетворювачі широко представлені на сучасному ринку вимірювальних систем.

Найбільш оптимальним варіантом є сенсор ДСВ1.13, що забезпечує високу точність, низьку інерційність, високу чутливість, незалежність від кута нахилу при встановленні, високу надійність.

Серед сенсорів кутової швидкості найбільш ефективними є оптикоелектронні, що мають простоту конструкції та використання, широкий діапазон вимірювання, високу точність. Виділяють три основні категорії таких сенсорів: з перериванням світлового потоку, з відбиванням та оптичні енкодери. Найпростішим варіантом є сенсори типу Оптичний ЛІР-158.

Серед контролерів було вибрано Atmega161(L) що є 8-ми розрядним CMOS мікроконтролером з низьким рівнем енергоспоживання, заснованим на AVR RISC архітектурі. Завдяки виконанню високопродуктивних інструкцій за один період тактового сигналу, Atmega161(L) досягає продуктивності, що наближається до рівня 1 MIPS на МГц, забезпечуючи розроблячів можливість оптимізувати рівень енергоспоживання відповідно до необхідної обчислювальної продуктивності.

Atmega161(L) має: 16 Кбайт Flash - пам'яті з підтримкою функцій внутрісистемного, або саме- програмування, 512 байт EEPROM, 1Кбайт SRAM, 35 ліній I/O загального призначення, 32 робочих регістрів загального призначення, контролер реального часу (RTC), 3 універсальних таймера/лічильника з режимами порівняння, внутрішній й зовнішній переривання, 2 програмувальних послідовних UART, програмувальний таймер, що стежить, із вбудованим тактовим генератором, SPI- послідовний порт, а також, програмно обрані режими економії енергоспоживання. Режим очікування «IdleMode» зупиняє CPU, але дозволяє функціонувати SRAM, таймеру/лічильникам, порту SPI і системі переривань. Режим економії енергоспоживання «PowerDown» зберігає вміст регістрів і SRAM, але зупиняє тактовий генератор, відключаючи всі інші функції мікроконтролера, аж до наступного зовнішнього переривання, або до апаратної ініціалізації. У режимі економії енергоспоживання (PowerSave) тактовий генератор таймера продовжує функціонувати, дозволяючи користувачеві підтримувати контроль часу в той час, як усі інші функції мікроконтролера відключені [9].

На рис. 6 приведена структурна схема мікропроцесорного пристрою керування ємністю додаткових конденсаторів та баластним навантаженням ВЕУ, для роботи її в точці відбору максимальної потужності із стабілізацією вихідної напруги ВЕУ.

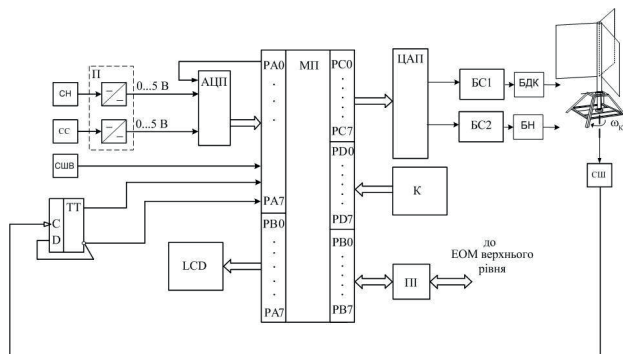


Рис. 6. Структурна схема мікропроцесорного пристрою керування ємнісним струмом АГ ВЕУ

На схемі: СШВ – сенсор швидкості вітру; СШ – сенсор кутової швидкості обертання ВК; СН – сенсор напруги на навантаженні; СС – сенсор струму навантаження; П – нормуючий перетворювач; МК – мікроконтролер; К – клавіатура; ПІ – послідовний інтерфейс; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; БС1-2 – блок симісторів; БДК – блок додаткових конденсаторів; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, ТТ – D- тригер.

Пристрій забезпечує вимірювання і аналіз параметрів роботи ВЕУ і на основі цього здійснює регулюючий вплив через каскадний підсилювач на збудження АГ ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну. Пристрій забезпечує роботу для двох режимів – нечіткої та чіткої логіки, залежно від швидкості обертання вітрового колеса.

Сигнали з виходу сенсорів параметрів СН, СС, СШВ, СШ, які відповідають значенню швидкості вітру, кутової швидкості обертання ВК, значення напруги на виході ВЕУ та струму, що віддається в навантаження, подаються через перетворювач рівнів сигналів П, який приводить вхідні сигнали до рівня напруги, яка необхідна для нормальної роботи мікроконтролера МК, на відповідні входи РА0–РА7 8-канального АЦП. При цьому, сигнал від СШ поступає на вхід МК через D-тригер, який служить для того, що отримувати інформацію про швидкість при наявності імпульса від сенсора, так і під час паузи.

Мікроконтролер МК здійснює по черговому підключення кожного вимірювального каналу і відпрацьовує отриманий сигнал згідно закладеного алгоритму.

Рідкокристалічний програмований індикатор LCD та клавіатура К дозволяє організувати обмін даними між мікроконтролером б та оператором для керування роботою пристрою. Перетворювач рівнів сигналів 8 забезпечує зв'язок мікроконтролера МК з ЕОМ верхнього рівня. Сигнали із виходів РС0–РС7 подаються на цифроаналоговий перетворювач ЦАП, із якого вихідний аналоговий сигнал поступає на каскадний підсилювач ПП, підсилений сигнал із підсилювача поступає на блок симісторів, що регулюють емісійний струм ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну.

Реалізація і експериментальне дослідження запропонованої схеми ВЕУ потребують значних матеріальних і часових витрат. В зв'язку з вище викладеним, експеримент був імітаційний. Натуральний експеримент являє собою дослідження ВЕУ з метою підтвердження теоретичних розробок та отримання необхідних залежностей для використанні їх в імітаційному експерименті. При імітаційному моделюванні використовується робота ВЕУ.

Натуральний експеримент ВЕУ проводився в умовах шахти «Родіна» на горизонті 1315м. в 2012р. Метою експерименту було вирішення наступних задач:

- оцінка теоретичних постулатів можливості використання ВЕУ з вертикальною віссю обертання в умовах підземних виробок залізрудних шахт;
- перевірка передбачуваної методики оцінки виробленої ВЕУ енергії в умовах залізрудної шахти;
- отримання зовнішніх характеристик: залежності величини напруги та частоти струму від величини швидкості вентиляційного потоку у підземних виробках залізрудних шахт.

Для вирішення поставлених задач досліджувалась експериментальна модель спроектованої ВЕУ. В ході експериментальних досліджень було проведено спостереження за швидкістю вентиляційного потоку у передбачуваних місцях можливої установки ВЕУ, що відображено на рис. 7, та потужністю, вироблених ВЕУ.



Рис. 7. Місце можливого монтажу ВЕУ

Під час проведення експериментальних досліджень та моделювання при цьому роботі ВЕУ із системою керування на базі нечітких правил були отримані графіки, які ілюструють особливості роботи СК.

Під час проведення експерименту щодо роботи ВЕУ із системою керування на базі нечітких правил були отримані графіки, які ілюструють особливості роботи СК.

На рис. 8 представлений графік зміни швидкості повітряного потоку протягом певного часу.

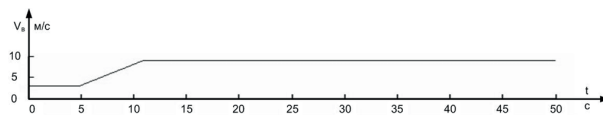


Рис. 8. Графік зміни швидкості повітряного потоку протягом певного часу

На рис. 9 представлений графік зміни частоти обертання вітрового колеса зі зміною швидкості повітряного потоку.

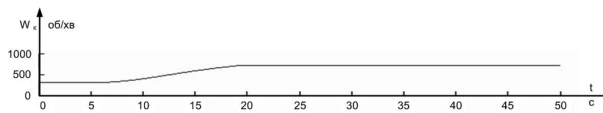


Рис. 9. Графік зміни частоти обертання генератора зі зміною швидкості повітряного потоку

На рис. 10 представлений графік зміни вихідної напруги генератора за певний проміжок часу зі зміною швидкості повітряного потоку.

У даному випадку до схеми введено систему керування вихідною напругою асинхронного генератора, тому її значення залишається в межах номінального, незважаючи на зміну швидкості повітряного потоку.

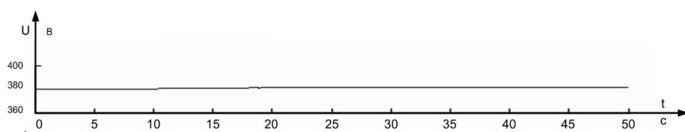


Рис. 10. Графік зміни вихідної напруги генератора за певний проміжок часу зі зміною швидкості повітряного потоку

Очевидно, що система керування є достатньо стійкою по каналу керування напругою на навантаженні, що означає отримання якісної електроенергії від ВЕУ.

Порівняння експериментальних і розрахункових даних вказує на схожість на рівні 90 % по критерію Пірсона (рис. 11) [10].

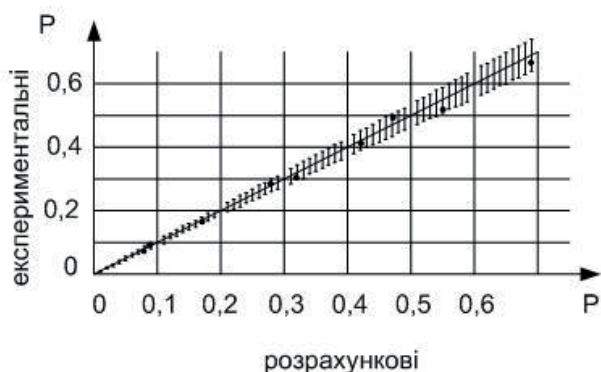


Рис. 11. Експериментальні та розрахункові значення виробленої ВЕУ енергії, кВт год

Дослідження на імітаційній моделі дали можливість одержати ряд потрібних даних. Для перевірки відповідності імітаційної моделі реальним умовам проведено порівняльний аналіз. В якості критерія порівняння прийнято кількість енергії, що виробляє ВЕУ за годину. Результати порівняння вказують на відповідність на рівні 90 % по критерію Пірсона (рис. 11) [10].

## 5. Висновки

1. Обґрунтовано доцільність та розроблена і реалізована тактика «конструювання» електромеханічного комплексу вітрової генеруючої установки з визначенням ефективності її застосування в умовах підземних виробок залізрудних шахт. Показано, що найбільшого ефекту від застосування вітрових електротехнічних комплексів з вертикальною віссю обертання вітрового колеса можна досягти при їх застосуванні для електропостачання в умовах ЗРШ.

2. Обґрунтовано та запропоновано систему керування електротехнічним комплексом вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, котра забезпечує його роботу у точці максимуму відбору потужності ВЕУ. В запропонованій структурі передбачено використання як ПП-регулятора, так і нечіткого регулятора, кожний із яких включається в роботу в залежності від співвідношення заданої уставкою та реальної швидкості вітру і дозволяє здійснювати керування одночасно у функції напруги та максимуму відбору потужності.

3. Для покращення якості електричної енергії, отримуваної за допомогою електротехнічного комплексу ВЕУ з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, удосконалено математичну модель процесу керування з застосуванням теорії нечітких множин і запропоновано структуру нечіткого регулятора та комбінованого пристрою керування, а також їх мікропроцесорну реалізацію на базі контролера з підтримкою FuzzyLogic, який реалізовує закони керування.

4. Запропоновано структуру електроенергоєфективного електромеханічного перетворювача для прямого перетворення енергії вітру в електричну енергію і адаптовано до неї методику визначення усіх її параметрів та приведено приклад розрахунку для конкретних вихідних умов.

5. Експериментально перевірені теоретичні положення і розраховано похибку моделі, яка складає 12 %, що підтвердило адекватність розроблених математичних моделей.

## Література

1. Энергоэффективность та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А. К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007 – 560 с.
2. Бойко, С. М. До питання вибору електричного генератора для вітрогенеруючої установки з вертикальною віссю обертання в умовах залізрудних шахт [Текст] / С. М. Бойко, А. М. Ялова, О. М. Сінчук. – Донецьк, 2012. – С. 88–89.
3. Патент України, МПК F03D 9/00 Спосіб розташування вітроустановки в діючих виробках шахт / О. Н. Сінчук, С. М. Якимець, Д. А. Шокар'єв, С. М. Бойко, М. А. Щербак; патент України № 80828, заява №u201215007 від 27.12.2012, опубл. 10.06.2013. Бюл. №11, 2013 р.
4. Патент України, МПК F03D 3/04 Повітровідбивач для вітрової енергетичної установки з вертикальною віссю обертання / О.Н. Сінчук, С.М. Якимець, С.М. Бойко, М.А. Щербак; патент України № 808278, заява №u201215006 від 27.12.2012, опубл. 10.06.2013. Бюл. №11, 2013 р.
5. Патент України, МПК H02P9/00 Система керування асинхронним генератором у складі вітроелектротехнічного комплексу / О.Н. Сінчук, Д.А. Михайличенко, С.М. Бойко, М.А. Щербак; патент України № 84633, заява №u201305538 від 29.04.2013, опубл. 25.10.2013. Бюл. №20, 2013 р.
6. Moor, G. Power point trackers for wind turbines [Text] / G. Moor, H. Beukes // Power Electronics Specialist Conference (PESC). – 2004. – P. 2044–2049.
7. Nakamura, T. Optimum control of ipmsg for wind generation system [Text] /T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda, // Power Conversion Conference (PCC). – 2002. – Vol. 3. – P. 1435–1440.



8. Wang, Q. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems [Text]/ Q. Wang, L.-C. Chang// IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19. – P. 1242–1249.
9. Koutroulis, E. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications [Text] / E. Koutroulis, K. Kalaitzakis// IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Vol. 53.
10. Datta, R. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system [Text]/ R. Datta, V.-T. Ranganathan// IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2003. – Vol. 18. – P. 163–168.

*Наведено розроблену принципову схему руху крапель рідини в факелі розпилювання відцентрової форсунки. В результаті теоретичного аналізу руху крапель рідини в факелі розпилювання відцентрової форсунки і використання експериментальних даних щодо середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель запропоновано методику визначення дійсної міжфазної поверхні процесів тепломасообміну в контактних газорідних апаратах крапельного типу*

*Ключові слова: відцентрова форсунка, об'ємно-поверхневий діаметр крапель, контактний, теплоутилизатор, міжфазна поверхня, активна зона*

*Приведена разработанная принципиальная схема движения капель жидкости в факеле распыления центробежной форсунки. В результате теоретического анализа движения капель жидкости в факеле распыления центробежной форсунки и использования экспериментальных данных по средним объемно-поверхностным диаметрам капель предложена методика определения действительной межфазной поверхности процессов теплообмена в контактных газожидкостных аппаратах капельного типа*

*Ключевые слова: центробежная форсунка, объемно-поверхностный диаметр капель, контактний, теплоутилизатор, межфазная поверхность, активная зона*

УДК 536.423.4

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНІ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В КОНТАКТНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРАХ КРАПЕЛЬНОГО ТИПУ

**М. К. Безродний**

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри\*

E-mail: m.bezrodny@kpi.ua

**М. Н. Голяд**

Старший викладач\*

E-mail: goliad.n@mail.ru

**А. Ю. Рачинський**

Аспірант\*

E-mail: artur\_rachinskii@mail.ru

\*Кафедра теоретичної та

промислової теплотехніки

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут”

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

### 1. Вступ

В наш час через невідпинне зростання вартості матеріальних та енергетичних ресурсів все актуальнішими стають проблеми ресурсо- і енергозбереження. Одним із шляхів вирішення цих проблем є використання високоінтенсивних контактних апаратів крапельного типу з реалізацією наступної двофазової системи: суцільна газова фаза – краплі рідини [1, 2]. Напрямки руху фаз в таких апаратах можуть бути різноманітними. Генераторами крапель рідини в таких системах виступають різного типу, найчастіше відцентрового, форсунки, що використовують потенційну енергію рідини на вході в ці розпилювачі і які мають, в порівнянні з іншими подібними пристроями, найпростішу конструктивну схему [3]. Прикладом такого контактного апарату може бути теплоутилизатор відхідних газів, наприклад, котельної установки [4]. Цей апарат дає змогу не тільки підвищувати к.к.д. котельного агре-

гату, але й забезпечити глибоку утилізацію теплоти відхідних газів з подальшим використанням нагрітої в ньому води в якості нижнього джерела теплоти для теплонасосної установки теплопостачання житлових будівель [5].

Однак при створенні методики розрахунку таких апаратів постає одна суттєва проблема – це визначення величини міжфазової поверхні, на якій реалізуються процеси переносу. До цих пір в практиці розрахунків подібних апаратів використовувалася, в основному, умовна поверхня передачі теплоти та маси. В якості останньої, як правило, приймалися характерні геометричні параметри апаратів (наприклад, площа поперечного перерізу установки і т. інше) [6, 7]. Цілком зрозуміло, що методики розрахунку, побудовані на основі використання умовної поверхні передачі теплоти і маси, є достатньо грубими і не можуть забезпечити необхідну точність розрахунку параметрів таких апаратів. В зв'язку з цим в даній статті запропоновано і реалі-