

Термодинамика и регуляция превращений свободной энергии в биосистемах: Пер. с англ. – М., 1992. – 686 с. 8. Эткин В.А. Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1991. – 168 с. 9. Карпов В.Н., Щур И.З. Термодинамика оптических электротехнологий АПК: Основные теоретические положения и рекомендации по применению в научных исследованиях и учебном процессе. – СПб., 1996. – 89 с. 10. Козут А., Щур І.З. Опис динамічних процесів у двигуні постійного струму з точки зору термодинаміки нерівноважних процесів // Електроенергетичні та електромеханічні системи // Вісн. Націон. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 551. – С. 40–45. 11. Щур І.З. Моделирование электроприводов постоянного тока методами линейной термодинамики неравновесных процессов // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков: НГУ “ХПИ”, 2002. – № 12, т. 2. – С. 413–416. 12. Щур І.З., Костинюк Л.Д., Козут А.Р. Электропривод за системою “джерело струму – двигун постійного струму” як термодинамічний перетворювач енергії // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – №479: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 207–212. 13. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – 470 с.

УДК 621.311.24:621.548

І.З. Щур, О.Р. Турленко

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РІЗНИХ СПОСОБІВ ВІДБОРУ ПОТУЖНОСТІ ВІД СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ У ВІТРОЕНЕРГОУСТАНОВЦІ

© Щур І.З., Турленко О.Р., 2009

Використовуючи комп’ютерні моделі, отримано і проаналізовано результати порівняльних досліджень енергетичної ефективності різних способів відбору потужності від електричного генератора вітроенергоустановки. Обґрунтовано раціональні способи для вітроенергоустановок різної складності і вартості.

Using computer models, data of comparative investigations of power efficiency of different methods of power takeoff from the electric generator of wind turbine are got and analysed. Grounded rational methods for wind turbines of different complexity and cost.

Постановка проблеми. Останнім часом у світі спостерігається тенденція зростання використання вітроенергоустановок (ВЕУ) малої потужності, зокрема, з вертикальною віссю обертання, які мають низку істотних переваг над традиційними (з горизонтальною віссю обертання) для роботи за малих швидкостей вітру [1]. Виникають нові завдання дослідження аеродинамічної, електромеханічної, електротехнічної та загалом енергетичної ефективності ВЕУ. У системі генерування електроенергії ВЕУ малої потужності як електричний генератор найбільш доцільно використовувати синхронну машину з постійними магнітами (СМ з ПМ) з різноманітними напівпровідниковими перетворювачами електричної енергії. Останні можуть бути як пасивні, так і активні, що виконують функції автоматичного регулювання: максимального відбору потужності вітру, обслуговування акумуляторних батарей (АБ) керування споживанням електроенергії. Враховуючи це, а також бажання отримання електроенергії за невисоких швидкостей вітру, виникає питання енергетичної ефективності різних способів відбору потужності від СМ з ПМ.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Для роботи ВЕУ в точці максимальної відбору потужності вітру (ТМВП) використовуються різні способи керування з використанням датча вітру (анемометра) або бездатчеві [2]. Існують низка варіантів відбору потужності від СГ з ПМ: нерегульовані – навантаження СГ безпосередньо на активне навантаження або через пасивний випрямляч, регульовані – з DC/DC перетворювачем в ланці постійного струму та з використанням активного випрямляча [3–5]. В останніх способах використовуються системи пошуку ТМВП, а також можна паралельно вирішувати інші завдання регулювання. Для ВЕУ малої потужності, орієнтованих на невисокі середні швидкості вітру, нерегульовані способи відбору потужності від СМ з ПМ не є доцільними, тому вони нас цікавитимуть тільки з точки зору порівняння енергетичної ефективності.

Задача досліджень. Метою роботи є порівняння енергетичних показників різних способів відбору потужності від СМ з ПМ комп'ютерним моделюванням.

Виклад основного матеріалу. ВЕУ малої потужності складаються з вітроротора (ВР), електричного генератора, пристроїв перетворення енергії, споживачів та системи керування (СК). Для математичного моделювання роботи ВР необхідно забезпечити функціональні залежності його основних параметрів – вихідної потужності ВР $P_{ВР}$ та вихідного моменту ВР $M_{ВР}$ – від швидкості вітру V [6]:

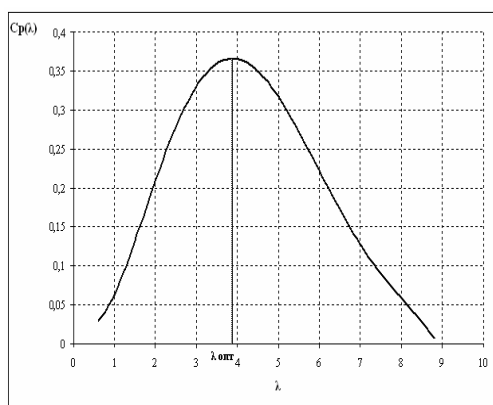
$$P_{ВР} = 0,5 \rho A C_P(\lambda) V^3; \quad (1)$$

$$M_{ВР} = 0,5 \rho A r \frac{C_P(\lambda)}{\lambda} V^2, \quad (2)$$

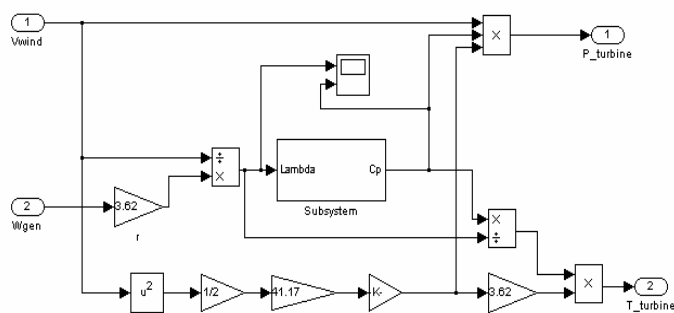
де ρ – густина повітря; $A = \pi r^2$ – площа омивання ВР; $C_P(\lambda)$ – коефіцієнт потужності ВР, який залежить від конструктивних особливостей ВР та його швидкохідності $\lambda = \omega r / V$; ω – кутова швидкість ВР; r – радіус ВР.

Залежність $C_P(\lambda)$ для ВР апроксимуємо поліномом п'ятого порядку (рис. 1, а):

$$C_P(\lambda) = 0,046977 - 0,128468\lambda + 0,19596\lambda^2 - 0,05705\lambda^3 + 0,00621\lambda^4 - 0,000236\lambda^5. \quad (3)$$



а



б

Рис. 1. Зображення вітроротора:
а – залежність коефіцієнта потужності $C_P(\lambda)$ ВР від λ ;
б – модель ВР, створена в програмному середовищі Matlab/Simulink

Використовуючи рівняння (1), (2) та (3), створена комп'ютерна модель ВР (рис. 1, б), на вхід якої надходять значення швидкості вітру V та кутової швидкості генератора $\omega_{ген} = \omega_{ВР}$ (внаслідок відсутності редуктора між ВР та СМ з ПМ). На виході отримуємо момент $M_{ВР}$ та потужність $P_{ВР}$ ВР (рис. 2).

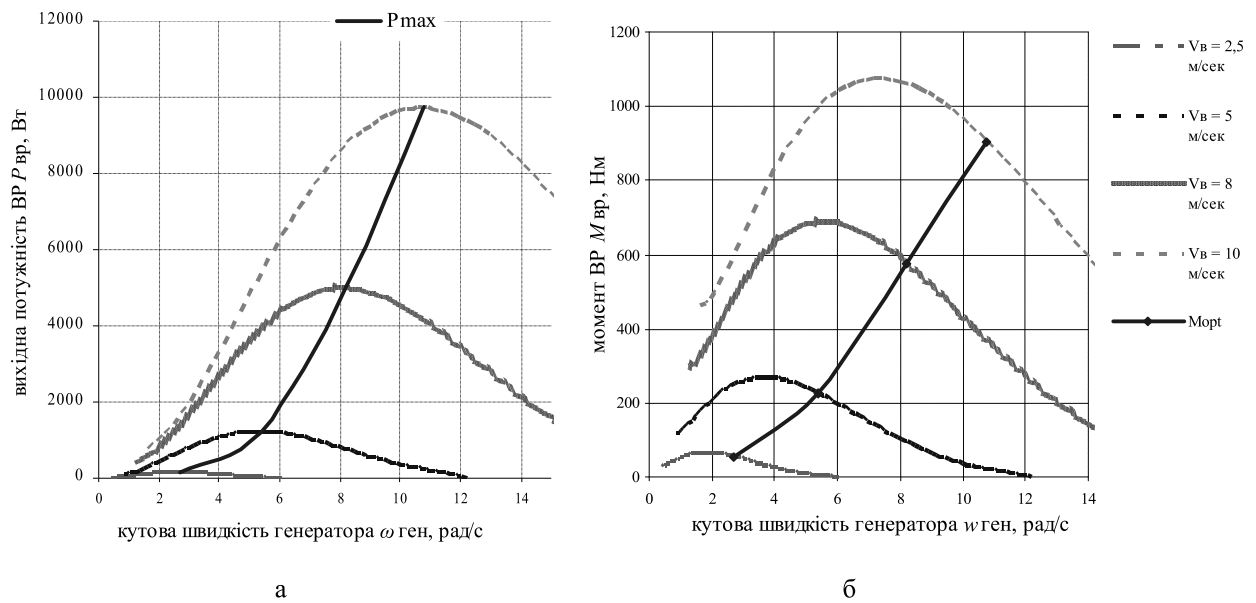


Рис. 2. Вихідні змінні ВР:
a – потужність P_{BR} ; *б* – момент M_{BR} на валу

Моделювання проводили для ВР ($r = 3,62$ м, $A = 41,17$ м²) з номінальною потужністю $P_{BRmax} = 4\,980$ Вт, яка досягається за швидкості вітру $V = 8$ м/с. Для моделювання електричного генератора вибрано багатополісну ($p = 20$) СМ з ПМ з такими параметрами: $R = 0,3$ Ом; $L_d = L_q = 3$ мГн; $\Phi = 0,4$ Вб. Момент інерції ВЕУ становив $J = 10$ кг·м².

Для порівняння були вибрані некеровані та керовані способи відбору потужності. До некерованих належать ті системи, де СМ з ПМ працює безпосередньо (рис. 3, *a*) або через ДМ (рис. 3, *б*) на активне навантаження. Відповідно керованими є такі, в яких використані або активний випрямляч напруги АВН (рис. 3, *в*), або DC/DC перетворювач напруги (рис. 3, *г*), де основним споживачем енергії виступає АБ.

У некерованих способах відбору потужності для роботи на різних швидкостях вітру потрібно підбирати оптимальне активне навантаження так, щоб забезпечити роботу ВР ВЕУ в ТМВП.

У керованих способах використали СК для автоматичного пошуку ТМВП з використанням давача вітру та зворотного зв'язку за швидкістю ВР. Як силовий регулятор застосовували АВН та DC/DC перетворювач підвищувального типу. В АВН використана стратегія керування з орієнтацією вектора струму за вектором ЕРС СМ з ПМ. Це забезпечує співфазність ($\psi = 0$) лінійного струму генератора та фазної ЕРС [7]. Параметри елементів, які використовувались для математичного моделювання керованих систем, такі:

- спосіб з використанням DC/DC перетворювача – $C = 5000$ мкФ, $U_{AB} = 7 \cdot 12 = 84$ В;
- з використанням АВН – $C = 1$ мкФ, $U_{AB} = 13 \cdot 12 = 156$ В.

При різних швидкостях вітру V (2,5; 5; 8; 10 м/с) були визначені ККД СМ з ПМ (рис. 4, *a*), перетворювача (ДМ, DC/DC чи АВН) (рис. 4, *б*) та загальний ККД системи (рис. 4, *в*) усіх вище вказаних способів відбору потужності.

Зниження ККД СМ з ПМ у системі, в якій генератор працює на активне навантаження, відбувається внаслідок зростання потужності та зсуву за фазою струму i відносно ЕРС e (рис. 5, *a*). У системі з використанням ДМ, що працює на активне навантаження, ККД генератора є нижчий внаслідок спотворення форми струму (при низьких швидкостях вітру) або напруги (при високих швидкостях вітру) (рис. 5, *б*), що приводить до різного гармонічного спотворення миттєвої потужності. Спосіб, в якому використовувався керований АВН, виявив найбільший ККД у всьому діапазоні швидкості вітру внаслідок використання стратегії керування з орієнтацією вектора струму за вектором ЕРС.

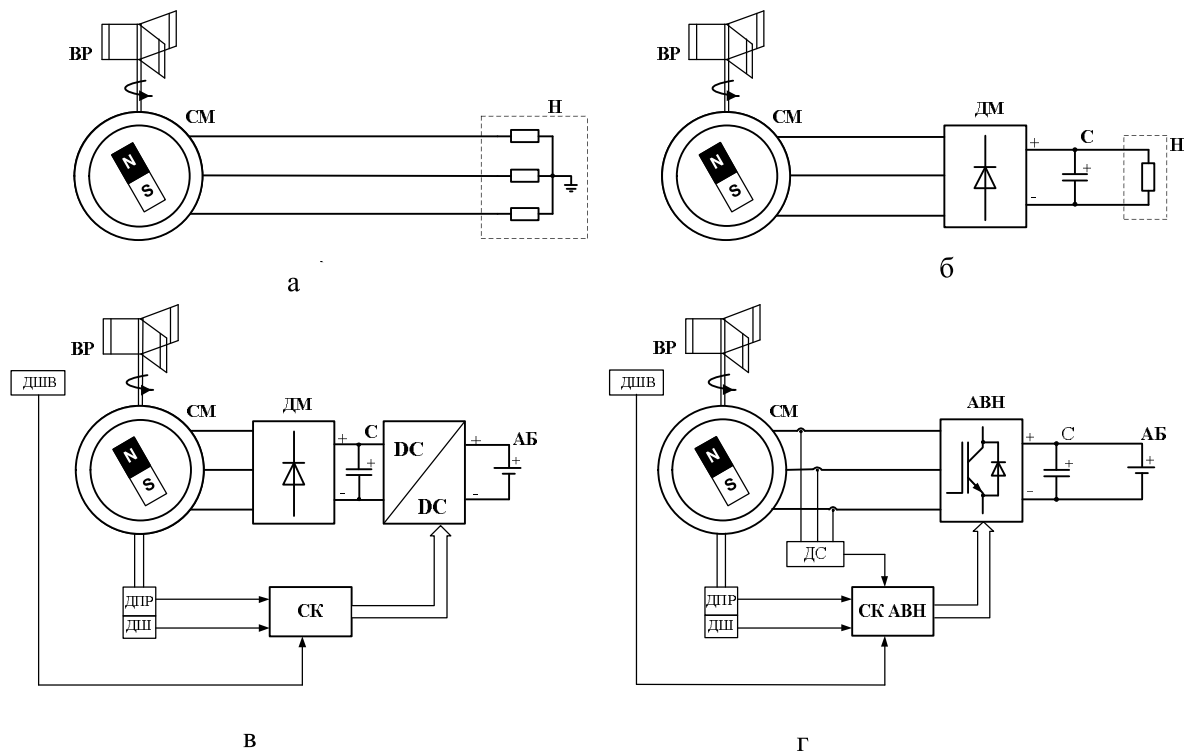


Рис. 3. Різні способи відбору потужності:
 а – безпосередньо на активне навантаження; б – через ДМ на активне навантаження;
 в – ДМ та DC/DC перетворювач на АБ; г – використовуючи АВН на АБ

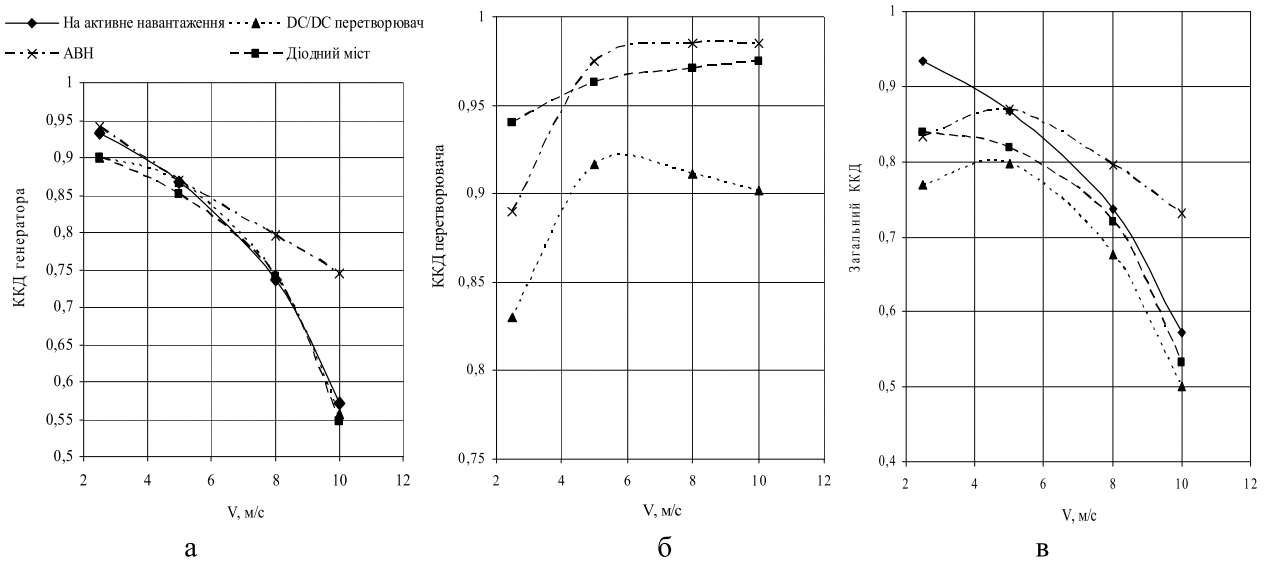


Рис. 4. Результати досліджень систем з різними способами відбору потужності від СМ з ПМ:
 а – ККД генератора; б – ККД перетворювача; в – загальний ККД усієї системи

Усі силові перетворювачі показали високий (що властиво напівпровідниковим перетворювачам), але різний ККД. Зростання втрат в ДМ при зниженні швидкості вітру пояснюється низькою напругою генератора та порівняно великими спадками напруги на діодах ДМ. У DC/DC перетворювачі спостерігаємо знижений ККД внаслідок двократного перетворення електричної енергії та втрат в додаткових елементах (дросель і напівпровідниковий ключ). АВН працює з підвищенням напруги, через те його втрати на високих швидкостях є нижчими. За малих швидкостей вітру (менше 5 м/с) в обох керованих напівпровідникових перетворювачів спосте-

рігасемо зниження ККД, що пов'язано з необхідністю високого підняття вихідної напруги та зростанням при цьому втрат у резистивних опорах реактивних елементів перетворювачів.

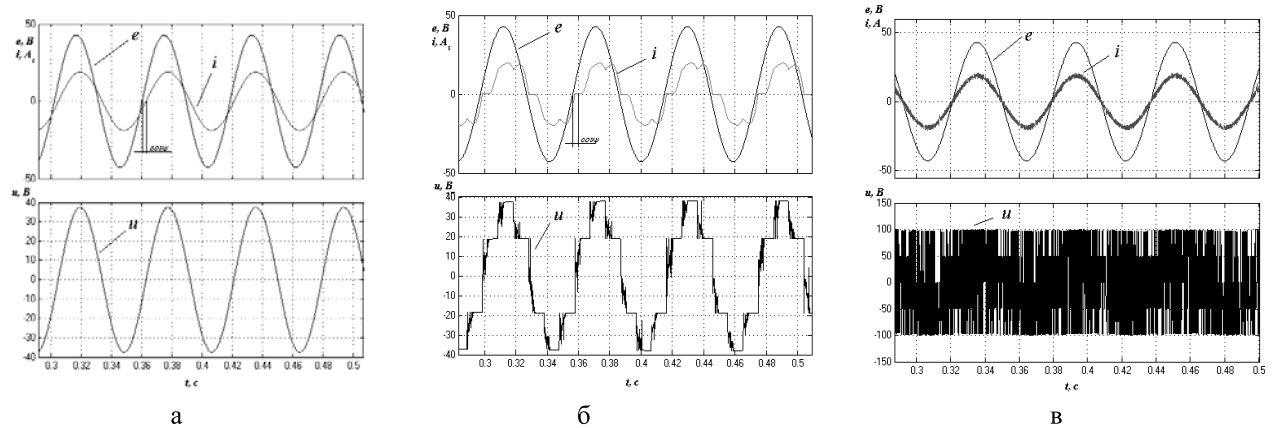


Рис. 5. Осцилограми струму i , напруги u та ЕРС e генератора за різних способів відбору потужності при швидкості вітру $V = 5$ м/с: а – безпосередньо на активне навантаження; б – використовуючи ДМ; в – використовуючи АВН

Загальний ККД є добутком ККД генератора та ККД перетворювача. Вочевидь, загалом найкращі результати продемонстрував спосіб відбору потужності, в якому задіяний АВН, хоча при низьких швидкостях вітру його ККД є доволі низьким (за рахунок втрат в перетворювачі).

Для підвищення ККД способу з DC/DC перетворювачем нами було запропоновано використати конденсаторну батарею КБ, яка під'єднана паралельно до ДМ (рис. 6, а). Це зроблено з метою зменшення зсуву фаз між струмом i та ЕРС e генератора. Проведені дослідження дали змогу обґрунтувати оптимальне значення ємності КБ ($C = 200$ мкФ), за якого зростання ККД на середніх та великих швидкостях вітру є відчутним. За малих швидкостей вітру КБ практично не впливають на загальний ККД.

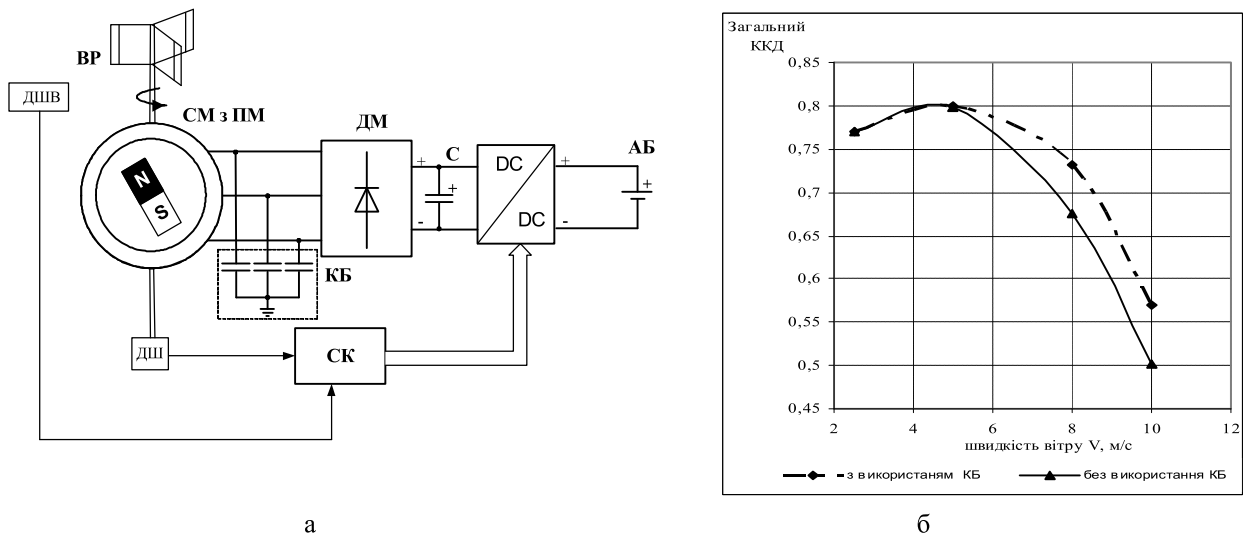


Рис. 6. Система відбору потужності з DC/DC перетворювачем та використанням КБ: а – принципова схема; б – загальний ККД

Висновки. Із врахуванням особливостей ВЕУ малої потужності (роботи за малих швидкостей вітру та на локального споживача) потрібно забезпечити якомога вищу ефективність усіх етапів енергоперетворення: відбір від вітроротора максимально можливої потужності за різних швидкостей вітру, передача отриманої потужності до споживача з мінімальними втратами в усіх елементах електроенергетичної системи, моніторинг усіх процесів. Усі наведені вимоги найкраще забезпечити

системою з використанням АВН. З економічних міркувань, для ВЕУ малої потужності доцільніше буде використовувати замість АВН DC/DC перетворювач з конденсаторними батареями.

З отриманих результатів зрозумілі нові завдання подальших досліджень: підвищення загального ККД ВЕУ на малих швидкостях вітру; розроблення стратегії оптимального керування АВН з врахуванням додаткових втрат в сталі та нерівності індуктивностей по осях d і q в СМ з ПМ ($L_d \neq L_q$).

1. Щур І.З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І.З. Щур, О.Р. Турленко // *Вестн. Нац. ун-та "Харьк. политехн. ин-т": Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.* – Харьков, 2008. – Вып. 30. – С. 418–420. 2. Tan K. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors / Kelvin Tan, Syed Islam // *IEEE Trans. on energy conversion.* – 2004. – Vol. 19, No. 2. – P. 392–399. 3. Neris A.S. A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak ac system / A.S. Neris, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos // *IEEE Trans. on energy conversion.* – 1999. – Vol. 14, No. 1. – P. 122–127. 4. Muteanu I. Optimal control of wind energy systems / Muteanu I., Bratcu A. I., Cutululis N.A., Ceangă E. – London: Springer, 2008. – 284 p. 5. Helle L. Wind turbine systems / L. Helle, F. Blaabjerg // *Control in Power Electronics.* – Academic Press, 2002. – P. 483–510. 6. Bianchi F.D. Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design / Bianchi F.D., Battista H.D., Mantz R.J. – London: Springer, 2007. – 206 p. 7. Monajemy R. Comparison of torque control strategies based on the constant power loss control system for PMSM / R. Monajemy, R. Krishnan // *Control in Power Electronics.* – Academic Press, 2002. – P. 225–250.

УДК 666. 96:621.36

П.Є. Яковчук, Р.А. Солтисік, І.Я. Почапська
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра ОП

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОНАГРІВАННЯ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА СКЛА

© Яковчук П.Є., Солтисік Р.А., Почапська І.Я., 2009

Показано залежність параметрів технологічного регулювання апаратури під час виробництва скла та від його хімічного складу.

The dependence of parameters of the technological adjusting of apparatus is rotined at making of glass and from his chemical composition.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими завданнями. На більшості сучасних виробництв варять скло у великих регенеративних або рекуперативних печах, виконаних з вогнетривких матеріалів. Сучасна технологія виробництва скла передбачає використання печей періодичної та неперервної дії, для обігрівання яких, переважно, використовується нафта, природний газ та енергія електричного струму. Проте, з зростанням цін на енергоносії питання вибору конструкції печі та способу її обігрівання набувають вирішального значення. Важливим є те, що в газових печах горшкового типу тепловий коефіцієнт корисної дії становить 6–7 %, газова піч неперервної дії ванного типу має коефіцієнт корисної дії в межах 10–15 %, а цей показник для печі з електричним обігріванням досягає 40–70 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У промисловості застосовують три основні типи печей: газополум'яні, газополум'яні з електричним підігріванням та електричні. Під час вироб-