

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОТОКАМИ В КОГЕНЕРАЦІЙНІЙ АВТОНОМНІЙ ВІТРОЕНЕРГОУСТАНОВЦІ

**Вступ.** Упродовж останніх років стрімко розвивається новий напрям вітроенергетики, спрямований на освоєння вітроенергоресурсу низького потенціалу. Таке завдання успішно вирішують через використання автономних вітроенергоустановок (ВЕУ) малої потужності (0,5-30 кВт) з вертикальною віссю обертання (ВВО) [1]. Задля зниження питомої вартості установки, розширення її функціональності й, у кінцевому варіанті, скорочення терміну окупності, пропонуємо гібридну ВЕУ, яка базується на принципі когенерації, – генерує та акумулює отриману від вітру механічну енергію як у вигляді електричної, так і теплової енергії [2]. До складу такої ВЕУ, крім електричного синхронного генератора з постійними магнітами (СППМ) та електрохімічного акумулятора, входить спеціальний тепловий генератор, який перетворює механічну енергію вітроротора (ВР) безпосередньо в теплоту, що виділяється в масиві ротора генератора за посередництвом змінного відносно цього ротора магнітного поля [3]. Величину генерованого теплового потоку можна просто змінювати, регулюючи збудження теплового генератора, а нагромаджену в його резервуарі теплоту необхідно періодично перекачувати в тепловий акумулятор – побутовий бойлер гарячої води.

**Постановка завдання.** Нова нетипова конфігурація запропонованої когенераційної ВЕУ з електричним і тепловим генераторами та акумуляторами енергії зумовлює необхідність розроблення відповідної системи автоматичного керування, яка гарантуватиме максимальне використання всієї доступної ВР механічної енергії вітру, забезпечуватиме дотримання встановлених пріоритетів у використанні та нагромадженні енергії різних видів, а також здійснюватиме менеджмент роботи електрохімічних акумуляторних батарей.

**Матеріали дослідження.** Система когенераційної ВЕУ з ВВО, функціональна схема якої наведена на рис. 1, складається з ВР, блока генераторів у складі електричного СППМ і теплового генератора – електромагнітного перетворювача механічної енергії в теплоту (ЕПМЕТ), електронних регуляторів – активного випрямляча напруги (АВН), для регулювання електричного навантаження СППМ, і перетворювача постійної напруги (ППН), для регулювання струму в обмотці збудження (ОЗ) ЕПМЕТ, а також пристроїв акумулювання енергії – електричної в акумуляторній батареї (АБ) і теплової в бойлері з водою.

САК роботою ВЕУ реалізує дворівневий алгоритм керування. Для цього до САК подаємо сигнали з енкодера Е, встановленого на осі обертання блоку генераторів, та від датчиків струмів ДС і температур ДТ.

На нижньому рівні здійснюється регулювання потужності електричного навантаження СППМ і теплового потоку ЕПМЕТ за сигналами завдання від САК верхнього рівня. Обидва ці потоки (потужності) безпосередньо формують момент механічного навантаження ВР. За сигналами від Е про кут положення ротора  $\theta$  та з ДС3 на вході АВН за допомогою гістерезистичних регуляторів ГРС струмів фаз СППМ і векторного керування АВН забезпечується синусоїдальність цих струмів та  $\cos\varphi = 1$ . Регулювання струму в ОЗ ЕПМЕТ здійснюється в замкненій системі за допомогою ДС4.

На верхньому рівні САК формуються сигнали завдання для підсистем нижнього рівня з метою забезпечення оптимального механічного навантаження ВР, за якого від вітру зі змінною швидкістю відбирається максимальна потужність. Це можна зробити або за допомогою СППМ з АВН, або за допомогою ЕПМЕТ з ППН.

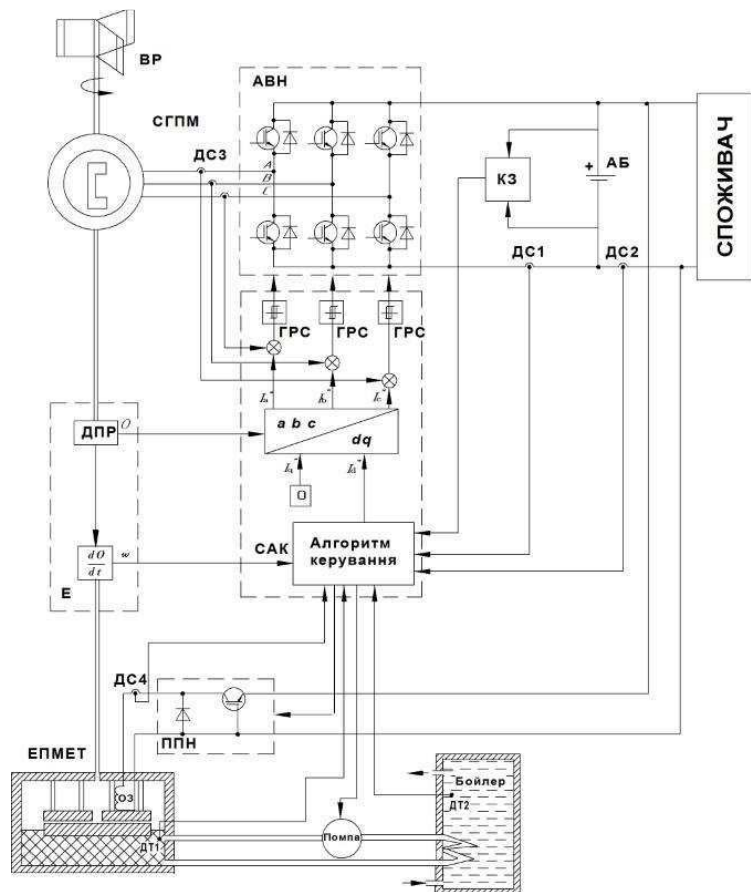


Рис. 1. Функціональна схема системи когенераційної ВЕУ з ВВО

За паралельної роботи обох каналів генерування енергії, оптимальне регулювання навантаження ВР здійснюється ППН, оскільки ЕПМЕТ забирає на себе надлишкову механічну енергію, в той час як АВН або забезпечує необхідну потужність електроенергії споживачеві, або обмежує на максимально можливному рівні струм заряджання АБ. Для роботи САК верхнього рівня одержує сигнали від Е про кутову швидкість ВР, від давачів струмів на виході АВН – ДС1 та споживача – ДС2 та від давачів температур у резервуарі ЕПМЕТ – ДТ1 і в бойлері – ДТ2, за різницею показів яких подається сигнал на вмикання та вимкнення помпи, що перекачує теплоносії з резервуару ЕПМЕТ через бойлер.

Для керування на верхньому рівні розроблений алгоритм керування (рис. 2) потоками електричної і теплової енергії за стохастичного характеру, як для генерування, так і споживання енергії. Пріоритетним є генерування електроенергії та пряма передача її споживачеві. В залежності від потреб останнього ВЕУ може генерувати тільки електричну, тільки теплову або обидва види енергії. В усіх цих режимах забезпечується екстремальне керування й відбір максимальної потужності від вітру за змінної його швидкості. Алгоритм працює таким чином.

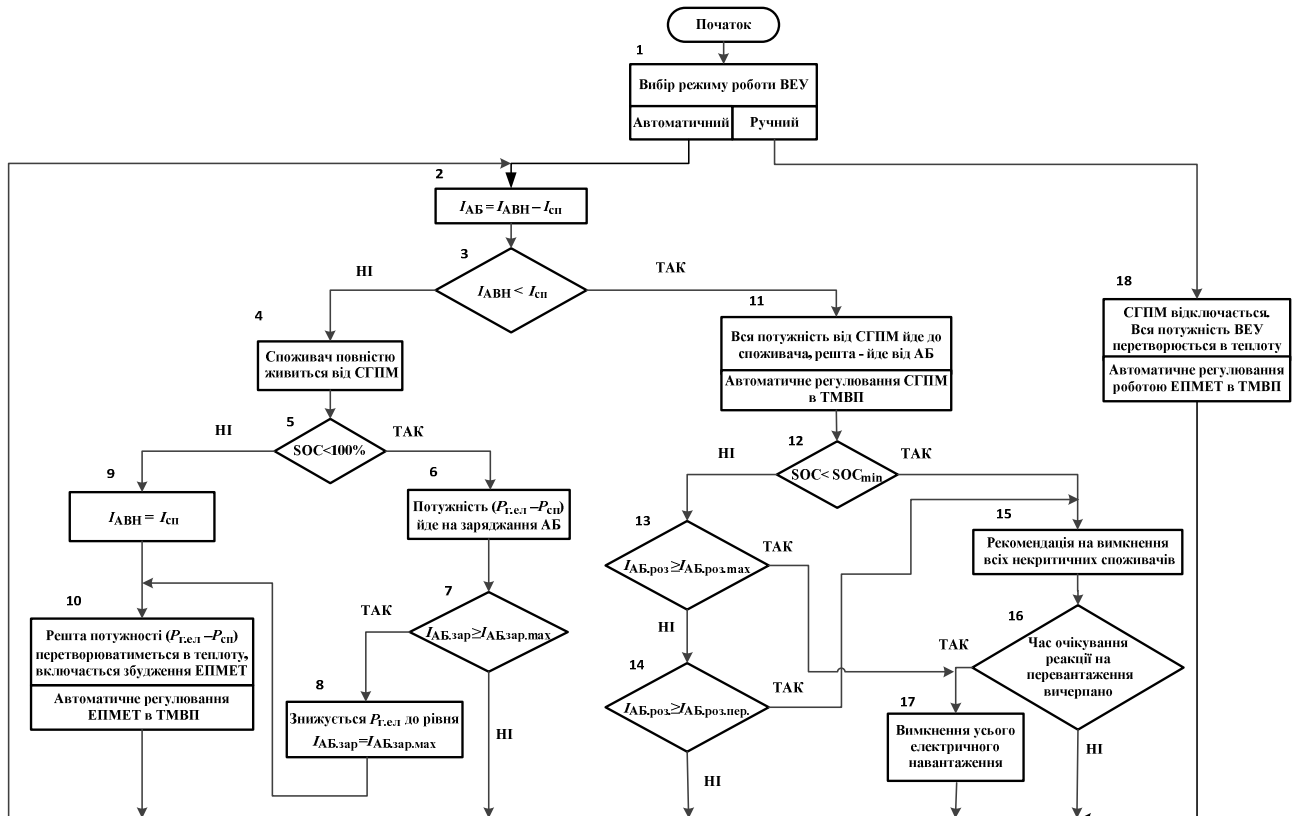


Рис. 2. Алгоритм керування енергопотоками на верхньому рівні САК

У блоці 1 здійснюється вибір режиму роботи ВЕУ: «автоматичний» чи «ручний». При «автоматичному» режимі у блоці 2 визначається струм АБ  $I_{AB}$  як різниця між струмом на виході АВН  $I_{AVN}$  та струмом споживання  $I_{CP}$ . У блоці 3 порівнюється струм на виході ВЕУ зі струмом споживання. При умові  $I_{AVN} > I_{CP}$ , споживач буде повністю жити від СГПМ (блок 4).

На АБ ставимо обмеження їхнього ступеня зарядженості (state of charge) SOC. Наприклад, для свинцево-кислотних АБ, які переважно застосовують у ВЕУ, допустимий діапазон роботи АБ перебуває в межах  $SOC = 50 \dots 100\%$ . Якщо  $SOC < 100\%$  (блок 5) – надлишковий струм  $I_{AVN} - I_{CP}$  витратиться на зарядження АБ (блок 6). Якщо зарядний струм АБ є більший за максимальний  $I_{AB,зар} \geq I_{AB,зар,max}$  (блок 7), генерована електрична потужність  $P_{г,ел}$  знижується до такого рівня, щоб  $I_{AB,зар} = I_{AB,зар,max}$  (блок 8). Решта потужності ВР у цьому випадку братиме на себе ЕПМЕТ, який забезпечуватиме і функцію автоматичного регулювання оптимального навантаження ВЕУ – робота в точці максимального відбору потужності (ТМВП) (блок 10). Якщо АБ зарядиться повністю ( $SOC = 100\%$ ), то генерована електрична потужність  $P_{г,ел}$  знижується до такого рівня, щоб  $I_{AVN} = I_{CP}$  (блок 9). При цьому струм заряджання АБ рівним нулеві, і АБ не перезаряджатиметься. Решту потужності ВР знову візьме на себе ЕПМЕТ (блок 10).

Якщо генерована електрична потужність є меншою за споживану ( $I_{AVN} < I_{CP}$ , блок 3), вся електрична потужність від АВН йде до споживача, а решту необхідної споживачем потужності забезпечує АБ (блок 11). При цьому автоматичне регулювання навантаження СГПМ здійснюється в ТМВП. У таких режимах роботи можливе перевантаження АБ великими струмами, а перерозрядження АБ – нижче допустимого мінімального рівня ступеня зарядженості, чому має запобігати система керування.

Якщо АБ ще не розряджена до мінімального рівня  $SOC > SOC_{min}$  (блок 12), система контролює значення розрядного струму, порівнюючи його з максимально допустимими  $I_{AB,роз,max}$  (блок 13). У разі його неперевищення розрядний струм порівнюється у блоці 14 з рівнем 10-секундного перевантаження АБ  $I_{AB,роз,пер}$  (блок 14). З перевищенням цього рівня споживачеві подають звукову та візуальну рекомендації на вимкнення некритичних споживачів (блок 15) і починається відлік заданого часу на це вимкнення (блок 16). По закінченні визначеного часу, у випадку незмінності ситуації перевантаження, система відмикає все електричне споживання (блок 17). Така ж реакція передбачена, якщо  $I_{AB,роз} \geq I_{AB,роз,max}$  (блок 13). В усіх цих випадках подальша робота ВЕУ забезпечується за лівою частиною алгоритму (блоки 4-10): буде максимально заряджатися АБ, а після перевищення зарядним струмом допустимого рівня підключатиметься ЕПМЕТ. Робота ВЕУ завжди здійснюватиметься в ТМВП.

У «ручному» режимі роботи СГПМ відключається, вся потужність ВЕУ перетворюється в теплоту, при цьому автоматичне регулювання ЕПМЕТ здійснюється в ТМВП (блок 18).

Регулювання оптимального механічного навантаження ВР здійснюється за збуренням змінної швидкості вітру  $V_B$  у бездавачевій (без давача швидкості вітру) системі. Відповідно до цього принципу [4], момент сумарного навантаження на валу ВР формується пропорційно до квадрату кутової швидкості ВР  $\omega$ :

$$M_{ВР} = k_M \omega^2, \quad (1)$$

де  $k_M = 0,5 \rho A C_{P,max} (r/\lambda_{opt})^3$  – сталий для конкретного ВР коефіцієнт;  $\rho$  – густина повітря;  $A = \pi r^2$  – площа омивання ВР;  $C_{P,max}$  – максимальне значення коефіцієнта використання вітроротором потужності вітру, яке досягається за оптимального значення швидкохідності ВР  $\lambda_{opt}$ ;  $r$  – радіус ВР.

Залежність  $C_P(\lambda)$  характеризує аеромеханічні властивості ВР і нелінійно залежить від його швидкохідності  $\lambda = \omega r / V_B$  – відносної лінійної швидкості ВР, причому для різних вітророторів існують свої криві, одержані експериментальним шляхом, наприклад, їх дослідженнями в аеродинамічній трубі. У нашому випадку використовуємо залежність  $C_P(\lambda)$  для ВР з ВВО Н-типу, яка наведена на рис. 3 і описується наступним рівнянням [5]:

$$C_P(\lambda) = 1,14 \left( \frac{9,47}{\lambda} - 1 \right) e^{-\frac{6}{\lambda}}. \quad (3)$$

Показана на рис. 3 залежність  $C_P(\lambda)$  забезпечує максимальне значення коефіцієнта  $C_{P,max} = 0,351$  за оптимальної швидкохідності ВР  $\lambda_{opt} = 3,675$ .

**Математичне моделювання роботи когенераційної ВЕУ.** Для математичного моделювання та дослідження роботи ми взяли когенераційну ВЕУ з ВВО з номінальними значеннями електричної й теплової потужності 5 кВт, кожна з яких окремо досягається при швидкості вітру 8 м/с. Параметри ВР для такої ВЕУ, після відповідних розрахунків, такі:  $A = 50,25 \text{ м}^2$ ,  $r = 3,54 \text{ м}$ ,  $n_n = 79,2 \text{ об/хв}$ . За швидкості вітру 10 м/с такий ВР спроможний забезпечити сумарну вихідну потужність 10 кВт, тобто максимальне генерування енергії двома шляхами – електричним і тепловим. Таку ж потужність можна короткочасно отримати по кожному з каналів окремо за допомогою двократного перевантаження. За такого ж перевантаження можна короткочасно отримати вже 20 кВт згенерованої енергії при швидкості вітру 12,5 м/с. Ці прості розрахунки показують енергетичні переваги когенераційної ВЕУ в порівнянні з традиційною.

Параметри СГПМ номінальною потужністю 5 кВт з розміщеними на поверхні ротора постійними магнітами визначені на підставі комп'ютерного моделювання та мали такі значення: опір обмотки якоря  $R = 0,5 \text{ Ом}$ ;

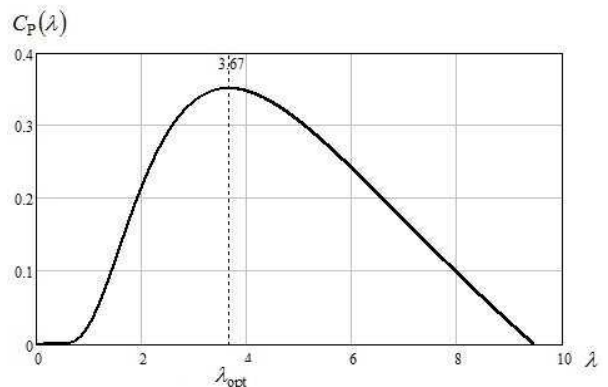


Рис. 3. Залежність коефіцієнта використання ВР потужності вітру  $C_P(\lambda)$  від його швидкохідності  $\lambda$

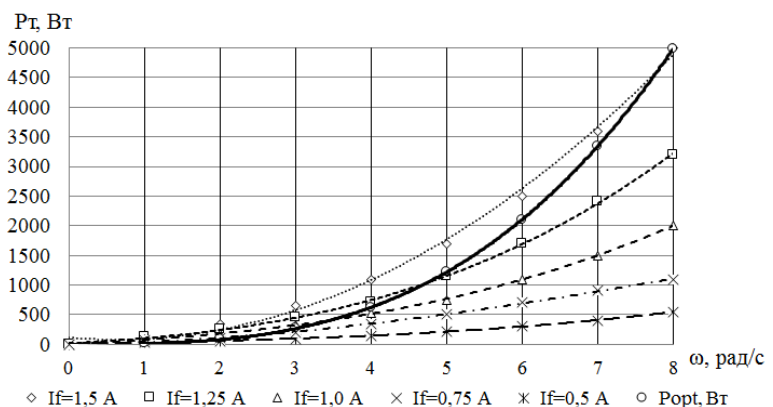


Рис. 4. Залежність генерованої теплової потужності ЕПМЕТ від його кутової швидкості при різних значеннях струму збурення  $I_f$

індуктивності обмотки якоря по осях  $d-q$ , зв'язаних з ротором,  $L_d = L_q = 5$  мГн; амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з потоком одного полюса  $\Psi_m = 0,32$  Вб; кількість пар полюсів  $p = 38$ ; сумарний момент інерції на валу (ВР з роторами СГПМ та ЕПМЕТ)  $J_\Sigma = 100$  кг·м<sup>2</sup>.

Робочі характеристики ЕПМЕТ з номінальною тепловою потужністю 5 кВт (рис. 4) сформовані аналогічно до отриманих теоретично та підтверджених експериментально в макетному взірці ЕПМЕТ потужністю 0,5 кВт.

Точка номінального режиму дослідного ЕПМЕТ вибрана такою, що відповідає потужності 5000 Вт при частоті обертання 80 об/хв. Для оптимального навантаження ВР, відповідно до виразу (1), отримуємо кубічну залежність необхідної потужності навантаження від кутової швидкості:  $P_{opt} = k_M \omega^3$ . Отже, з метою

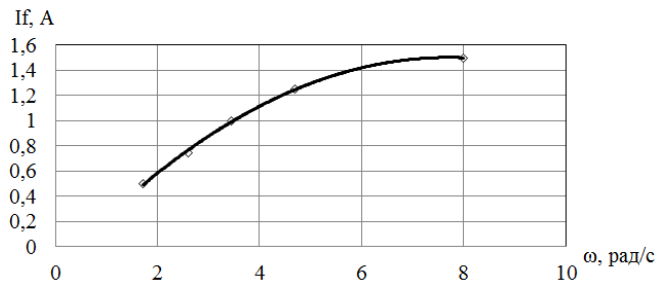


Рис. 5. Регульовальна характеристика ЕПМЕТ при його роботі в точках максимальної потужності ВР

оптимального навантаження ВР, за умови нехтування тертям в опорах, САК ЕПМЕТ повинна створювати потужність навантаження на його осі, відповідно до отриманого виразу (крива  $P_{opt}$  на рис. 4). На перетині цієї кривої із сімейством робочих характеристик ЕПМЕТ визначені точки його регульовальної характеристики (рис. 5), використані для побудови системи автоматичного регулювання збудження ЕПМЕТ.

АБ вибрані свинцево-кислотні з робочою напругою 220 В (18 батарей, з'єднаних послідовно). Розрахована ємність батарей становить 60 А·год, що забезпечує середній одноденний запас електроенергії для приватного коледжу.

**Комп'ютерна модель автономної гібридної ВЕУ.** Дослідження роботи автономної когенераційної ВЕУ проводилося за допомогою комп'ютерного симулювання її роботи на турбулентному вітрі в середовищі MATLAB/Simulink. Основні підсистеми розробленої загальної комп'ютерної моделі когенераційної ВЕУ (рис. 6) є такими:

- Turbulence Wind Subsystem (підсистема турбулентного вітропотуку) [6];
- Wind Turbine Subsystem (підсистема ВР);
- Electric Subsystem (підсистема векторного керування СГПМ);
- Hit Generator Subsystem (підсистема ЕПМЕТ);
- Hit Container Subsystem (підсистема передачі теплоти до бойлера);
- Energy Flow Control Subsystem (підсистема керування ВЕУ на верхньому рівні);
- Current Consumption Subsystem (підсистема споживача електричної енергії).

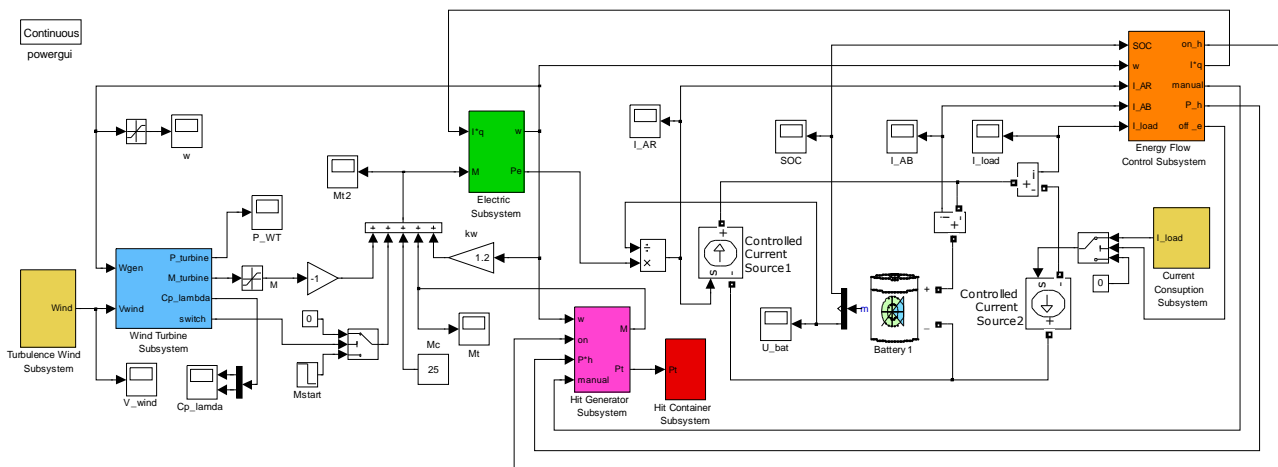


Рис. 6. Загальна комп'ютерна модель автономної когенераційної ВЕУ

**Результати комп'ютерного симулювання.** Для перевірки коректності роботи розробленої системи керування когенераційною ВЕУ, проведено три серії комп'ютерних досліджень роботи ВЕУ на турбулентному вітрі з моделюванням малого та великого споживання електроенергії за різних рівнів ступеня зарядженості SOC свинцево-кислотних АБ. Нижче представлені результати комп'ютерного симулювання лише для робочого діапазону зарядженості АБ. Осцилограми основних координат і показників роботи ВЕУ показані на рис. 7-12. Симулювання тривало 50 секунд.

На рис. 7 наведені осцилограми швидкості турбулентного вітру з середнім значенням 8,0 м/с і відповідної кутової швидкості ВР.

3 часових залежностей струмів у ланці постійного струму з робочою напругою 220 В (рис. 8) видно, що їх сума рівна 0. Потужність споживання змінювалася кожних 11 с, причому спочатку значення струму були малі – 1 і 2 А, а потім великі – 40, 45 і 100 А. На інтервалах часу 3...5 с і 11...22 с, коли струм

споживання малий, а швидкість вітру значна, струм заряджання АБ досягає встановленого допустимого значення 19 А, і тому система керування знижує його на виході АВН, а на цьому ж рівні (рис. 8 і 9, а). Решта потужності ВР у ці моменти часу передається до ЕПМЕТ, про що свідчить осцилограма на рис. 9,г. При великій потужності (22...44 с) струм споживання постачається як від АВН, так і від АБ. В інтервалі часу 34,5...44 с струм розряджання АБ є більшим, ніж встановлене значення 10-секундного переважання – 30 А, про що сигналізує сигнал логічної «1» на рис. 9,б. Проте система продовжує генерування та постачання електроенергії аж до моменту часу 44 с, коли струм споживання зростає до 100 А і перевищує встановлене допустиме миттєве значення 60 А. У цей час система відмикає електроспоживання (рис. 9,в), струм заряджання АБ обмежується на допустимому рівні 19 А, а решта навантаження передається до ЕПМЕТ (рис. 9,г).

Ступінь зарядженості АБ за час експерименту змінюється за характером, показаним на рис. 10, який відображає інтервали малого, великого та відімкненого електроспоживання.

З рис. 11 видно, що ЕПМЕТ достатньо точно відпрацьовує задану системою керування потужність теплового навантаження.

Оптимальне навантаження ВР за тестовий період, як за

допомогою самого СГПМ чи самого ЕПМЕТ, так і за їхньої спільної роботи, відображають осцилограми на рис. 12. Як видно з останніх,  $C_p$  практично рівне своєму максимальному значенню 0,351, а  $\lambda$  коливається біля свого оптимального значення 3,675. Це свідчить про коректну роботу систем керування як на нижньому, так і на верхньому рівні в робочому діапазоні зарядженості АБ.

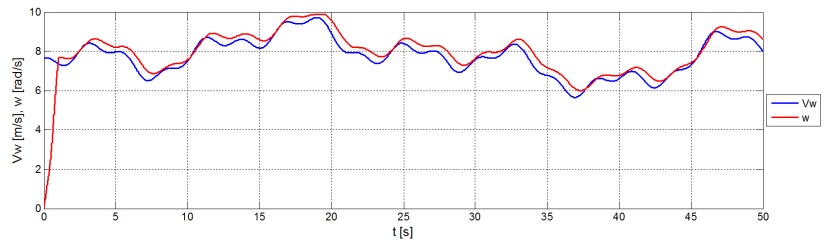


Рис. 7. Часові залежності швидкості вітру  $V_w$  і кутової швидкості  $W$

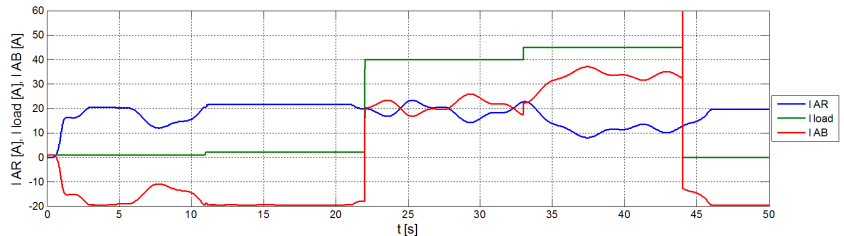


Рис. 8. Часові залежності струмів:  $I_{AR}$  – на виході АВН,  $I_{load}$  – споживання,  $I_{AB}$  – акумуляторної батареї

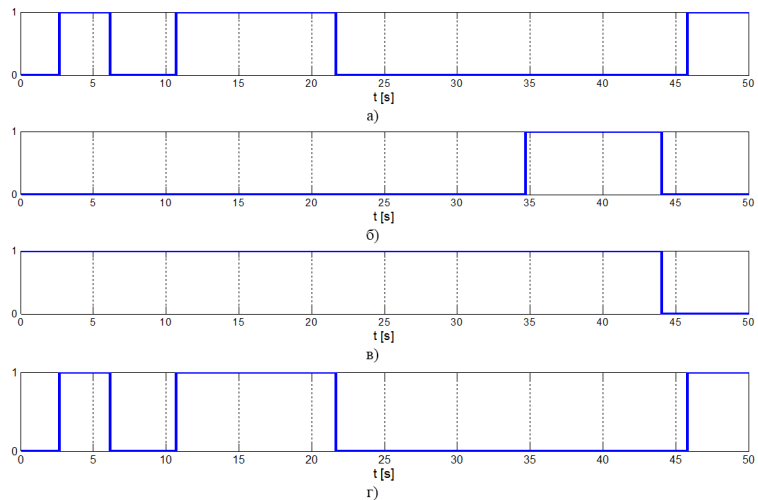


Рис. 9. Часові залежності логічних сигналів про стан системи: а) перезаряд АБ; б) перерозряд АБ; в) ввімкнення електричного споживання; г) ввімкнення теплового навантаження

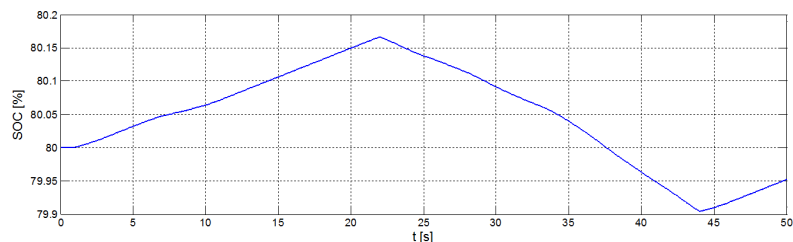


Рис. 10. Часова залежність ступеня зарядженості АБ

**Висновки.** Відповідно до функціональної схеми автономної когенераційної ВЕУ, розроблений алгоритм керування енергопотокми верхнього рівня, який керує оптимальним електричним навантаженням СГПМ через АВН або оптимальною потужністю теплового потоку ЕПМЕТ шляхом регулювання його струму збудження за допомогою ППН. Алгоритмом передбачені всі можливі стани системи як щодо потужності генерування та споживання електроенергії, так і щодо ступеня зарядженості АБ. Як показало комп'ютерне симулювання, в усіх можливих режимах роботи система керування забезпечує максимальний відбір потужності від вітру та максимальне використання цієї потужності для генерування електроенергії, як безпосередньо для споживання, так і для акумуляції в АБ. Алгоритм також передбачає функцію енергетичного менеджменту АБ: моніторинг ступеню їхньої зарядженості, запобігання як перерозрядження, так і перезарядження, а також обмеження струму зарядження та дворівневий захист від надструмів розрядження. Завдяки когенерації в усіх режимах роботи вся доступна енергія вітру корисно використовується споживачем і акумуляється у вигляді електроенергії в АБ та у вигляді теплоти в бойлері.

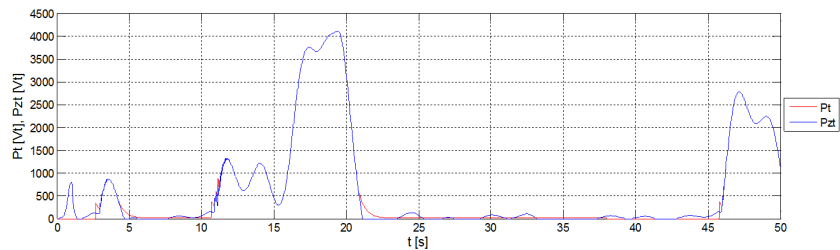


Рис. 11. Часові залежності заданої  $P_{zt}$  і забезпеченої ЕПМЕТ  $P_t$  теплової потужності

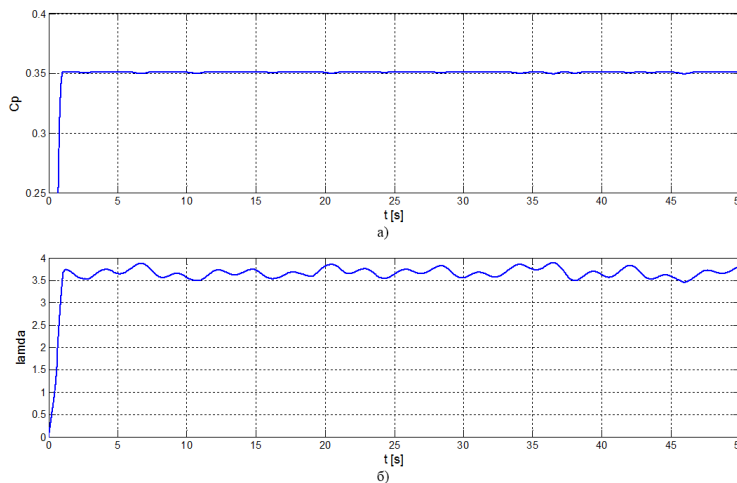


Рис. 12. Часові залежності коефіцієнта відбору ВР потужності від вітру (а) і швидкохідності ВР (б)

**Список літератури:** 1. Goude A. Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system with passive rectifiers and mutual DC-bus/ A. Goude, F. Bülow // *Renewable Energy*. – 2013. – No. 60. – P. 284-292. 2. Патент на винахід UA №105743. МПК F03D 9/02 (2006.01), H05B 6/10 (2006.01). Вітрова теплоелектростанція / І.З. Щур, О.В. Макаручук, В.І. Щур, В.І. Климко. – Заявл. 15.07.2013, Опубл. 10.06.2014. – Бюл. №11. 3. Makarchuk O. The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Shchur // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. – 2015. – R. 91, nr 1. – P. 179-182. 4. Morimoto S. Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG / S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, Y. Takeda // *IEEE Trans. on Ind. Electron.* – 2005. – Vol. 41, no. 1. – P. 60-67. 5. Helle L. Wind turbine systems / L. Helle, F. Blaabjerg // *Control in Power Electronics*. – Academic Press, 2002. – P. 483-510. 6. Щур В.І. Математична модель турбулентного вітропотoku 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, 2012 р., м. Кременчук. – Кременч. націон. ун-т ім. М.Остроградського. – С. 199-200.

**Bibliography (transliterated):** 1. Goude, A. and Bülow, F. "Aerodynamic and electrical evaluation of a VAWT farm control system with passive rectifiers and mutual DC-bus." *Renewable Energy*. No. 60. 2013. 284-292. Print. 2. Shchur, I.Z., Makarchuk, O.V., Shchur, V.I. and Klymko, V.I. *Patent UA №105743. MPK F03D 9/02 (2006.01), H05B 6/10 (2006.01)*. "Vitrova teploelectrostan-cija." *Declare*. 15.07.2013, *Publish* 10.06.2014, *Bjul.* №11. 3. Makarchuk, O., Rusek, A., Shchur, I. and Shchur, V. "The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine." *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. R. 91. Nr 1. 2015. 179-182. Print. 4. Morimoto, S., Nakayama, H., Sanada, M. and Takeda, Y. "Sensorless output maximization control for variable-speed wind generation system using IPMSG." *IEEE Trans. on Ind. Electron.* Vol. 41. No. 1. 2005. 60-67. Print. 5. Helle, L. and Blaabjerg, F. "Wind turbine systems." *Control in Power Electronics*. Academic Press. 2002. 483-510. Print. 6. Shchur, V. "Matematychna model' turbulentnoho vitropotoku dlja komp'juternoho i fizychnoho modeljuvannja roboty vitroustanovok." *Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modeljuvannja ta optymizacii*. Mater. X Mizhn. nauk-tekhn. konf. mol. uchenykh i spec. Kremen. nacion. university im. M. Ostrohradskoho. 2012. 199-200. Print.

Надійшла (received) 30.06.2015