

## ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ВІТРОУСТАНОВКАМИ РІЗНОЇ ПОТУЖНОСТІ В УМОВАХ ТУРБУЛЕНТНИХ ВІТРІВ

О Щур І.З., Щур В.І., 2012

За допомогою імітаційного комп'ютерного моделювання досліджено ефективність відбору енергії від вітру вітроустановками різної малої потужності за умови їх роботи на турбулентних вітрах з різною невисокою середньою швидкістю. Показано, що механічна стала часу вітроротора зростає зі зниженням потужності вітроустановки та швидкості вітру. Відповідно зі збільшенням цієї сталої часу знижується і енергетична ефективність роботи вітроустановок за оптимального керування їх роботою.

*Ключові слова: вітроустановка, турбулентний вітропотік, енергетична ефективність, оптимальне керування.*

Through computer simulation the efficiency of taking off of energy from wind by wind turbines of various low power if they work in turbulent winds with different low average speed was carried out. It is shown that mechanical time constant of wind rotor increases with decreasing power of wind turbine and wind speed. In accordance with the increase of time constant is reduced the energy efficiency of wind turbines in the optimal control of their work.

*Key words: wind turbine, turbulent wind, energy efficiency, optimal control.*

### Постановка проблеми

Останнім часом у світі спостерігається тенденція до зростання використання вітроенергоустановок (ВЕУ) малої потужності, зокрема з вертикальною віссю обертання (ВВО), які мають низку істотних переваг над традиційними (з горизонтальною віссю обертання) для роботи за малих швидкостей вітру [1]. Виникають нові задачі дослідження аеродинамічної, електромеханічної, електротехнічної та загалом енергетичної ефективності ВЕУ. В умовах турбулентного вітропотіку малої інтенсивності, що переважає в роботі автономних ВЕУ з ВВО, відомі способи автоматичного регулювання з метою відбору максимальної потужності від вітру є малоефективними [2,3]. Тому постає проблема підвищення енергетичної ефективності шляхом знаходження оптимальних законів керування такими ВЕУ різних потужностей.

### Аналіз останніх досягнень та публікацій

Для роботи ВЕУ в точці максимального відбору потужності вітру (ТМВП) використовуються різні способи оптимального керування як з використанням дачача швидкості вітру (анемометра), так і бездавачеві [4–6]. Зазвичай, вони зорієнтовані на ВЕУ великої потужності, що працюють з вітрами доволі високої інтенсивності з малою турбулентністю. Звичайно ці способи переносять і на малі ВЕУ. Проте останні частіше розміщують поблизу споживачів, де порівняно рідко вітри бувають інтенсивними. Переважну частину робочого часу малі ВЕУ повинні працювати з вітрами малої та середньої інтенсивності, а такі вітри найчастіше є ще й турбулентними [3, 7]. З метою отримання від вітру максимальної потужності, для таких умов доцільно розробити інші енергоефективні способи оптимального керування. Для цього необхідні додаткові дослідження об'єкту – ВЕУ різної потужності, які працюють в умовах низькопотенціальних турбулентних вітрів.

### Ціль статті

Метою роботи є дослідити імітаційним комп'ютерним моделюванням вплив потужності ВЕУ та середньої швидкості турбулентного вітру на ефективність відбору енергії від вітру при оптимальному бездавачевому керуванні роботою ВЕУ.

### Виклад основного матеріалу

Для коректного симулювання роботи ВЕУ на турбулентному вітрі було створено математичну модель турбулентного вітропотoku, максимально наближену до реального вітру, та відповідні комп'ютерні моделі з можливістю зміни середнього значення швидкості вітру та інтенсивності турбулентності [8].

Швидкість турбулентного вітру описується як сума середньої  $V_{B,cep}$  та змінної швидкості вітру  $\tilde{V}_B(t)$  (турбулентної складової):

$$V_B(t) = V_{B,cep} + \tilde{V}_B(t). \quad (1)$$

Для опису турбулентної складової швидкості вітру за результатами тривалих експериментальних досліджень розроблено низку математичних моделей [2,3]. Серед них достатньою точністю і водночас простотою відзначається підхід, використаний в моделі Каймала (Kaimal) [9], відповідно до якої спектральна щільність потужності вітру  $S_w(f)$  у всьому частотному діапазоні залежить від ступеня турбулентності вітру:

$$S_w(f) = \frac{s^2 \cdot \frac{X_L}{V_{B,cep}}}{\left(1 + 1,5 \frac{X_L}{V_{B,cep}} f\right)^{\frac{5}{3}}}, \quad (2)$$

де  $s$  – залежне від ступеня турбулентності відхилення швидкості вітру від середнього значення;  $X_L$  – довжина турбулентного масштабу [7].

Інтенсивність турбулентності математично описується таким емпіричним виразом [9]:

$$I_w = \frac{s}{V_{B,cep}} = \frac{I^*(a + 15/V_{B,cep})}{a + 1}, \quad (3)$$

де  $I^*$  – коефіцієнт, що дорівнює 0,18 для високої турбулентності та 0,16 для низької; коефіцієнт  $a$  дорівнює 2 або 3 відповідно для високої та низької турбулентності.

Для того, щоб отримати вираз для швидкості турбулентного вітропотoku у вузькій смузі частот  $\Delta f_i$ , функція спектральної щільності  $S_w(f_i)$  виражається як синус і косинус компонентів з випадково вибраною фазою  $f_i$  (від 0 до  $2\pi$ ) на центральній частоті смуги  $f_i$ :

$$\tilde{V}_{Bi}(t) = A_i \sin(2p f_i t) + B_i \cos(2p f_i t), \quad (4)$$

де  $A_i = \sqrt{\frac{1}{2} S_w(f_i) \Delta f_i \sin f_i}$ ;  $B_i = \sqrt{\frac{1}{2} S_w(f_i) \Delta f_i \cos f_i}$ .

Тоді на підставі (1) математична модель турбулентного вітропотoku матиме вигляд

$$V_B(t) = V_{B,cep} + 2 \sum_{i=1}^n [A_i \sin(2p f_i t) + B_i \cos(2p f_i t)], \quad (5)$$

де  $n$  – кількість смуг частот, для яких моделюється турбулентний вітропотік.

Для визначення параметрів математичних моделей вітропотоків розроблена комп'ютерна програма в середовищі Mathcad, яка дає змогу обчислювати коефіцієнти  $A_i$ ,  $B_i$  для різних заданих частотних смуг  $\Delta f_i$  при різних середніх швидкостях вітру. Як показали наші дослідження [8], для достатнього відображення повного спектра турбулентного вітру достатньо взяти 8–10 смуг з частотного діапазону, обмеженого згори максимальною потрібною в моделі частотою турбулентності, а знизу – максимальним потрібним для моделювання часом симулювання.

Комп'ютерні моделі для різних середніх швидкостей вітру були створені в середовищі MATLAB/Simulink з використанням отриманих результатів розрахунків. Випадкові значення  $f_i$  формуються блоками генератора випадкових чисел Uniform Random Number на дев'ятьох різних

частотах. Результат комп'ютерного моделювання турбулентного вітропотoku для середньої швидкості вітру 4 м/с протягом 400 с при високій турбулентності наведений на рис. 1.

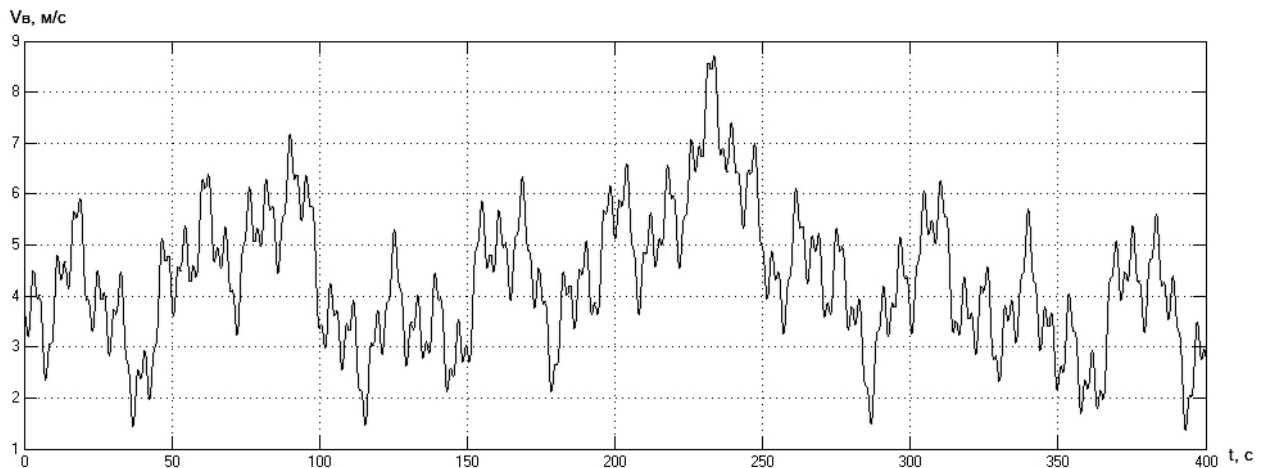


Рис. 1. Осцилограма швидкості турбулентного вітропотoku для середньої швидкості вітру 4 м/с

Таблиця 1  
Параметри дослідних ВЕУ з ВВО

$P$ , кВт	$A$ , м <sup>2</sup>	$R$ , м	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
0,5	2,32	1,08	25
1	4,65	1,52	80
2	9,3	2,16	250
5	23,26	3,41	1000
10	46,51	4,82	2500

Для дослідження було вибрано п'ять ВЕУ різної потужності, орієнтовні значення основних параметрів яких наведено в табл. 1, де  $P$  – потужність генератора;  $A$  – площа омивання вітроротора (ВР);  $R$  – радіус ВР;  $J$  – момент інерції ВР.

Як відомо [5, 6], потужність та крутний момент ВР під дією вітру зі швидкістю  $V_B$  визначаються відповідно такими рівняннями:

$$P_{BP} = 0,5 r_{\pi} A C_p(I) V_B^3, \quad (6)$$

$$M_{BP} = \frac{P_{BP}}{\omega} = \frac{0,5 r_{\pi} A C_p(I) V_B^3}{\omega},$$

де  $r_{\pi}$  – густина повітря;  $C_p(I)$  – коефіцієнт потужності ВР;  $I = \omega R/V_B$  – швидкохідність ВР;  $\omega$  – кутова швидкість ВР.

ВР досліджуваних ВЕУ з ВВО прийнято з однаковим характером  $C_p(I)$ , показаним на рис. 2. Залежності (6) для ВЕУ потужністю 2 кВт при трьох різних швидкостях вітру показані на рис. 3. Як видно з останнього, в точках максимальної потужності, у яких повинна працювати ВЕУ та для яких  $I_{opt} = 3,67$  та  $C_{pmax} = 0,351$ , лінеаризована жорсткість механічних характеристик ВР є різною. Її значення можна знайти як

$$b = \frac{dM_{BP}}{d\omega} = -\frac{0,5 r_{\pi} A C_p(I) V_B^3}{\omega^2}. \quad (7)$$

Використовуючи (7) та враховуючи, що в точці максимальної потужності  $\omega = I_{opt} V_B / R$ , можна визначити механічну сталу часу ВР так:

$$T_m = \frac{J}{|b|} = k \frac{J}{A V_B R^2}, \quad (8)$$

де коефіцієнт  $k = (0,5 r_{\pi} C_{pmax} I_{opt}^2)^{-1}$ , який не залежить від потужності ВЕУ.

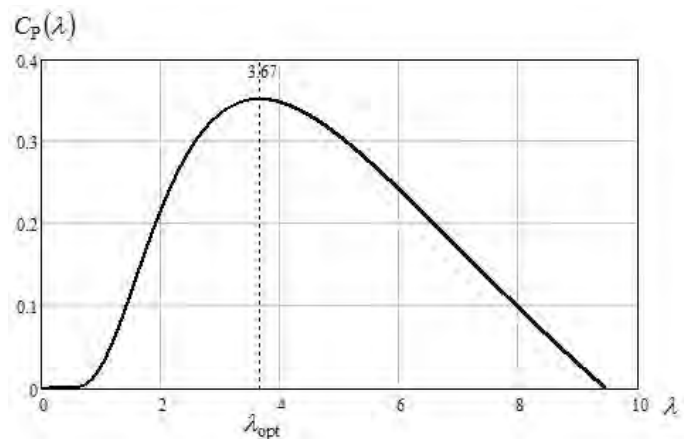


Рис. 2. Залежності  $C_p(I)$  для ВР дослідних ВЕУ

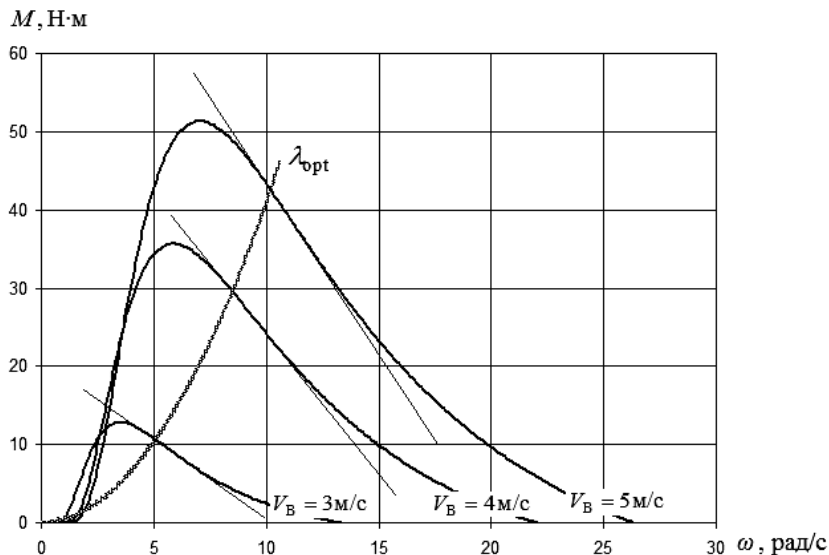


Рис. 3. Залежності (6) для ВЕУ потужністю 2 кВт при трьох різних швидкостях вітру

Обчислені за (8) залежності для дослідних ВЕУ при різних швидкостях вітру наведені на рис. 4. З останнього видно, що механічна стала часу ВЕУ значно зростає зі зменшенням потужності ВЕУ та швидкості вітру, тобто потужності, що відбирається від вітру. Такий нелінійний характер динамічних властивостей ВЕУ, безумовно, позначиться на роботі ВЕУ та її енергетичній ефективності. З метою оцінки останньої були проведені комп'ютерні дослідження.

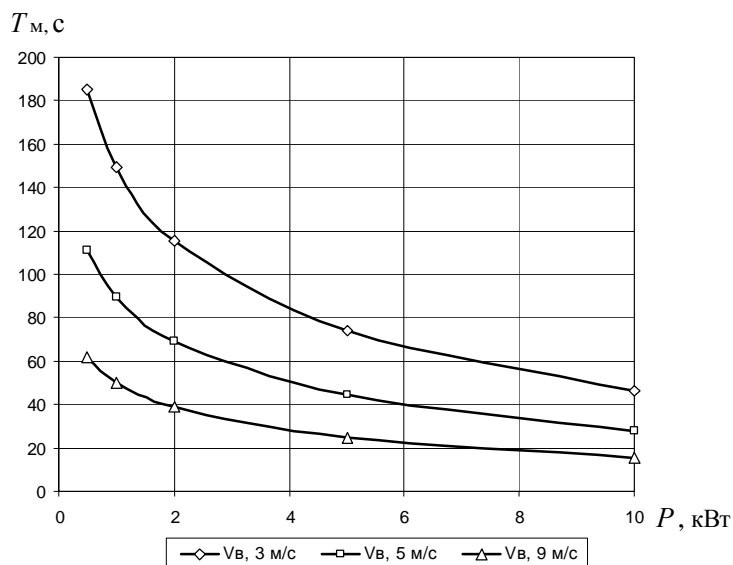


Рис. 4. Залежність механічної сталої часу ВР в точці максимальної потужності від потужності ВЕУ при різних швидкостях вітру

У середовищі MATLAB/Simulink побудована комп'ютерна модель (рис. 5), яка складається з таких підсистем: низки створених моделей симуляції турбулентного вітропотoku для вітрів різної середньої швидкості, наприклад,  $V5\_high$  [8]; підсистема ВР, побудована на основі рівнянь (6) [1]; віртуальна модель синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ), розміщеними на поверхні ротора, Permanent Magnet Synchronous Machine з бібліотеки Simulink; силового перетворювача для регулювання навантаження генератора Voltage Converter; системи керування Control Subsystem. Останньою реалізується відомий [4] спосіб бездавачевого оптимального керування навантаженням генератора, який впливає з рівняння (6) – формування моменту навантаження пропорційно до квадрата виміряної кутової швидкості ВР:

$$M = 0,5 r_{\text{п}} A C_{\text{P max}} \left( \frac{R}{I_{\text{opt}}} \right)^3 w^2. \quad (9)$$

Керування за законом (9) забезпечує прямування кутової швидкості  $\omega_{\text{Р}}$  до оптимального для конкретної швидкості вітру значення, тобто до ТМВП. Швидкодія такого регулювання залежатиме від величини механічної сталої часу  $\omega_{\text{Р}}$  (8). З метою точного підтримання оптимального значення моменту навантаження генератора, завдання на момент (9) реалізується системою векторного керування струмами генератора в координатах ротора  $dq$ , причому  $I_d = 0$ ,  $I_q = \frac{2}{3} (p)^{-1} M$ , де  $p$  – кількість пар полюсів генератора,  $\Phi$  – магнітний потік полюса. Швидкодія формування струмів якоря СГПМ в комп'ютерній моделі забезпечується виключенням ШІМ-регулювання, а їх гладким формуванням за допомогою трифазних регульованих джерел напруги (проти-ЕРС), які моделюють роботу активного випрямляча напруги (підсистема Voltage Converter).

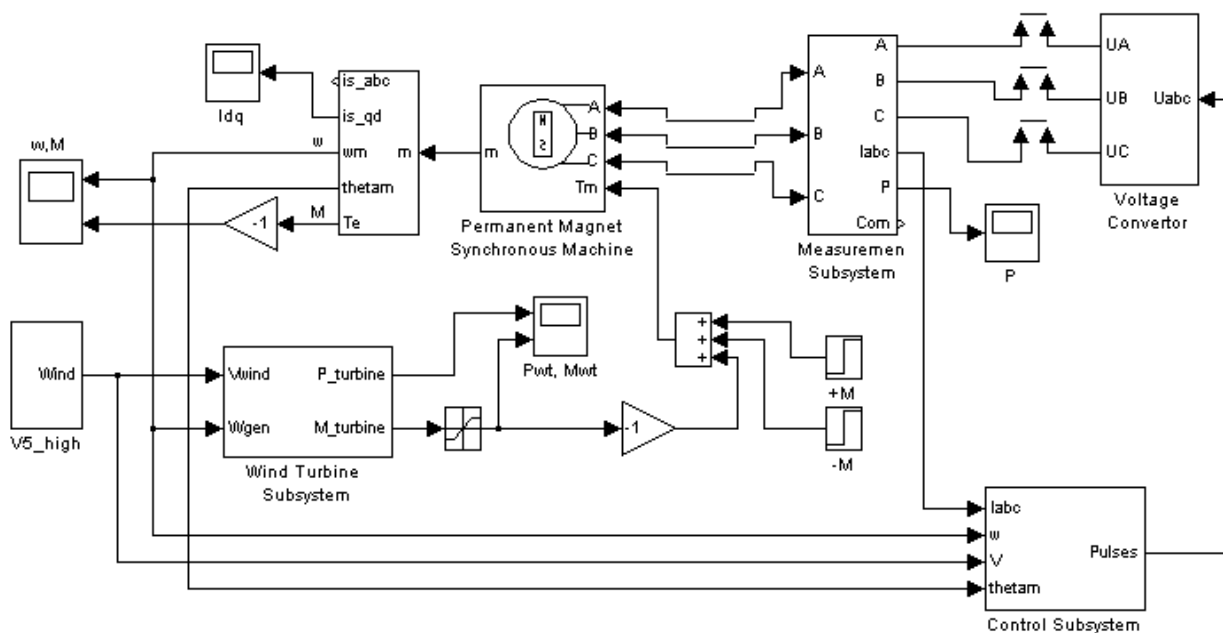


Рис. 5. Комп'ютерна модель для дослідження роботи ВЕУ в умовах турбулентних вітрів

Робота кожної з наведених в табл. 1 ВЕУ була досліджена на розробленій моделі при трьох різних турбулентних вітрах із середніми швидкостями вітру 3, 4, 5 м/с. Для оцінки зниження ефективності відбору потужності від вітру паралельно з моделлю реальної ВЕУ запускалася ідеалізована модель ВЕУ з аналогічними параметрами, момент інерції якої був дуже малий. Це давало можливість автоматично регулювати оптимальне навантаження ідеалізованої ВЕУ практично безінерційно при турбулентних вітрах, що забезпечувало її постійну роботу в ТМВП вітру. Таким чином ми паралельно отримували по два

значення відібраної  $W_{\text{BP}}$  енергії від вітру: для дослідної  $W_{\text{BP}}$  та аналогічної ідеалізованої ВЕУ  $W_{\text{BP max}}$  (табл. 2). Ефективність відбору потужності вітру ми оцінювали коефіцієнтом відбору

$$k_B = \frac{W_{\text{BP}}}{W_{\text{BP max}}}, \quad (10)$$

значення якого для досліджуваних ВЕУ, що працювали на різних

Таблиця 2

Отримані значення  $W_{\text{BP}}$  та  $W_{\text{BP max}}$  для дослідних ВЕУ

P, кВт	$W_{\text{BP}} / W_{\text{BP max}}$		
	$V_{\text{B.cep}} = 3 \text{ м/с}$	$V_{\text{B.cep}} = 4 \text{ м/с}$	$V_{\text{B.cep}} = 5 \text{ м/с}$
0,5	8,6 / 10,0	18,3 / 20,4	33,7 / 36,1
1,0	18,3 / 20,13	37,2 / 40,8	67,6 / 72,4
2,0	37,0 / 40,25	75,5 / 81,6	135,8 / 144,8
5,0	93,8 / 100,7	192,7 / 204,3	344,9 / 362,1
10,0	189,8 / 201,4	387,2 / 408,1	690,8 / 721,7

вітрах наведено на тривимірному графіку (рис. б), з якого видно, як при збільшенні потужності ВЕУ і відповідно розмірів ВР, а також середньої швидкості вітру ефективність відбору ВР потужності від вітру зростає.

На рис. 7 наведено отримані на моделі осцилограми коефіцієнта потужності  $C_p$ , а також відібраної від вітру потужності для ВЕУ 0,5 та 10 кВт при турбулентних вітрах з середніми швидкостями 3 м/с та 5 м/с.

Як видно з осцилограм потужності, ідеалізована ВЕУ (з дуже малою механічною інерційністю) швидко реагує на зміну швидкості вітру і працює на турбулентних вітрах практично постійно в ТМВП. При цьому забезпечується стабільний максимальний рівень  $C_{p\max} = 0,351$  (на осцилограмах не показано). ВЕУ більшої потужності (10 кВт) має кращу динаміку та відповідно енергетичну ефективність, ніж ВЕУ меншої потужності (0,5 кВт). Кращі показники теж мають місце для ВЕУ кожної потужності при роботі на вітрах з вищою (5 м/с) середньою швидкістю, ніж з нижчою (3 м/с).

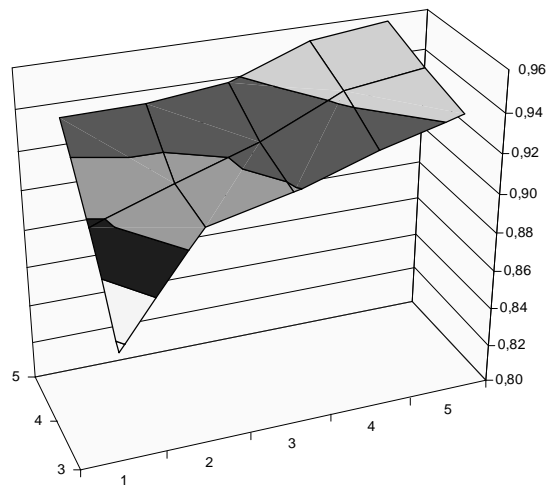


Рис. 6. Залежність коефіцієнта ефективності відбору  $k_B$  енергії вітру ВЕУ від її потужності (позначення 1–5 відповідають першій колонці табл. 2) та середньої швидкості турбулентного вітру (3, 4, 5 м/с)

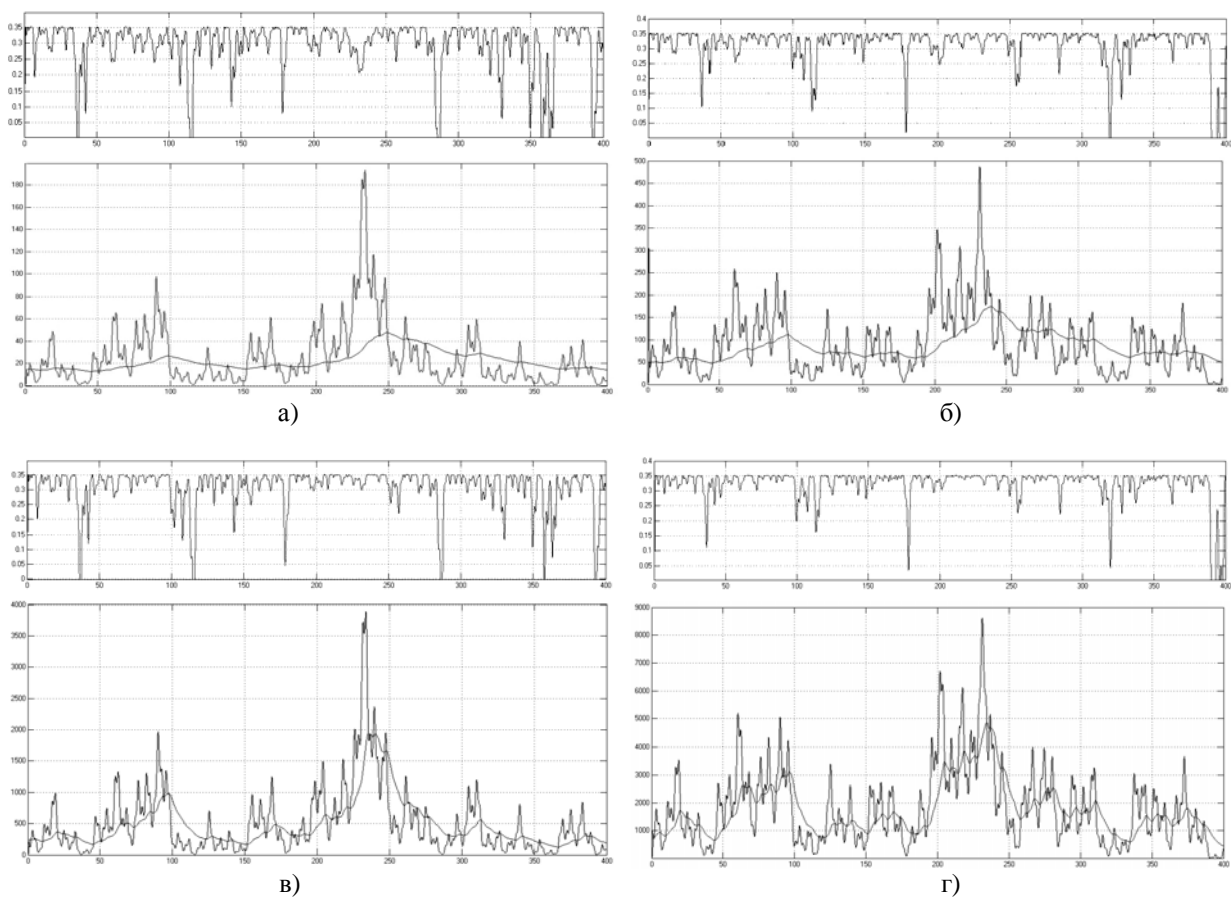


Рис. 7. Осцилограми роботи ВЕУ потужністю 0,5 кВт (а, б) та 10 кВт (в, г) протягом 400 с при середньому турбулентному вітрі 3 м/с (а, в) та 5 м/с (б, г): верхні криві –  $C_p$ ; нижні криві – потужності, отримувані від ВР для ідеалізованої (лінії зі швидкозмінними значеннями) та реальної (згладжені лінії) ВЕУ

## Висновки

1. Враховуючи переважну роботу автономних ВЕУ з ВВО в умовах низькопотенціальних турбулентних вітрів, побудовано математичні і відповідно комп'ютерні моделі таких вітрів різної середньої швидкості.
2. Проведено комп'ютерні дослідження ефективності відбору енергії від низькопотенціальних турбулентних вітрів з середніми швидкостями 3, 4, 5 м/с вітророторами ВЕУ різної потужності при оптимальному бездавачевому керуванні.
3. За результатами імітаційного комп'ютерного моделювання встановлено зниження ефективності відбору енергії від турбулентних вітрів зі зменшенням потужності ВЕУ та середньої швидкості вітру.
4. Отримані результати комп'ютерного моделювання показують доцільність удосконалення відомих способів оптимального керування ВЕУ малих потужностей під час їх роботи на низьких турбулентних вітрах.

1. Щур І.З., Турленко О.Р. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання // *Вестн. Нац. ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика* – Харьков, 2008. . – Вып. 30. – С. 418–420. 2. Changling L., Hadi B., Baike S., Boon-Teck O. Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator // *IEEE Trans. on Energy Conversion*. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – P. 341–348. 3. Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S. Development of a wind turbine simulator for wind generator testing // *Internatoinal energy journal*. – 2007, No. 8. – P. 21–28. 4. Tan K., Syed I. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors // *IEEE Trans. on energy conversion*. – 2004 – Vol. 19. – No. 2. – P. 392–399. 5. Muteanu I., Bratcu A.I., Cutululis N.A., Ceangă E. *Optimal control of wind energy systems*. – London: Springer, 2008. – 284 p. 6. Bianchi F.D., Battista H.D., Mantz R.J. *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, – London: Springer, 2007. – 206 p. 7. Nichita C., Luca D., Dayko B., Ceanga E. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators // *IEEE Trans. on Energy Conversion*. – 2002, vol. 17, No. 4. – P. 523–529. 8. Щур В.І. Система керування навантаженням генератора вітроустановки в умовах турбулентних вітрів // *Відновлювана енергетика XXI століття: Матер. XII міжнар. наук.-практ. конф.* – АР Крим, смт. Миколаївка, 12–16 вересня 2011. – С. 283–289. 9. Eisenhut C., Krug F. Wind-turbine model for system simulations near cut-in wind speed // *IEEE Trans. on Energy Conversion*. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – P. 414–420.