

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІТРОГІДРОНАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ЗНАЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

П.Ф. Васько, докт. техн. наук, **С.Т. Пазич**, канд. техн. наук, **А.О. Бриль**

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна.

Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні характеризується стрімкими темпами. Станом на вересень 2020 року встановлена потужність вітроелектричних (ВЕС) та фотоелектричних (ФЕС) станцій складає біля 6 ГВт, що відповідає майже 20% максимального навантаження електроенергетичної системи на чинний момент часу. Тому на сьогодні набуває актуальності задача акумулювання стохастичного надходження електроенергії ВЕС та ФЕС в електроенергетичну систему, зумовлена неузгодженістю графіків генерування та споживання потужності. Ідея застосування гідроакумулювальних електростанцій (ГАЕС) для накопичення стохастичного надходження енергії ВЕС і ФЕС починає знаходити своє практичне втілення. В Іспанії вже декілька років функціонує вітродизельна електростанція для подачі води в басейн-акумулятор ГАЕС потужністю 11 МВт. Досвід експлуатації цього комплексу засвідчив суттєве зменшення його енергетичної ефективності, зумовлене стохастичним характером надходження енергії вітру. Тому на часі вирішення задачі визначення енергетичної ефективності процесу перетворення кінетичної енергії вітру в потенційну енергію води, накопиченої в басейні-акумуляторі, з урахуванням наявності пульсацій швидкості вітру. В даній роботі виконана оцінка енергетичної ефективності потужної гідронасосної станції при електроживленні двигунів насосів від вітроелектричної установки з урахуванням пульсацій швидкості вітру та кількості гідроелектричних агрегатів у складі станції. Визначення кількісних значень оцінюваних параметрів базувалось на результатах математичного моделювання динаміки навантажувальних режимів роботи вітрогідронасосної станції з урахуванням стохастичної зміни швидкості вітру. Математична модель являє собою систему нелінійних диференціальних рівнянь, що описує взаємодію двох інерційних складових єдиної аероелектрогідродинамічної системи. Визначено раціональне співвідношення кількості гідронасосів в складі насосної станції для досягнення максимальних значень коефіцієнта використання встановленої потужності вітрогідронасосної станції. Бібл. 29, рис. 6.

Ключові слова: вітротурбіна, гідронасос, динаміка, інерційність, подача, синхронний генератор, стохастичність.

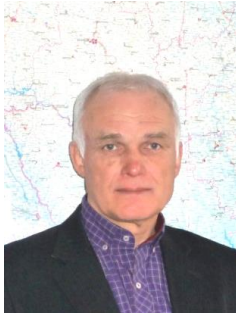
ENERGY EFFICIENCY OF WIND-HYDRO PUMPING STATION SIGNIFICANT POWER

P. Vasko, doctor of technical science, **S. Pazych**, candidate of technical science, **A. Bryl**

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.

The development of renewable energy sources in Ukraine is characterized by rapid pace. As of September 2020, the installed capacity of wind station (WPP) and photovoltaic (FPP) stations is about 6 GW, which corresponds to almost 20% of the maximum load of the power system at the current time. Therefore, today the problem of accumulation of stochastic electricity supply of wind farms and power plants in the power system, due to the inconsistency of schedules of generation and consumption of power, is becoming relevant. The idea of using pumped storage hydro station (PSH) to store stochastic energy input of wind farms and power plants is beginning to find its practical implementation. In Spain, a wind-diesel power station has been operating for several years to supply water to the 11 MW PSH battery pool. The experience of operation of this complex has shown a significant reduction in its energy efficiency due to the stochastic nature of wind energy. Therefore, it is time to solve the problem of determining the energy efficiency of the process of converting the kinetic energy of wind into potential energy of water accumulated in the accumulator pool, taking into account the presence of wind speed pulsations. In this work, the energy efficiency of a powerful hydraulic pumping station when powering pump motors from a wind power plant is evaluated, taking into account the pulsations of wind speed and the number of hydroelectric units in the station. The determination of quantitative values of the estimated parameters was based on the results of mathematical modeling of the dynamics of loading modes of operation of the wind pumping station taking into account the stochastic change of wind speed. The mathematical model is a system of nonlinear differential equations that describes the interaction of two inertial components of a single aero-electro-hydro-dynamic system. The rational ratio of the number of hydraulic pumps in the pumping station to achieve the maximum values of the utilization factor of the installed capacity of the wind pumping station is determined. Ref. 29, fig. 6.

Keywords: wind turbine, hydraulic pump, dynamics, inertia, flow, synchronous generator, stochasticity.



П.Ф. Васько
P. Vasko

Відомості про автора: доктор технічних наук за спеціальністю «Перетворення відновлюваних видів енергії», завідувач відділом гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАНУ.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Спеціальність «Електричні машини і апарати».

Наукова сфера: альтернативна енергетика, енергозбереження, перетворення відновлюваних видів енергії, мала гідроенергетика.

Публікації: 254.

ORCID: 0000-0001-8807-7173

Контакти: тел./факс: +38(044)206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Author information: doctor of technical sciences majoring in «Renewable Energy Transformation», Head of Hydropower Department of the Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Specialty «Electric machines and devices».

Research area: alternative energy, energy saving, conversion of renewable energy types and installations based on them, small hydropower

Publications: 254.

ORCID: 0000-0001-8807-7173

Contacts: phone/fax: +38(044)206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua



С.Т. Пазуч
S. Pazuch

Відомості про автора: кандидат технічних наук за спеціальністю «Перетворення відновлюваних видів енергії», молодший науковий співробітник відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАНУ.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність «Нетрадиційні джерела енергії».

Наукова сфера: відновлювана енергетика.

Публікації: 22.

ORCID: 0000-0002-6310-9842

Контакти: тел./факс: +38(044)206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Author information: candidate of technical sciences in the field of «Renewable Energy Transformation», junior researcher of Hydropower Engineering Department, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Specialty «Non-traditional sources of energy».

Research area: renewable energy.

Publications: 22.

ORCID: 0000-0002-6310-9842

Contacts: phone/fax: +38(044)206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua



А.О. Бріль
A. Bryl

Відомості про автора: науковий співробітник відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук України.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Спеціальність «Електричні мережі і системи».

Наукова сфера: перетворення поновлюваних видів енергії та установки на їх основі, мала гідроенергетика.

Публікації: 48.

ORCID: 0000-0002-5134-0393

Контакти: тел./факс: +38(044)206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Author information: researcher at the Hydropower Department of the Institute for Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Specialty «Electrical networks and systems».

Research area: conversion of renewable energy types and installations based on them, small hydropower.

Publications: 48.

ORCID: 0000-0002-5134-0393

Contacts: phone/fax: +38(044)206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Перелік використаних позначень та скорочень:

ВНС – вітрогідронасосна станція;	ω – кутова швидкість обертання;
ВЕС – вітроелектрична станція;	v – швидкість вітру;
ВЕУ – вітроелектрична установка;	$y(v)$ – диференціальна щільність імовірнісного розподілу швидкостей вітру протягом часу T ;
J – момент інерції;	$\varphi_{\text{л}}$ – кут повороту лопатей вітротурбіни;
T – вітротурбіна;	C_{m} – відносний аеродинамічний момент вітротурбіни;
G – генератор;	Z – швидкохідність вітротурбіни;
L – лінія електропередачі;	E – кінетична енергія вітрового потоку;
D – електродвигун;	W – потенційна енергія об'єму води;
P – гідронасос;	Q – подача води;
НС – насосна станція;	(n) – кількість електронасосів в складі НС;
M – момент обертаний;	k_w – коефіцієнт використання встановленої потужності.

Вступ. Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні характеризується стрімкими темпами. Станом на вересень 2020 року встановлена потужність вітроелектричних (ВЕС) та фотоелектричних (ФЕС) станцій складає біля 6 ГВт [1], що відповідає майже 20% максимального навантаження електроенергетичної системи на чинний момент часу. Тому на сьогодні набуває актуальності задача акумулювання стохастичного надходження електроенергії ВЕС та ФЕС в електроенергетичну систему, зумовлена неузгодженістю графіків генерування та споживання потужності. В Австралії створюється пілотний проект електрохімічного акумулятора енергії потужністю 100 МВт [2]. Міжнародне енергетичне агентство (ІЕА, 2014) в своїй Дорожній карті з акумулювання енергії [3] надає перевагу використанню гідроакумулювальних електростанцій (ГАЕС), за наявності відповідних гідрологічних та топографічних умов місцевості для випадків акумулювання електроенергії в значних промислових обсягах з урахуванням вартості та ризиків технології. Ідея застосування ГАЕС для накопичення стохастичного надходження енергії ВЕС і ФЕС вже знаходить своє практичне втілення. В стадії реалізації знаходиться проект будівництва ГАЕС потужністю 300 МВт для ФЕС потужністю 600 МВт на території Чилі [4]. В Німеччині будується ГАЕС ємністю біля 60 МВт-год для ВЕС потужністю 13,4 МВт [5]. В Іспанії [6] вже декілька років знаходиться в експлуатації вітродизельна електростанція для подачі води в басейн-акумулятор ГАЕС потужністю 11 МВт. Досвід експлуатації цього комплексу засвідчив суттєве зменшення його енергетичної ефективності, зумовлене стохастичним характером надходження енергії вітру [7,8]. Експериментальне підтвердження наявності значних коливань параметрів генерованої електроенергії ВЕУ в натурних умовах експлуатації наведено також в [9,10]. Тому на часі вирішення задачі визначення енергетичної ефективності процесу перетворення кінетичної енергії вітру в потенційну енергію води, накопиченої в басейні-акумуляторі, з урахуванням наявності пульсацій швидкості вітру та структурної схеми гідронасосної станції.

Мета роботи полягає у проведенні експертної оцінки енергетичної ефективності потужної гідронасосної станції (НС) при електроживленні двигунів насосів від

вітроелектричної установки (ВЕУ) з урахуванням пульсацій швидкості вітру та кількості гідроелектричних агрегатів у складі станції. Отримання кількісних значень оцінюваних параметрів базуватиметься на результатах математичного моделювання динаміки навантажувальних режимів роботи багатоагрегатної гідронасосної станції з електроприводом від асинхронних двигунів за живлення від вітроелектричної установки з синхронним генератором.

Вихідні положення та припущення:

- номінальні потужності НС та ВЕУ однакові;
- ВЕУ оснащена ідеальним регулятором кута повороту лопатей (ϕ_l) в функції швидкості вітру (v), що реалізує залежність $\phi_l(v)$;
- ВЕУ оснащена електричним синхронним явнополюсним генератором, що притаманно переважній більшості потужних ВЕУ, призначеним для автономних систем електроживлення споживачів;
- узагальнені аеродинамічні характеристики вітрової турбіни (T) потужної ВЕУ в функції її швидкохідності (Z) та кута повороту лопатей наведені на рис.1 [11,12];
- насосна станція містить в своєму складі декілька (n) однакових електронасосних агрегатів з приводом від асинхронних двигунів, а подача станції $Q_{НС}$ пропорційна кількості ввімкнених агрегатів: $Q_{НС} = n Q_P$, де Q_P - подача води одного насоса;
- енергетична ефективність вітрогідронасосної станції визначається для заданого проміжку часу з відомим імовірнісним розподілом швидкостей вітру, осереднених на 10-и хвилинних інтервалах (v_j) [13];
- зміна напряму подачі насоса, зумовлена зміною швидкості вітру $v(t)$, не допускається, тобто: $Q_P(v) \geq 0$, $Q_P(t) \geq 0$;
- подача насоса за сталого тиску води та змінної швидкості вітру $v(t)$ залежить лише від його кутової швидкості обертання (ω_P). Тому визначення залежності $Q_P(t)$ потребує розрахунку $\omega_P(t)$;
- частота обертання ВЕУ та подача насоса в процесі роботи не перевищують 1,1 номінального значення;
- узагальнена характеристика $Q_{НС}(\omega_P)$ багатоагрегатної НС [14,15] для подачі води в басейн-акумулятор ГАЕС наведена на рис. 1 (для випадку $n=5$).

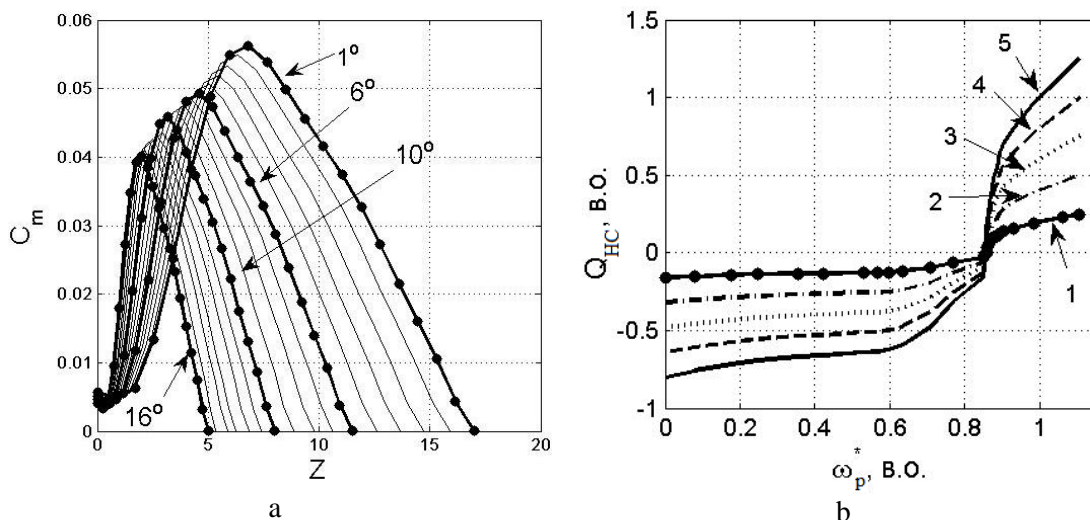


Рис. 1. Узагальнені аеродинамічні характеристики вітрової турбіни (а) та характеристики подачі багатоагрегатної насосної станції в складі 5-и гідроагрегатів (б).

Fig. 1. Generalized aerodynamic characteristics of the wind turbine (a) and the feed characteristics of the multi-unit pumping station as part of the 5 hydraulic units (b).

Теоретичні положення. Вітрогідронасосна станція (ВНС) призначена для перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в потенційну енергію води, накопиченої в басейні-акумуляторі. Вона являє собою динамічну двомасову аероелектрогідродинамічну систему, структурна схема якої, побудована згідно прийнятим вихідним положенням та припущенням, представлена на рис.2. Подача води (Q) насосом (P) в резервуар, розташований на певній висоті, здійснюється в результаті його обертання асинхронним двигуном (D), який отримує живлення від ВЕУ по лінії електропередачі (L). Система функціонує під дією вітрового потоку, кінетична енергія якого перетворюється вітровою

турбіною (T) в механічну енергію обертального руху з подальшим її перетворенням в електричну енергію за допомогою синхронного генератора. Таким чином, одна із інерційних складових містить в собі вітрогенератор, а інша – асинхронні електродвигуни та гідронасоси. Взаємний вплив однієї інерційної складової на іншу здійснюється через електричний зв'язок між ВЕУ та НС. Структурна схема системи може містити також мультиплікатор в складі ВЕУ та редуктор в складі гідронасосного агрегата. Їх наявність не вносить нових принципових змін в роботу системи і може бути врахована при моделюванні застосуванням загальноживаних властивостей [16].

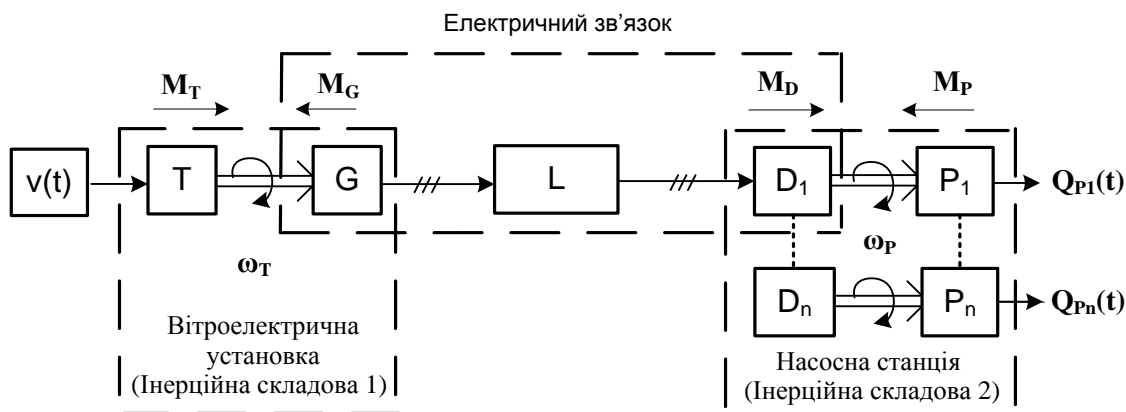


Рис. 2. Структурна схема вітрогідронасосної станції.

Fig. 2. Structural diagram of wind-hydro pumping station.

Значення кінетичної енергії вітрового потоку на певному інтервалі часу T визначається стохастичним характером зміни швидкості вітру [17] і для даної задачі може бути представлено з використанням положень теорії ймовірностей наступним чином:

$$E_{v_{1,2}} = T \int_{v_1}^{v_2} P(v) y(v) dv, \quad (1)$$

$$T_{v_{1,2}} = \int_{v_1}^{v_2} y(v) dv,$$

де: v - швидкість вітру на висоті осі обертання вітрогенератора ВЕУ, м/с; $E_{v_{1,2}}$ - кінетична енергія вітрового потоку, що проходить через вітрогенератор протягом часу T в діапазоні зміни швидкості вітру від v_1 до v_2 ; $T_{v_{1,2}}$ - тривалість дії швидкості вітру в діапазоні від v_1 до v_2 протягом часу T , с; $P(v)$ - потужність вітрового потоку за різних значень швидкості вітру; $y(v)$ - диференціальна щільність імовірнісного розподілу швидкостей вітру протягом часу T .

В задачах вітроенергетики неперервні залежності (1) для проміжку часу T визначаються за результатами спостережень послідовності значень швидкості вітру (v_j), осереднених на 10-и хвилинному інтервалі часу, тому можуть бути замінені на дискретні за градаціями [18, 13], а стохастична зміна швидкості вітру на інтервалі осереднення окремої градації може бути представлена випадковою функцією [19]:

$$E_{m,s} = T \sum_{j=m}^s P(v_j) Y_j, \quad T_{m,s} = T \sum_{j=m}^s Y_j, \quad (2)$$

$$v_j(t) = v_j + v'_j(t) = 600^{-1} \int_0^{600} v_j(t) dt + v'_j(t), \quad (3)$$

де: P_j - потужність вітрового потоку за осередненого значення швидкості вітру j -ої градації v_j , Вт; Y_j - відносна частота повторювання градації вітру v_j за проміжок часу T ; m, s - порядкові номери градацій швидкості вітру v_j на проміжку часу T ; $v_j(t)$ - зміна в часі швидкості вітру j -ої градації v_j на 10-и хвилинному інтервалі, м/с; $v'_j(t)$ - випадкова функція пульсацій швидкості вітру відносно осередненого значення v_j .

Значення потенційної енергії обсягу води, поданої ВНС і накопиченої в басейні-акумуляторі (W), розташованому на певній висоті, пропорційне подачі Q_{HC} і також може бути визначено за градаціями швидкості вітру аналогічно (2), (3):

$$W_{m,s} = \xi \sum_{j=m}^s (Q_{jHC} \cdot Y_j), \quad (4)$$

$$Q_{jHC} = 600^{-1} \int_0^{600} Q_{HC}(v_j(t)) dt, \quad (5)$$

$$Q_{HC}(v_j(t)) = f(\omega_p(v_j(t))) \geq 0,$$

де: ξ - коефіцієнт пропорційності.

Отримання кількісних значень Q_{jHC} та $W_{m,s}$ потребує визначення $\omega_p(v_j(t))$ для кожної градації, що може бути досягнуто в результаті математичного моделювання динаміки навантажувальних режимів роботи ВНС з урахуванням стохастичної складової зміни швидкості вітру. Система нелінійних диференціальних рівнянь, що описує динаміку ВНС, як двомасової аероелектрогідродинамічної системи, записується для окремої градації швидкості вітру наступним чином [20]:

$$(J_T + J_G) \frac{d\omega_T}{dt} = M_T(v_j(t), \omega_T, \varphi_L(v_j(t))) - M_{TT}(\omega_T) - M_{GT}(\omega_T) - M_G(\omega_T, \omega_p, n_i), \quad (6)$$

$$(J_D + J_P) \frac{d\omega_p}{dt} = M_D(U, \omega_T, \omega_p) - M_{DT}(\omega_p) - M_{PT}(\omega_p) - M_P(\omega_p), \quad (7)$$

$$M_T(v_j(t), \omega_T, \varphi_L(v_j(t))) = 0.5 \pi R^3 \rho (v_j(t))^2 C_m(Z, \varphi_L),$$

$$Z = \omega_T R / v_j(t),$$

де: J_T, J_G - моменти інерції вітрогенератора з трансмісією та генератора відповідно, $kg \cdot m^2$; ω_T - кутова швидкість обертання вітрогенератора, рад/с; M_T - аеромеханічний момент вітрогенератора, Нм; φ_L - кут повороту лопатей вітрогенератора, град; M_{TT} - момент механічних втрат в елементах трансмісії та на електроживлення пристрою повороту лопатей, Нм; M_{GT} - момент втрат на тертя, вентиляцію, перемагнічування сталі, збудження генератора, Нм; M_G - момент електромагнітний генератора, Нм; ω_p - кутова швидкість обертання двигуна та насоса, рад/с; n_i - кількість одночасно підключених насосів до генератора ($n_i = 1, 2, \dots, n$); J_D, J_P - момент інерції двигуна та насоса відповідно; M_D - момент електромагнітний двигуна, $kg \cdot m^2$; U - напруга на клеммах двигуна, В; M_{DT} - момент механічних втрат двигуна (тертя та вентиляція), Нм; M_{PT} - момент втрат гідронасоса, Нм; M_P - момент гідродинамічний насоса, Нм; R - радіус ротора вітрогенератора, м; ρ - густина повітря, kg/m^3 ; Z -

швидкохідність вітротурбіни; C_m – відносний аеродинамічний момент вітротурбіни.

Методичні положення визначення відповідних характеристик обладнання, наведених у (6), (7) в функції кутової швидкості обертання, висвітлені в [20, 21].

Оцінку енергетичної ефективності ВНС на інтервалі часу T будемо здійснювати по аналогії з [22, 23] та з урахуванням (4), наступним чином:

$$k_w = W_{m,s} / T \xi Q_{HC}^{nom}, \quad (8)$$

де: k_w - коефіцієнт використання встановленої потужності ВНС, Q_{HC}^{nom} - номінальна подача гідронасосної станції, m^3/c .

Розрахункові дослідження та аналіз результатів. Кількісну оцінку значення k_w виконаємо на прикладі південно-східних територій нашої країни, де зосереджено найбільші вітроенергетичні ресурси [24] і побудовано сучасні ВЕС на основі ВЕУ потужністю 1-3 МВт з висотою центра обертання вітротурбін на рівні 100-120 метрів над землею поверхнею. Середньорічне значення швидкості вітру на цій висоті приймалось рівним 7 м/с [25], а ймовірнісний розподіл швидкостей вітру на протязі року відповідав двопараметричному розподілу Вейбула з коефіцієнтом масштабу $\gamma=7,98$ і коефіцієнтом форми $\beta=1,25$:

$$y(v) = \begin{cases} \frac{\beta}{\gamma} \cdot \left(\frac{v}{\gamma}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{v}{\gamma}\right)^{\beta}}, & v \geq 0, \\ 0, & v < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

Для математичного опису миттєвих значень пульсацій кожної із градацій $v_j(t)$ використовувалась стохастична модель, розроблена під керівництвом проф. Г.І. Денисенка, яка описує пульсації швидкості вітру в фіксованій точці простору випадковою функцією часу. В ній амплітуда поривів швидкості вітру моделюється випадковою

величиною, розподіленою за нормальним законом, а тривалість поривів – за ймовірнісним розподілом по закону Пуассона. Алгоритми практичної реалізації даної моделі розроблені і наведені в [26].

Так як визначення миттєвого значення швидкості вітру на інтервалі осереднення здійснюється з використанням випадкових функцій, то отримання коректного результату потребує виконання не менше 100 їх реалізацій для кожного значення градації [27], а відповідно і стільки ж реалізацій рішень системи нелінійних диференційних рівнянь (6), (7) для всіх можливих варіантів кількості гідроелектричних агрегатів у складі насосної станції. На етапі отримання експертної оцінки енергетичної ефективності ВНС виконання такої кількості розрахункових досліджень є надто обтяжливим. Тому в межах даної роботи була зроблена проба виявлення ергодичних властивостей даного випадкового процесу з метою проведення розрахункових досліджень системи рівнянь (6), (7) для кожної із градацій швидкості лише по одній реалізації випадкової функції. Для цього було виконано по 100 реалізацій $v_j(t)$ для градацій 10 м/с та 20 м/с. Статистична оцінка результатів розрахунків засвідчила, що в діапазоні зміни робочих швидкостей вітру максимальна ймовірність відхилення від осередненого значення швидкості вітру становить менше 5 %; а 95 % ймовірність відхилень складає менше 3 %. Визначено, що інтервал кореляції складає біля (7-8) с, а значення кореляційної функції $k(\tau)$ [27] при $\tau \rightarrow 600$ коливається біля осі ординат з невеликою амплітудою, що є ознакою ергодичності стаціонарної випадкової функції (рис. 3). Наявність ергодичної властивості надала можливість визначення статистично стійких енергетичних показників функціонування ВНС з урахуванням динаміки вітрового потоку в результаті застосування лише однієї реалізації випадкової функції $v_j(t)$ по [26] для заданого осередненого значення градації швидкості вітру.

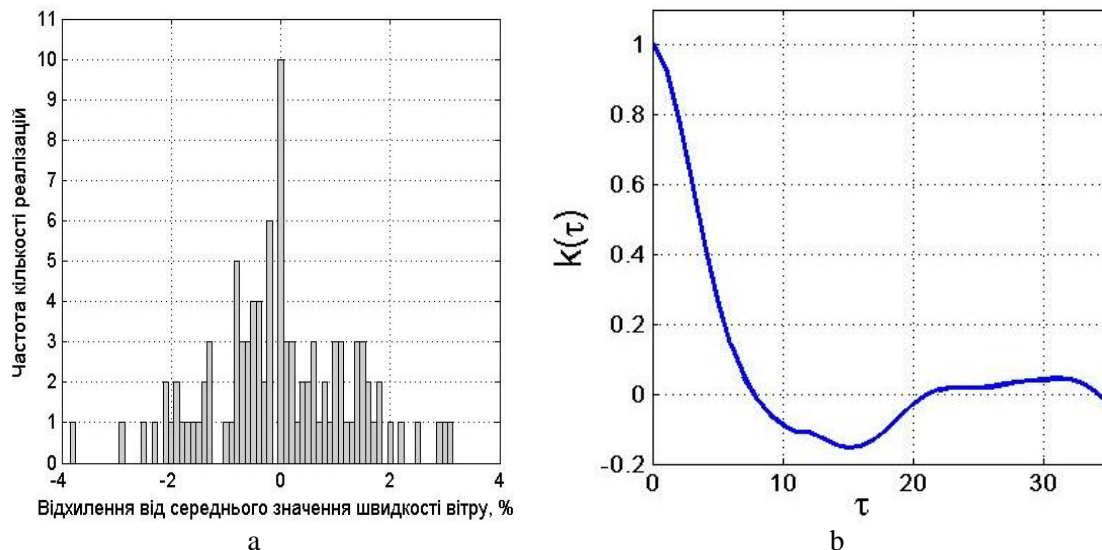


Рис. 3. Статистична оцінка результатів моделювання $v_j(t)$ для градації 10 м/с (а). Оцінка кореляційної функції $v_j(t)$ (b).

Fig. 3. Statistical evaluation of simulation results $v_j(t)$ for gradation 10 m/s (a). estimation of the correlation function $v_j(t)$ (b).

Для розрахунку кількісних результатів моделювання динаміки подачі води застосовувалось представлення параметрів в долях від їх базових значень, що спрощує аналіз, так як всі змінні представляються зручними числами в частках одиниці, і надає можливості для порівняння різних за потужністю ВНС. Тому значення параметрів генератора, лінії електропередачі, двигунів та насосів у відносних одиницях відповідали наведеним в [20]. Розглядалися варіанти побудови гідронасосної

станції в складі від 1 до 8 електронасосних агрегатів з метою регулювання навантаження ВЕУ, як за умов глобальної зміни швидкості вітру на проміжку часу T (1), так і в результаті наявності поривів (3). Вплив поривів швидкості вітру на зменшення ефективності функціонування ВНС демонструють результати моделювання динаміки навантажувального режиму роботи на рис. 5, які засвідчують можливість зриву подачі води насосами.

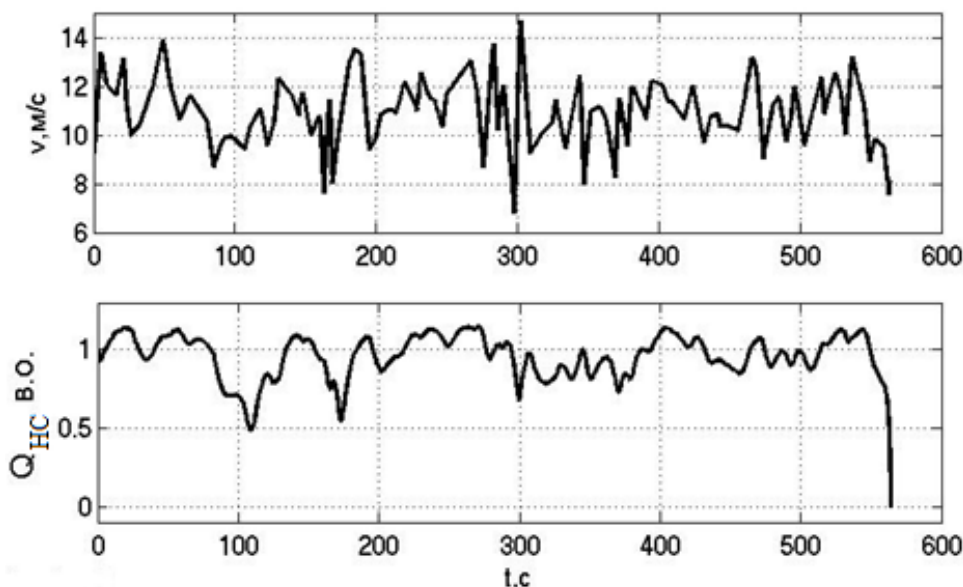


Рис. 4. Динаміка навантажувального режиму роботи ВНС за наявності пульсацій швидкості вітру.

Fig. 4. Dynamics of the load mode of wind-hydro pumping station operation in the presence of wind speed pulsations.

Отримані річні розподіли обсягів вітрового потоку і швидкостей вітру наведені на рис. 5. Накопиченої енергії ВНС з різною кількістю агрегатів в складі насосної станції, енергії

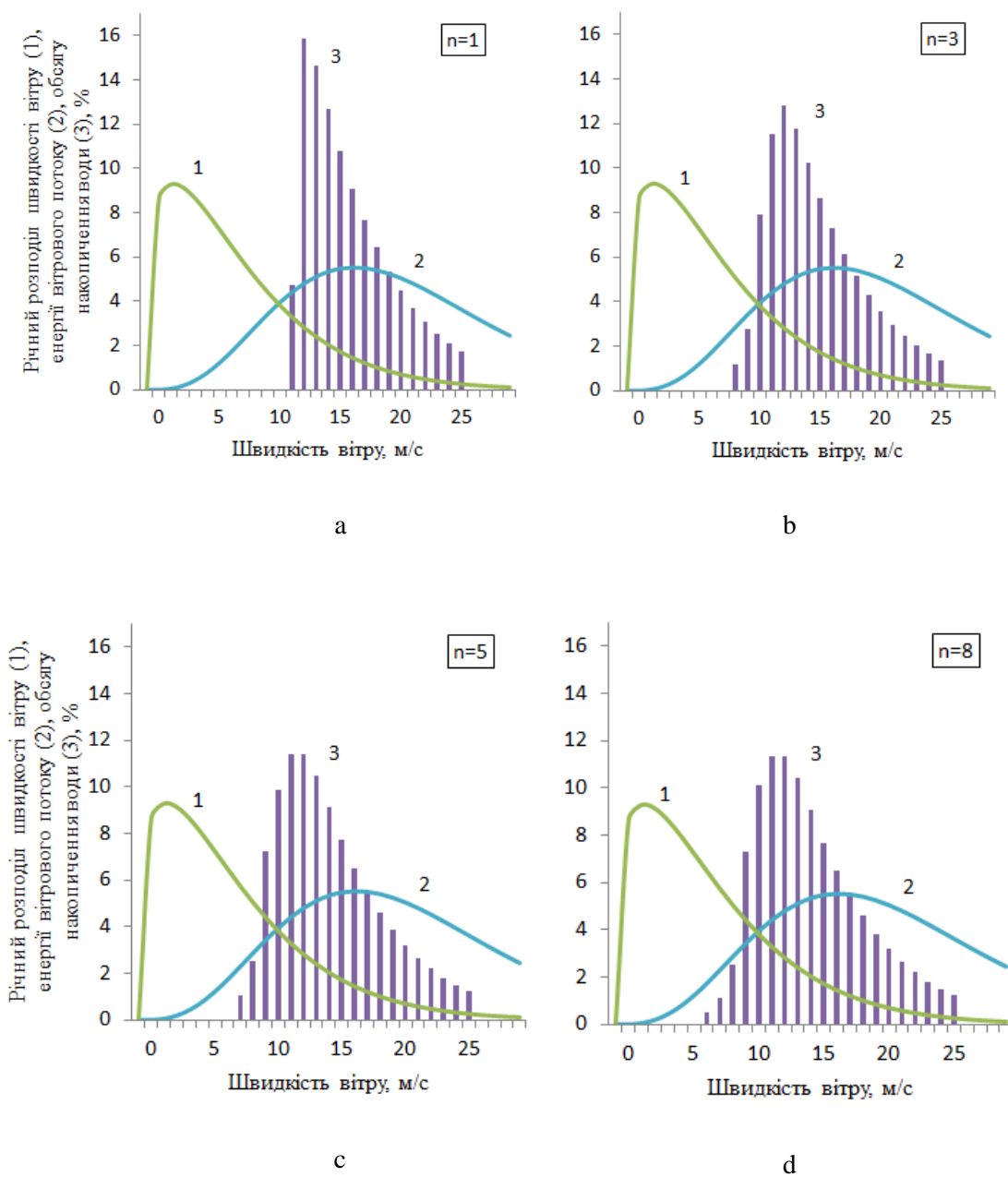


Рис. 5. Розподіли подачі ВНС за різної кількості гідроагрегатів в складі НС.

Fig. 5. Distributions of wind-hydro pumping station supply for different number of hydraulic units in the pumping station.

Результати розрахункових досліджень кількості гідроагрегатів в складі насосної станції енергетичної ефективності ВНС за різної наведено на рис. 6.

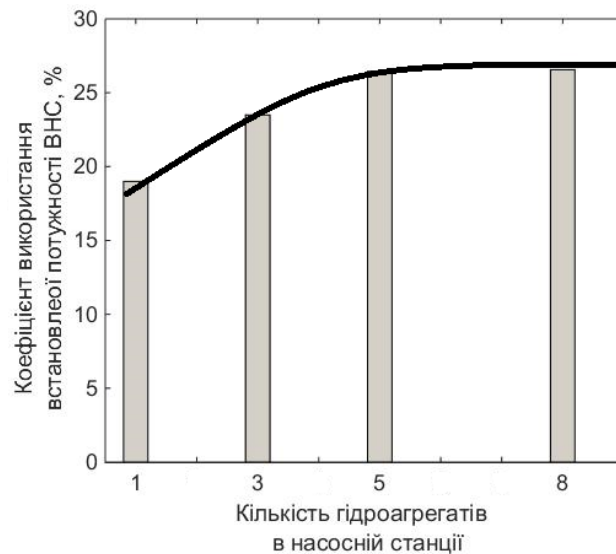


Рис. 6. Коефіцієнт енергетичної ефективності ВНС.

Fig. 6. Energy efficiency ratio of wind-hydro pumping station.

Найбільша енергетична ефективність ВНС для територій, що характеризуються середньорічним значенням швидкості вітру 7 м/с на осі обертання вітротурбін, досягається за наявності в складі насосної станції 5-и та більше насосних агрегатів. За даних умов досягне значення коефіцієнта використання встановленої потужності ВНС знаходиться на рівні 27 %. Енергетична ефективність багатоагрегатної насосної станції, в порівнянні з одноагрегатною, підвищується більш ніж на 40 % завдяки можливості функціонування на швидкостях вітру менше номінального значення в результаті регулювання кількості ввімкнених електронасосів.

Доцільно зазначити, що коефіцієнт використання встановленої потужності тієї ж самої ВЕС за паралельної роботи з енергосистемою становить біля 38 %. Наявність суттєвого зменшення енергетичної ефективності ВЕС в залежності від характеру навантаження необхідно враховувати при проведенні техніко-економічних обґрунтувань проектів з акумулювання енергії ВЕС та ВЕС в басейнах-накопичувачах води на ГАЕС [28, 29].

Висновок. Значення коефіцієнта використання встановленої потужності вітрогідронасосних станцій на основі сучасних ВЕС з висотою центра обертання вітротурбін 100-120 метрів над землею поверхнею для південних територій нашої країни, які характеризуються

найбільшим вітро-енергетичним потенціалом, знаходиться на рівні 27 % за умови реалізації насосної станції в складі не менше 5-и електронасосних агрегатів.

1. Встановлена потужність енергосистеми України. [Електронний ресурс]. URL: <https://ua.energy/vstanovlena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/>. (дата звернення: 23.11.2020).
2. Hornsdale Power Reserve. [Електронний ресурс]. URL: <https://hornsdailepowerreserve.com.au/>. (дата звернення: 23.11.2020).
3. Energy Storage Technology Roadmap. Technology Annex. International Energy Agency (IEA). 2014. [Електронний ресурс]. URL: https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/AnnexA_TechnologyAnnexforweb.pdf. (дата звернення: 23.11.2020).
4. Espejo de Tarapaca. [Електронний ресурс]. URL: <http://valhalla.cl/espejo-de-tarapaca/>. (дата звернення: 23.11.2020).
5. Max Bogl Wind AG. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.mbrenewables.com/en/pilot-project/>. (дата звернення 23.11.2020).
6. Merino J., Veganzones C., Sanchez J.A., Martinez S., Platero C.A. Power System Stability of a Small Sized Isolated Network Supplied by a Combined Wind-Pumped Storage Generation System: A Case Study in the Canary Islands. *Energies*. 2012. № 7. Pp. 2351-2369. <https://doi.org/10.3390/en5072351>.
7. Grażyna Frydrychowicz-Jastrzębska. El Hierro Renewable Energy Hybrid System: A Tough Compromise. *Energies*. 2018. № 11(10). 2812 p. <https://doi.org/10.3390/en1102812>.
8. Latorre F., Quintana J.J., Nuez I. Technical and economic evaluation of the integration of a wind-hydro system in El Hierro island. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 134. Pp. 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.047>.

9. Васько В.П., Васько П.Ф. Динамика нагрузочных режимов работы ветроэлектрической установки, обусловленная порывами ветра. Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Зб. наук. праць. 2001. № 4 (29). С. 140-144.
10. Васько П.Ф., Васько В.П., Даниленко О.І., Долюк В.В. Експериментальні дослідження режимів генерування та споживання реактивної потужності серійною вітроелектричною установкою з асинхронним генератором. Відновлювана енергетика. 2008. № 1. С. 34-38.
11. Пазич С.Т. Апроксимація аеромеханічних характеристик вітрової турбіни вітроводонасної установки в навантажувальних режимах роботи методом заміни змінних. Відновлювана енергетика. 2018. № 1(52). С. 62-69.
12. Абрамовский Е.Р., Горюдько С.В., Свиридов Н.В. Аэродинамика ветродвигателей. Днепропетровск. Изд-во ДГУ. 1987. 220 с.
13. ДСТУ ІЕС 61400-12-2001. Системи турбогенераторні вітряні. Частина 12. Випробування вітряних турбін для визначення енергетичних характеристик. (ІЕС 61400-11:1998, ІДТ). Введ. 01.07.2003 р. К. Держспоживстандарт України. 2003. 31 с.
14. Аршеневский Н.Н. Обратимые гидромашинны для гидроаккумулирующих электростанций. М. Энергия. 1977. 240 с.
15. Степанов А. И. Центробежные и осевые насосы. М. Машгиз. 1960. 464 с.
16. Воскобойник В.Э., Бородай В.А. Основы электропривода производственных машин и комплексов. Днепропетровск. Государственный ВУЗ «НГУ». 2015. 121 с.
17. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. (Механика турбулентности). Ч. 2. М. Наука. 1967. 720 с.
18. Кривоцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика. Харьков. Изд. Национальный аэрокосмический ун-т. 2004. 519 с.
19. Панчев С. Случайные функции и турбулентность. Л. Гидрометеиздат. 1967. 448 с.
20. Васько П.Ф., Пазич С.Т. Моделирование динаміки навантажувальних режимів роботи гідронасосної станції з електроприводом за живлення від вітроелектричної установки з синхронним генератором. Відновлювана енергетика. 2020. № 1. С. 61-73.
21. Васько П.Ф. Наближена заступна електрична схема синхронного вьнополюсного генератора для аналізу навантажувальних режимів роботи автономних вітро- та гідроелектричних установок. Відновлювана енергетика. 2020. № 3. С. 51-61.
22. Брыль А.А., Васько П.Ф., Пекур П.П. Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине. Энергетика и электрификация. 1995. № 2. С. 48-51.
23. Васько П.Ф. Розрахунок показників технічної ефективності застосування вітроелектричних установок за результатами строкових вимірювань швидкості вітру. Технічна електродинаміка. 2001. № 6. С. 45-49.
24. Кінаш Р.І. Бурнаєв О.М. Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні. Львів. Вид-во наук.-техн. літ. 1998. 1152 с.
25. Дані вітропотенціалу на мапі світу. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.renewables.ninja/>. (дата звернення: 23.11.2020).
26. Васько П.Ф., Вербовий А.П., Пазич С.Т. Реалізація стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2017. № 3. С. 54-61.
27. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. М. Наука. 1968. 368 с.
28. Васько П.Ф., Вербовий А.П., Ібрагімова М.Р., Пазич С.Т. Гідроаккумулявальні електростанції – технологічна основа інтеграції потужних вітро- та фотоелектричних станцій до складу електроенергетичної системи України. Гідроенергетика України. 2017. № 1-2. С. 20-25.
29. Vasko P., Verbovij A., Moroz A., Pazych S., Ibragimova M., Sahnno L. Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS). April 17-19. 2019. Kyiv. Ukraine. Pp. 188-191. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764167>. (дата звернення: 23.11.2020).

REFERENCE

1. The power system of Ukraine is installed. Ukrenergo. [Electronic resource]. URL: <https://ua.energy/vstano-vena-potuzhnist-energosityemy-ukrayiny/>. (Applying date: 23.11.2020). [in Ukrainian].
2. Hornsdale Power Reserve. [Electronic resource]. URL: <https://hornsdalepowerreserve.com.au/>. (Applying date: 23.11.2020). [in English].
3. Energy Storage Technology Roadmap. Technology Annex. International Energy Agency (IEA). 2014. [Electronic resource]. URL: https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/AnnexA_TechnologyAnnexforweb.pdf. (Applying date: 23.11.2020). [in English].
4. Espejo de Tarapaca. [Electronic resource]. URL: <http://valhalla.cl/espejo-de-tarapaca/>. (Applying date: 23.11.2020). [in English].
5. Max Bøgl Wind AG. [Electronic resource]. URL: <http://www.mbrenewables.com/en/pilot-project/>. (Applying date: 23.11.2020). [in English].
6. Merino J., Veganzones C., Sanchez J.A., Martinez S., Platero C.A. Power System Stability of a Small Sized Isolated Network Supplied by a Combined Wind-Pumped Storage Generation System: A Case Study in the Canary Islands. Energies. 2012. № 7. Pp. 2351-2369. <https://doi.org/10.3390/en5072351>. [in English].
7. Grazyna Frydrychowicz-Jastrzębska. El Hierro Renewable Energy Hybrid System: A Tough Compromise. Energies. 2018. № 11(10). 2812 p. <https://doi.org/10.3390/en1102812>. [in English].
8. Latorre F., Quintana J.J., Nuez I. Technical and economic evaluation of the integration of a wind-hydro system in El Hierro island. Renewable Energy. 2019. Vol. 134. Pp. 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.047>. [in English].
9. Vasko V.P., Vasko P.F. Dinamika nagruzochnyih rezhimov raboty vetroelektricheskoy ustanovki, obuslovlennaya porivami vetra. [Dynamics of loading modes of the wind-electric units, caused by gust of wind]. Bulletin of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture. Collection of scientific work. 2001. No. 4(29). Pp. 140-144. [in Russian].
10. Vasko P.F., Vasko V.P., Danylenko O.I., Doliuk V.V. Eksperymentalni doslidzhennia rezhymiv heneruvannia ta spozhyvannia reaktyvnoi potuzhnosti seriinoiu vitroelektrychnoiu ustanovkoiu z asynkhronnym heneratorom. [Experimental studies of the modes of generation and consumption of reactive power by a serial wind power units with an asynchronous generator]. Vidnovluyana energetika. 2008. No. 1. Pp.34-38. [in Ukrainian].
11. Pazych S.T. Aproksimatsiya ayeromekhanichnikh kharakteristik vitrovoi turbini vitrovodonasnoi ustanovki v navantazhuvalnikh rezhimakh roboti metodom zamini zminnikh. [Approximation of aeromechanical characteristics of the wind turbine of a wind pump installation in the load operation modes by the method of changing the variables]. Vidnovluyana energetika. 2018. No. 1. Pp. 62-69. [in Ukrainian].

12. *Abramovskiy E.R., Gorodko S.V., Sviridov N.V.* Aerodinamika vetrodvigateley. [Aerodynamics of wind turbines]. Dnepropetrovsk. Publisher DGU. 1987. 220 p. [in Russian].
13. IEC 61400-12-1998. Wind turbine generator systems. Part 12. Wind turbine power performance testing. [in English].
14. *Arshenevskiy N.N.* Obratymie hydromashyny dlia hydroakkumulyruyushchykh elektrostantsyi. [Reversible hydraulic machines for pumpedhydroelectricenergystorage]. Leningrad. Energia. 1977. 240 p. [in Russian].
15. *Stepanoff A.I.* Tsentrobezhnyie I osevyie nasosy [Centrifugal and axial flow pumps]. Moscow. Mashgiz. 1960. 464 p. [in Russian].
16. *Voskoboynik V.E., Boroday V.A.* Osnovy elektroprivoda proizvodstvennykh mashin i kompleksov. [Fundamentals of electric drive of production machines and complexes]. Dnepropetrovsk. State University «NSU». 2015. 121 p. [in Russian].
17. *Monin A.S., Yaglom A.M.* Statisticheskaya gidromekhanika (Mekhanika turbulentsi). [Statistical fluid mechanics. (Mechanics of turbulence)]. Part 2. M. Nauka. 1967. 720 p. [in Russian].
18. *Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I.* Neisчерpaemaya energiya. Kn. 2. Vetroenergetika. [Inexhaustible energy. B. 2. Wind power]. Textbook. 2004. 519 p. [in Russian].
19. *Panchev S.* Sluchaynyie funktsii i turbulentsnost. [Randomfunctions and turbulence]. Leningrad. Gidrometeoizdat. 1967. 448 p. [in Russian].
20. *Vasko P.F., Pazykh S.T.* Modeliuvannya dynamiky navantazhuvalnykh rezhymiv roboty hidronasosnoi stantsii z elektroprivodom za zhyvlennia vid vitroelektrychnoi ustanovky z synkronnym heneratorom. [Modeling dynamics loading modes work of the hydro-pump station with the electric drive from power supply of the wind electric installation with the synchronous generator]. Renewable energy. 2020. No. 1. Pp. 61-73. [in Ukrainian].
21. *Vasko P.F.* Nablyzhena zastupna elektrychna skhema synkronnoho yavnopoliusnoho heneratora dlia analizu navantazhuvalnykh rezhymiv roboty avtonomnykh vitro- ta hidroelektrychnykh ustanovok. [Approximate substitution electrical equivalent circuit of explicit pole synchronous generator for analysis of loading operating modes autonomous wind-electric and hydroelectric units]. Vidnovluvana energetika. 2020. No. 3. Pp. 51-61. [in Ukrainian].
22. *Bryl A.A., Vasko P.F., Pekur P.P.* Opredelenie tehnikeskikh pokazateley effektivnosti ispolzovaniya vitroelektricheskikh agregatov v Ukraine. [Definition of technical indicators of efficiency of use the wind-electric aggregates in Ukraine]. Energy and electrification. 1995. No. 2. Pp. 48-51. [in Russian].
23. *Vasko P.F.* Razrakhunok pokaznykh tekhnichnoy effektivnosti zastosuvannya vitroelektrychnykh ustanovok za rezultatamy strokovykh vymiryuvan shvydkosti vitru. [Calculation of the technical efficiency of the application of wind power units based on the results of term velocity measurements wind speed]. Technical electrodynamics. 2001. No. 6. Pp. 45-49. [in Ukrainian].
24. *Kinash R.I., Burnaev O.M.* Vitrove navantazhennya i vitroyenergetichni resursy v Ukraini. [Wind load and wind energy resources in Ukraine]. Lviv. View. Sci.-Tech. Lit. 1998. 1152 p. [in Ukrainian].
25. Wind potential data on the world map. [Electronic resource]. URL: <https://www.renewables.ninja/>. (Applying date: 23.11.20). [in English].
26. *Vasko P.F., Verbovyi A.P., Pazykh S.T.* Realizatsiia stokhastychnoi dvoparametrychnoi modeli pozdovzhnoi skladovoi shvydkosti vitru dlia zadach vitroenerhetyky. [Implementation of a stochastic two-parameter model of the longitudinal component of the wind speed for wind power problems]. Vidnovluvana energetika. 2017. No. 3. Pp. 54-61. [in Ukrainian].
27. *Pugachev V.S.* Vvedenie v teoriyu veroyatnostey [Introduction to probability theory]. M. Nauka. 1968. 368 p. [in Russian].
28. *Vasko P.F., Verbovyi A.P., Ibragimova M.R., Pazykh S.T.* Hidroakkumulyuvalni elektrostantsiyi – tehnologichna osnova Integratsiyi potuzhnykh vitro- ta fotoelektrichnykh stantsiy do skladu elektroenergetichnoy sistemi Ukrainy. [Pumped hydroelectric energy storage – technological basis of integration of powerful wind and photoelectric power stations into the power system of Ukraine]. Hydropower of Ukraine. 2017. No. 1-2. Pp. 20-25. [in Ukrainian].
29. *Vasko P., Verbovij A., Moroz A., Pazykh S., Ibragimova M., Sahno L.* Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS). April 17-19. 2019. Kyiv. Ukraine. Pp. 188-191. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764167>. (Applying date: 23.11.20). [in English].

Стаття надійшла до редакції 23.11.20

Остаточна версія 21.12.20