

УДК 621.67.015

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ І КВАЗІСТАТИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОВІДОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З УРАХУВАННЯМ СТОХАСТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

А.П. Вербовий, кандидат технічних наук, **С.Т. Пазич**

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

Розроблені імітаційні моделі вітротурбіни і насосної установки. Проведені чисельні розрахунки швидкості вітротурбіни і насосу з урахуванням стохастичної складової швидкості вітру в динамічних і квазістатичних режимах роботи. Для перевірки отриманих результатів і адекватності створених моделей було проведено порівняння з експериментальними даними. При проведенні аналізу розрахункових і експериментальних даних, встановлено хороши збіг отриманих результатів. Розрахована подача відцентрового насоса при змінній швидкості з урахуванням моменту опору. Бібл. 25., рис. 7

Ключові слова: вітровідонасосна установка, модель, експеримент, швидкість, момент, подача, напір.

MODELING OF DYNAMIC AND QUASISTATIC MODES OF THE WORK OF A WIND PUMP INSTALLATION WITH CONSIDERATION OF STOCHASTIC COMPOUND WIND SPEED

A. Verbovij, candidate of technical sciences, **S. Pazych**

Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine
02094, 20A Hnata Khotkevycha, Kyiv, Ukraine

The simulation models of the wind turbine and pump installation have been developed. The numerical calculations of the speed of the wind turbine and the pump are carried out taking into account the stochastic component of the wind speed in the dynamic and quasi-static operating modes. To check the results and adequacy of the created models, a comparison was made with experimental data. When conducting analysis of calculation and experimental data, a good coincidence of the obtained results is established. The supply of a centrifugal pump at a variable speed, taking into account the moment of resistance, is calculated. References 25, fig. 7.

Keywords: wind turbine installation, model, experiment, speed, moment, feed, pressure.



А. Вербовий
A. Verbovij

Відомості про автора: старший науковий співробітник відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАНУ.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

Спеціальність «Електропривод та автоматизація промислових установок».

Публікації: 126.

ORCID: 0000-0003-2838-6032

Контакти:

тел. /факс: +38 (044) 206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Author information: senior research fellow of Hydropower Engineering Department, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Specialty «Electric drive and automation of industrial plants».

Publications: 126.

ORCID: 0000-0003-2838-6032

Contacts: +38 (044) 206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua



С. Пазич
S. Pazykh

Відомості про автора: аспірант, молодший науковий співробітник відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАНУ.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Спеціальність «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії».

Публікації: 9.

ORCID: 0000-0002-6310-9842

Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09, e-mail: hydro@ive.org.ua

Information about the author:

postgraduate, junior researcher of Hydropower Engineering Department, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Specialty «Non-traditional and renewable energy sources».

Publications: 9.

ORCID: 0000-0002-6310-9842

Contacts: +38-044-206-28-09, e-mail: hydro@ive.org.ua

Перелік умовних позначень:

ВНУ – вітроводонасосна установка;

ВТ – вітротурбіна;

J – момент інерції;

ω – кутова швидкість;

M_{BT} – момент вітротурбіни;

C_p – коефіцієнта потужності;

R – радіус лопатей;

λ – кут повороту лопаті;

v_e – швидкість вітру;

n_{BT} – швидкість вітротурбіни;

Q – подача насоса;

H – напір насоса;

M_o – момент опору насоса.

Вступ. Основним напрямком вдосконалення сучасного вітро- та гідроенергетичного обладнання є підвищення техніко-економічних показників при забезпеченні високої надійності і ефективності експлуатації таких систем [1]. Для вирішення таких задач чимале значення мають проблеми, пов'язані з протіканням перехідних процесів, під час яких виникають найбільші динамічні навантаження, які впливають на окремі елементи обладнання та напірні водопроводи. Впровадження в практику більш досконалих методів розрахунку і проектування, заснованих на максимально повному врахуванні реальних параметрів всієї вітро- та гідромеханічної системи, дозволяє отримати розрахункові технічні характеристики і параметри створюваного об'єкта при необхідних навантаженнях і передбачуваних умовах експлуатації. Перехідні процеси, які протікають в вітроводонасосній установці (ВНУ), є найбільш небезпечними, оскільки вони супроводжуються максимальними динамічними навантаженнями на устаткування всієї системи.

Для дослідження динамічних і квазістатичних режимів ВНУ застосовується комплексна імітаційна модель. С точки зору, практичного використання доцільно реалізувати модель ВНУ в сучасних математичних програмних пакетах. При цьому значно скорочуються витрати на проведення безпосереднього експерименту, тому що параметри моделі уточнюються ще в ході комп'ютерного моделювання. У більшості випадків сучасні засоби моделювання дозволяють забезпечити високий рівень адекватності моделі. Одним з таких засобів, завдяки своїм функціональним і інтерфейсним можливостям, одним з найбільш широко використовуваних для проведення різного роду розрахунків та досліджень (моделюванні і аналізі різноманітних динамічних систем), є математичний пакет MATLAB [2, 3, 4]. При цьому важливими складовими частинами комплексної моделі є: стохастична модель вітру; модель вітротурбіни (ВТ); модель системи перекачування рідини [5]. Структурна схема моделі вітроводонасосної установки зображена на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема вітроводонасосної установки.

Fig. 1. Block diagram of a wind pump installation.

З першого блоку виходить сигнал стохастичної (динамічної) складової швидкості вітру [6, 7], реалізація і моделювання якого детально описана в [8]. Він надходить на другий блок, який моделює ВТ. Сигнал швидкості ВТ далі надходить на

модель насосу.

Модель вітро-турбіни для динамічних і статичних режимів роботи представлена на рис. 2. За основу взята модель вітро-турбіни Wind Turbine підрозділу SimPowerSystem.

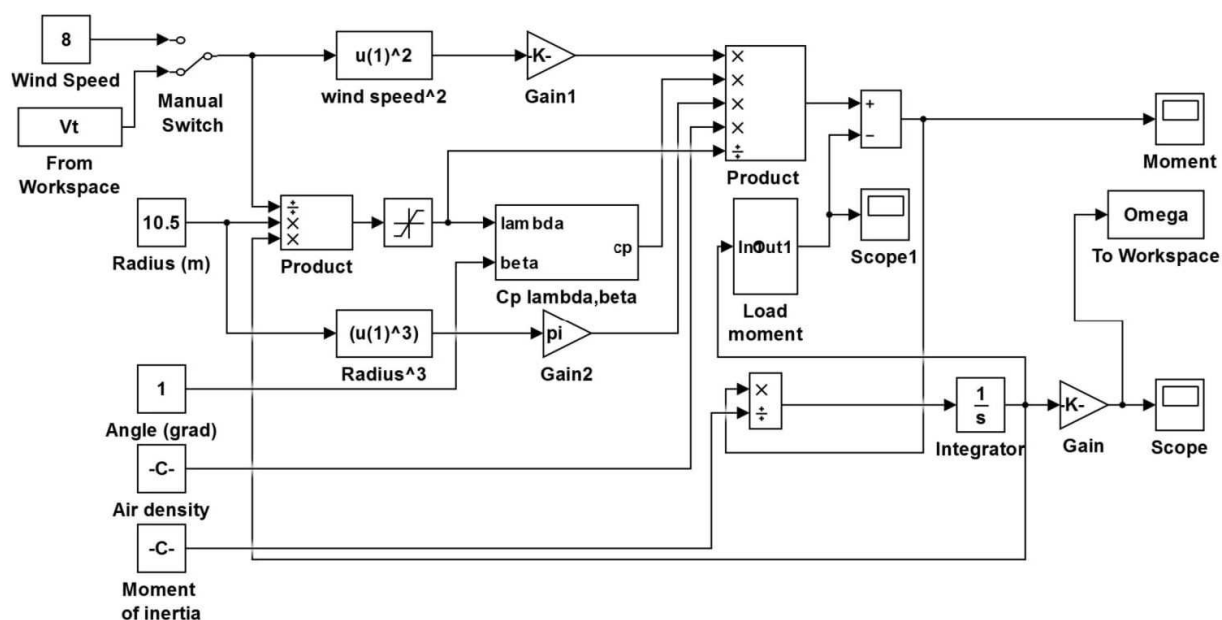


Рис. 2. Імітаційна модель вітро-турбіни.

Fig. 2. A simulation model of the wind turbine.

В процесі моделювання ВТ використовується динамічне рівняння руху, на основі якого будується модель ВТ.

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{BT}[v(t), \omega(t), \lambda] - M_{on} - M_c, \quad (1)$$

де J – момент інерції ВТ; $\omega(t)$ – кутова швидкість ВТ; M_{BT} – момент ВТ; $v(t)$ – швидкість вітру; λ – кут повороту лопаті ВТ; M_{on} – момент опору насосної установки; M_c – момент опору сил тертя і додаткових втрат в редукторі.

За допомогою стандартних блоків Simulink моделюємо рівняння моменту ВТ, а також всі моменти опору

$$M_{BT}[v(t), \omega(t), \lambda] = 0,5\pi R^3 \rho v(t)^2 \frac{C_p}{Z}, \quad (2)$$

де R – радіус ВТ; ρ – густина повітря; C_p – коефіцієнт потужності; $Z = \omega(t) \cdot R / v(t)$ – швидкості ВТ.

Для розрахунку коефіцієнта потужності C_p використовуємо рівняння, яке наведене в [9]

$$C_p = C_1 \left(\frac{C_2}{\beta} - C_3 \lambda - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\beta}} + C_6 Z, \quad (3)$$

де $C_1 = 0.73$; $C_2 = 116$; $C_3 = 0.4$; $C_4 = 5$; $C_5 = 21$; $C_6 = 0.0068$ – емпірично визначені коефіцієнти.

В формулу (3) входить коефіцієнт β , який знаходимо за таким виразом (4)

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{Z + 0,08\lambda} - \frac{0,035}{\lambda^3 + 1}}. \quad (4)$$

Величини моменту інерції – J ; радіусу лопатей – R ; густини повітря – ρ ; кут повороту лопаті – λ визначаються попередньо, або беруться з каталожних даних.

Відмінною особливістю роботи ВТ є її робота в умовах безперервної пульсації швидкості вітру, це обумовлює значну нерівномірність вироблення механічної енергії протягом часу. Відомо, що вироблена потужність ВТ пропорційна

кубу швидкості вітру. Так як швидкість вітру змінюється стохастично, то відповідно змінюється потужність і момент на валу ВТ. В результаті змінюється частота обертання ВТ [10]. Миттєве значення швидкості вітру істотно впливає як на саму ВТ, так і на роботу систем автоматичного регулювання, управління режимами роботи агрегатів [11, 12].

Графічне зображення експериментальних залежностей [13] швидкості ВТ в процесі пуску і дійсного значення вітру в залежності від часу показано на рис. 3. На рис. 4 зображені експериментальні залежності тих самих величин в квазістатичному режимі [14]. Осцилограми розгону ВТ було отримано за таких параметрів: радіус вітроколеса $R = 7,5$ м; кут повороту лопаті $\lambda = 6^\circ$; момент інерції $J = 9000$ кг·м²; середня швидкість вітру $v_g = 6,8$ м/с. Для отримання експериментальних залежностей застосовувалася ВТ з горизонтальною віссю обертання і мала шість лопатей.

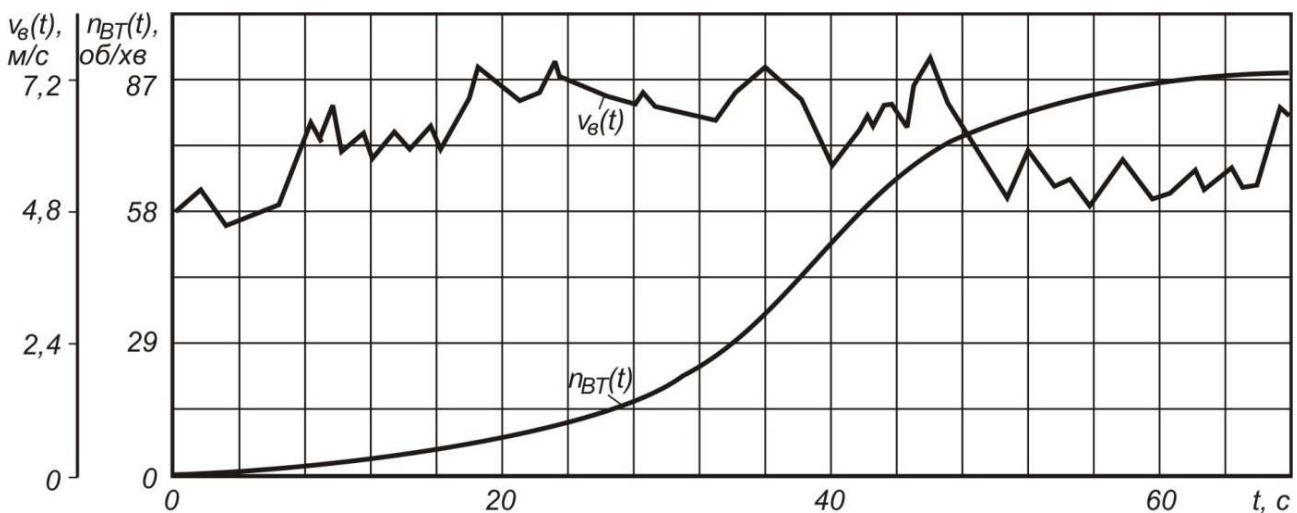


Рис. 3. Експериментальні залежності швидкості вітру і ВТ в процесі пуску.

Fig. 3. Experimental dependencies of wind speed and of the wind turbine during a start-up.

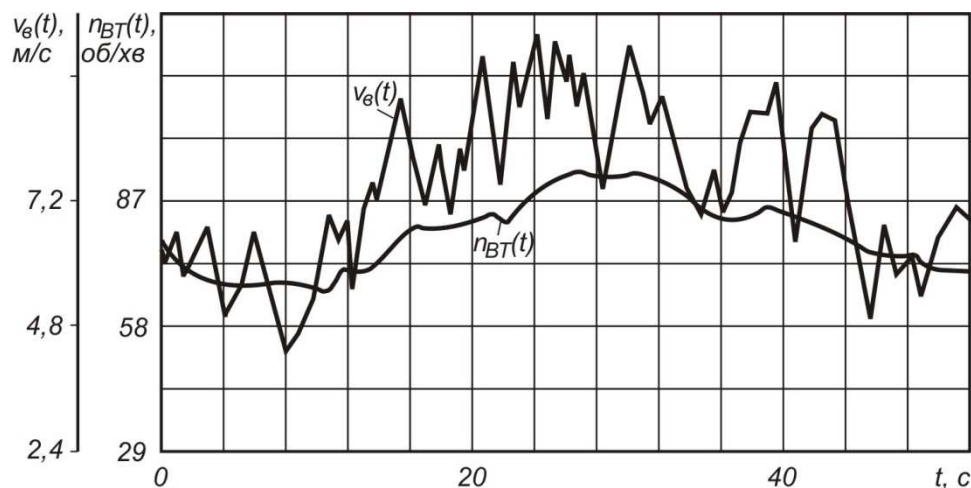


Рис. 4. Експериментальні залежності швидкості вітру і ВТ в квазістатичному режимі.

Fig. 4. Experimental dependencies of wind speed and of the wind turbine in quasistatic mode.

Для моделювання процесу пуску ВТ з урахуванням стохастичної складової швидкості вітру використаємо такі припущення: не враховується момент тертя в механічних елементах ВТ і редуктора; кут повороту лопаті приймаємо постійним. В формулу для розрахунку коефіцієнта потужності C_p входять коефіцієнти $C_1 \dots C_6$, які визначені для ВТ з трьома лопатями. Оскільки трилопатевої і шестилопатевої ВТ, з урахуванням специфікації

профілю лопаті, мають подібні аеромеханічні характеристики – похибка в моделюванні ВТ буде незначна, і її вплив на розрахункові характеристики буде мінімальний.

На рис. 5 зображені характеристики швидкості вітру і ВТ в процесі пуску та в квазістаціонарному режимі під час їх моделювання за допомогою інтерактивного інструменту Simulink, який входить до прикладного пакету MATLAB.

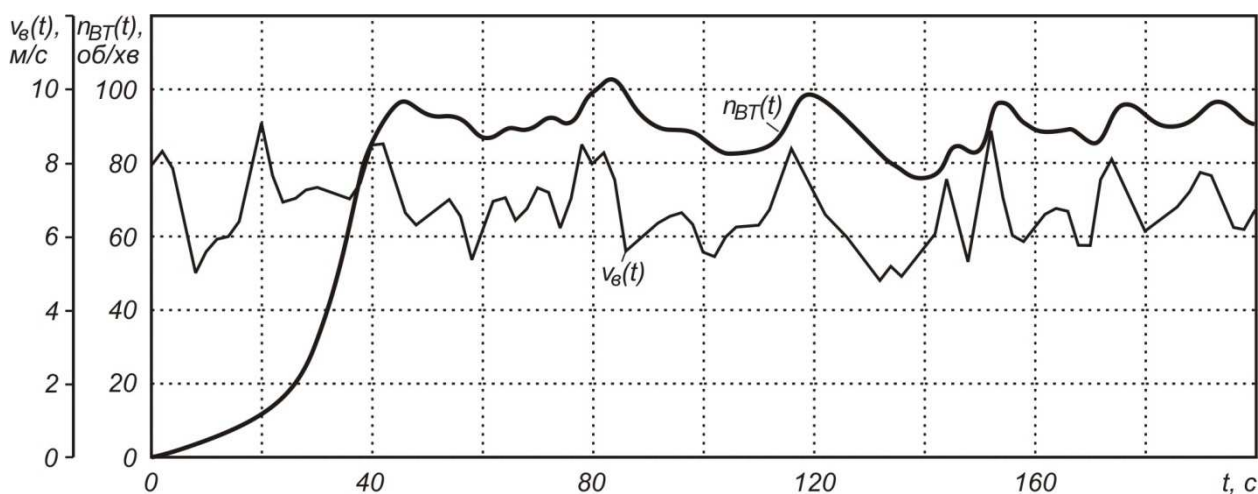


Рис. 5. Розрахункові залежності швидкості вітру і ВТ.

Fig. 5. Calculated dependencies of wind speed and wind turbine.

Порівняння отриманої розрахункової залежності швидкості ВТ $n_{ВТ}(t)$ з експериментальною показує хороший збіг результатів. У початковий момент часу пуску ВТ експериментальна залежність практично не відрізняється від розрахункової. Розгін до квазістаціонарного режиму завершується на 45 с під час моделювання і на 60 с – в

результаті проведення експерименту. Амплітуди коливань розрахованої швидкості ВТ на 7–11% вищі від експериментальних. Деяка відмінність викликана відхиленням швидкості вітру, отриманої за допомогою математичного моделювання від фактичної швидкості вітру в процесі проведення експерименту, та характеризується нехту-

ванням моменту тертя в механічних частинах ВТ при моделюванні. Незважаючи на деякі відмінності в процесі моделювання швидкості обертання валу ВТ, запропонована модель ВТ відповідає сучасним вимогам до розрахункових методів і методик.

Модель системи перекачування рідини на основі відцентрового насоса. За допомогою інтерактивних пакетів SimHydraulics /Simscape та Simulink програмного комплексу MATLAB було розроблено модель системи перекачування рідини, яка показана на рис. 6.

До складу моделі входить блок Centrifugal Pump – відцентровий насос. Основними парамет-

рами для цього блоку є робочий об'єм насоса, об'ємний і повний коефіцієнти корисної дії, номінальний тиск і кутова швидкість приводного валу насоса. Всі ці параметри наводяться в довідковій літературі або каталогах виробників [15, 16]. У вікні блоку Centrifugal Pump необхідно задати один з методів параметризації (за апроксимуючим многочленом, за $Q-H$ характеристикою, або за $Q-H$ характеристикою в залежності від швидкості обертання насоса). Також необхідно навести щільність рідини, кутову швидкість, вектор подачі насоса, вектор перепаду тиску та вектор гальмівної потужності [17, 18, 19].

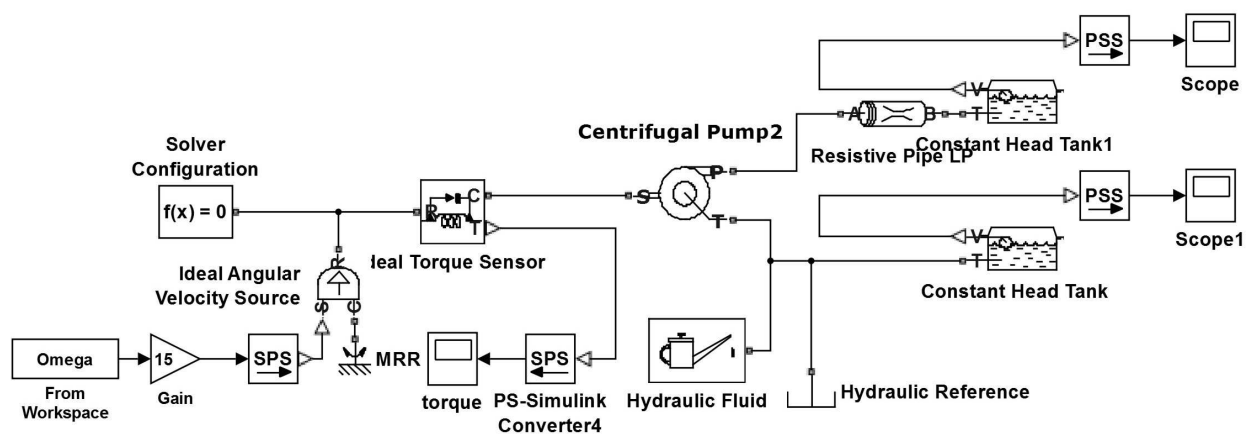


Рис. 6. Модель системи перекачування рідини на основі відцентрового насоса.

Fig. 6. Model of fluid transfer system based on a centrifugal pump.

Для моделювання системи перекачування рідини і блоку Centrifugal Pump візьмемо параметри і характеристики серійного відцентрового насоса СМ 200-150-400б-4 [20]. Номінальні дані: подача Q_n – 300 м³/год, напір H_n – 32 м і кавітаційний запас – 7 м. Залежності потужності і коефіцієнта корисної дії (ККД) від подачі наведені в [21]. Номінальні оберти насоса приймаємо, як і у асинхронного двигуна, яким він може бути укомплектований $n_n = 1476$ об/хв. Моделювання системи перекачування рідини будемо здійснювати на прикладі спорудження вітроводонасосної установки на о. Зміїний. Найбільша висота на острові складає 41 м, середня 20 м. З урахуванням висоти резервуару, що складає 12 м, напір, що його розвиває насос, повинен складати не менше $H_n = 32$ м.

Момент опору насоса знаходиться з виразу

$$M_{он} = M_{сн} (n_n / n_n)^k, \quad (5)$$

де $M_{сн} = (Q_n H_n) / (\omega_n \eta)$ – номінальний момент опору; n_n і n_n – поточна і номінальна швидкості обертання. Для визначення показника ступеня k в формулі (5) необхідно визначитися з параметрами робочого режиму насосної установки [22, 23, 24]. В цьому випадку вони дорівнюють: $Q_1 = 350$ м³/ч, $Q_2 = 150$ м³/ч – подача; $\eta_n = 0,66$ – ККД; $H_1 = 38$ м і $H_2 = 30$ м – напір; $H_{сн} = 32$ м – статичний напір; напір $H_0 = 39$ м при $Q_0 = 0$; $\rho = 1020$ кг/дм³ – щільність рідини (води). З урахуванням параметрів робочого режиму формула для показника ступеня k має вигляд

$$k = \frac{\log\left(\frac{Q_1 \cdot H_1}{Q_2 \cdot H_2}\right)}{\log\left(\frac{\omega_n}{\omega_{min}}\right)} - 1 = 2,5, \quad (6)$$

де ω_n – номінальна кутова швидкість обертання на валу насоса; ω_{min} – мінімальна швидкість обертання, яку з урахуванням перетворень беремо з графіка $n_{BT}(t)$ рис. 5.

Подачу насоса при змінній швидкості на валу ВТ знаходимо за формулою [25]

$$Q(n) = \frac{\sqrt{H_0 \left(\frac{n_n}{n_n}\right)^2 - H_{cm}}}{R + C}, \quad (7)$$

де R – коефіцієнт опору мережі, значення якого беруться з довідників, або розраховуються окре-

мо; C – коефіцієнт, який знайдемо за виразом за номінальними даними насоса:

$$C = \frac{H_0 - H_n}{Q_H^2}, \quad (8)$$

Формула (7) справедлива для випадку, коли швидкість $n_n \geq n_{min}$, тобто в робочих межах зміни швидкості, і при статичному напорі не рівному нулю.

Рівняння опору насоса, з урахуванням показника ступеня k вносимо в модель ВТ при розрахунку рівняння руху. Формулу подачі при змінній швидкості додаємо в модель системи перекачування рідини і проводимо розрахунки. Результати розрахунку, які зображені на рис. 7, дозволяють оцінити подачу насоса в квазістатичному режимі при змінних обертах.

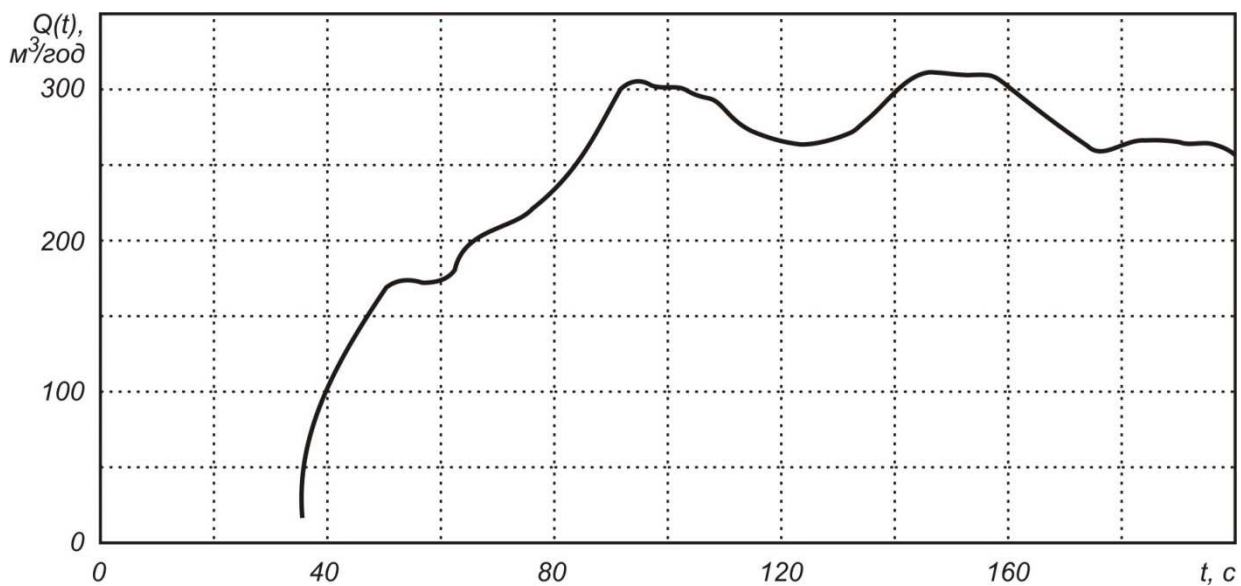


Рис. 7. Розрахункова залежність подачі насоса.

Fig. 7. Estimated dependence of pump.

В початковий момент пуску в зоні дуже малої швидкості подача насоса відсутня. При 81 об/хв на валу ВТ насос починає працювати. У разі подальшого збільшення швидкості ВТ, подача насоса зростає і досягає максимальних значень, коли швидкість ВТ перевищує номінальну. Під час роботи насоса на швидкості, близькій до номінальної, спостерігається процес, коли подача коливається в деяких межах, тобто вона не постійна. Такі коливання можуть впливати на час

наповнення резервуара. Для резервуарів не великого об'єму коливання подачі насоса не суттєво впливатимуть на час наповнення.

Висновки. Розроблена модель вітроводонасосної установки достовірно описує механічні процеси перетворення енергії і дозволяє досліджувати динамічні і квазістатичні режими роботи системи, з урахуванням стохастичної складової швидкості вітру. Модель може бути корисна для проектування вітроводонасосних установок, які

тільки створюються, або для модернізації тих, які вже існують. Порівняння розрахункових і експериментальних даних швидкості ВТ показало, що різниця не перевищує 11%, і відповідає сучасним вимогам до розрахункових моделей.

1. Мхитарян Н.М. Основные направления и стратегия развития возобновляемой энергетики в Украине // Відновлювана енергетика. 2005. № 1. С. 8–18.

2. Черных И.В. SIMULINK – Среда создания инженерных приложений / М., 2004. 496 с.

3. Потемкин В. Введение в MATLAB. М., 2000. 314 с.

4. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании. М., 2003. 768 с.

5. Вербовий А.П. Модель вітроводонасосної установки для дослідження режимів роботи гідроаккумуляційних електростанцій / Матеріали 19 міжнародної наук.-практ. конференції «Відновлювана енергетика і енергоефективність у 21 столітті», 26–28 вересня 2018 р., Київ. С. 511–514.

6. Обухов С.Г., Плотников И.А., Сарсикеев Е.Ж. Динамическая модель продольной составляющей скорости ветра. Томск. 2013. № 5.

7. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.

8. Васько П.Ф., Вербовий А.П., Пазич С.Т. Реалізація стохастичної двопараметричної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2017. № 3. С. 54–61.

9. Siegfried Heier. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems, 3rd Edition Wiley & Sons Ltd, 2014.

10. Prasad S.S., Virupaxi A. Optimized Design of a Rotor Blade for a Wind Pump. International Journal of Renewable Energy Research. Vol. 2, Number 4. 2012.

11. Харитонов В.П. Работа электронасосной ветроустановки при порывистом ветре. Докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. по возобновляемым источникам энергии. Вып. 2. Ветроэнергетика. М., 1972. С. 43–48.

12. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. М., 2006. 280 с.

13. Денисенко Г.И., Васько П.Ф., Бриль А.А. Энергетическая оценка возможности создания ветроэлектрических установок мощностью 10-250 кВт на основе вертолетных лопастей. Энергетика. 1986. № 12. С. 3–8.

14. 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.

15. Ronak, D.G., Pramod, K. Design and Development of Windmill Operated Water Pump. International Journal of Engineering and Technical Research. 2015.

16. Swapnil D.D. Windmill Water Pumping System. International Journal for Technological Research in Engineering. Vol. 2, Issue 7.

17. Dorothy, A. (2004). Water Pumping Windmills. Accessed on 13th August 2013.

18. Werner Sölken. (2013). Introduction to pumps - centrifugal pumps. Retrieved, 2013. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.wermac.org/equipment/pumps_centrifugal.html.

19. Дедков В.Н. Применение серийных насосов в качестве гидротурбин для малой энергетики. Проблемы машиностроения. 2011. Т. 14, № 4. С. 24–30.

20. Argaw, N., Foster, R., and Ellis, A. Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages National Renewable Energy Laboratory, Subcontractor Report No. 500-30361, July 2003. pp. 20–22, 27–31.

21. Вербовий А.П. Серійні насоси у складі малих гідроаккумуляційних електростанцій в якості гідромашин зворотної дії вітроенергетики. Відновлювана енергетика. 2018. № 3. С. 46–53.

22. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М., 1976. 488 с.

23. Williams A. Pumps as turbines. A user's guide. Intermediate Technology Publications, London, 1995.

24. Степанов А.И. Центробежные и осевые насосы / М., 1960. 464 с.

25. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М., 1972. 240 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕТРОВОДОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

А.П. Вербовой, кандидат технических наук, С.Т. Пазыч

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
02094 ул. Гната Хоткевича, 20А, г. Киев

Разработанные имитационные модели ветротурбины и насосной установки. Проведенные численные расчеты скорости ветротурбины и насоса с учетом стохастической составляющей скорости ветра в динамических и квазистатических режимах работы. Для проверки полученных результатов и адекватности созданных моделей было проведено сравнение с экспериментальными данными. При проведении анализа расчетных и экспериментальных данных, установлено хорошее совпадение полученных результатов. Рассчитана подача центробежного насоса при переменной скорости с учетом момента сопротивления. Библ. 25, рис. 7.
Ключевые слова: ветроводонасосная установка, модель, эксперимент, скорость, момент, подача, напор.

REFERENCES

1. Mhitarayan N.M. Osnovnyie napravleniya i strategiya razvitiya vobnovlyemoy energetiki v Ukraine [The main directions and development strategy of renewable energy in Ukraine]. Vidnovlyuvana energetika. 2005. No. 1. pp. 8–18. [in Russian]

2. *Chernyih I.V.* SIMULINK – Sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy [Environment for creating engineering applications] Moscow. Dialog-MIFI, 2004. 496 p. [in Russian]
3. *Potemkin V.* Vvedenie v MATLAB [Introduction to MATLAB]. Moscow, Dialog-MIFI, 2000. 314 p. [in Russian]
4. *Dyakonov V.P.* MATLAB 6/6.1/6.5 SIMULINK 4/5 v matematike i modelirovanii [MATLAB 6 / 6.1 / 6.5 + SIMULINK 4/5 in mathematics and modeling]. Moscow, Solon-Press, 2003. 768 p. [in Russian]
5. *Verbovyi A.P.* Model vitrovodonasnoi ustanovky dlia doslidzhennia rezhymiv roboty hidroakumuliuvalnykh elektrostantsii [Model of the windmill water pumping system for studying the operation modes of pumped hydro storage power plants]. Materialy 19 mizhnarodnoi nauk.-prakt. konferentsii Vidnovliuvana enerhetyka i enerhoefektyvnist u 21 stolitti, 26–28 veresnia 2018 [Materials of 19 international sciences. Conference Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century, September 26–28, 2018]. Kyiv. pp. 511–514. [in Ukrainian]
6. *Obuhov S.G., Plotnikov I.A., Sarsikeev E.Zh.* Dinamicheskaya model prodolnoy sostavlyayushey skorosti vetra [The dynamic model of wind speed axial component]. Tomsk, 2013. No. 5. [in Russian]
7. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements. [in English]
8. *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]. Vidnovliuvana enerhetyka, 2017. No. 3. pp. 54–61. [in Ukrainian]
9. *Siegfried Heier.* Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems, 3rd Edition Wiley & Sons Ltd, 2014. [in English]
10. *Prasad S.S., Virupaxi A.* Optimized Design of a Rotor Blade for a Wind Pump. International Journal of Renewable Energy Research. Vol. 2, No. 4. 2012. [in English]
11. *Haritonov V.P.* Rabota elektronasosnoy vetroustanovki pri porivistom vetre [Work of electropump wind at gusting wind] Dokl. 1 Vsesoyuz. nauch.-tehn. konf. po vozobnovlyayemyim istochnikam energii. Vyip. 2. Vetroenergetika [Report. 1 All-Union. scientific and technical. conference. on renewable energy sources. Release. 2. Wind power]. Moscow, Energiya, 1972. pp. 43–48. [in Russian]
12. *Haritonov V.P.* Avtonomnyie vetroelektricheskije ustanovki [Autonomous wind power plants]. Moscow, 2006. 280 p. [in Russian]
13. *Denisenko G.I., Vasko P.F., Bril A.A.* Energeticheskaya otsenka vozmozhnosti sozdaniya vetroelektricheskikh ustanovok moschnostyu 10-250 kVt na osnove vertoletnykh lopastey [Energy evaluation of the possibility of creating wind power plants with a capacity of 10-250 kW based on helicopter blades]. Energetika. 1986. No. 12. pp. 3–8. [in Russian]
14. *Vasko V.P., Vasko P.F.* Dinamika nagruzochnykh rezhimov roboty vetroelektricheskoy ustanovki, obuslovlennaya porivami vetra [Dynamics of loading modes of the wind-electric installation, caused by gust of wind] VIsnik Donbaskoi derzhavnoi akademii budivnitstva i arhitekturi. Zb. nauk. prats [Bulletin of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture. Collection of scientific work]. 2001. No. 4 (29). pp. 140–144. [in Ukrainian]
15. *Ronak D.G., Pramod K.* Design and Development of Windmill Operated Water Pump. International Journal of Engineering and Technical Research. 2015. [in English]
16. *Swapnil D.D.* Windmill Water Pumping System. International Journal for Technological Research in Engineering. Vol. 2, Issue 7. ISSN (online): 2347-4718. 2015. [in English]
17. *Dorothy A.* (2004). Water Pumping Windmills. Accessed on 13th August 2013. [in English]
18. *Werner Sölken.* (2013). Introduction to pumps – centrifugal pumps. Retrieved, 2013. URL: http://www.wermac.org/equipment/pumps_centrifugal.html. [in English]
19. *Dedkov V.N.* Primenenie seriynykh nasosov v kachestve gidroturbin dlya maloy energetiki [Application of series pumps as hydroturbines for small power engineering] Problemyi mashinostroeniya [Problems of machine building]. 2011. Volume 14, No. 4. pp. 24–30. [in Russian]
20. *Argaw N., Foster R., and Ellis A.* Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages National Renewable Energy Laboratory, Subcontractor Report No. 500-30361, July 2003, pp. 20–22, 27–31. [in English]
21. *Verbovyi A.P.* Seriini nasosy u skladi malykh hidroakumuliuvalnykh elektrostantsii v yakosti hidromashyn zvorotnoi dii vitroenerhetyky [Series pumps in the form of small hydroaccumulating power plants as wind turbine return motors]. Vidnovliuvana enerhetyka. 2018. No. 3. pp. 46–53. [in Ukrainian]
22. *Sokolov M.M.* Avtomatizirovannyiy elektroprivod obshchepromyshlennykh mekhanizmov [Automated electric drive of common industrial mechanisms] Moscow, Energiya, 1976. 488 p. [in Russian]
23. *Williams A.* Pumps as turbines. A user's guide. Intermediate Technology Publications, London, 1995. [in English].
24. *Stepanov A. I.* Tsentrobezhnyie i osevyie nasosyi [Centrifugal and axial pumps]. Moscow, Mashgiz, 1960. 464 p. [in Russian]
25. *Onischenko G.B., Yunkov M.G.* Elektroprivod turbomekhanizmov [Power Turbo Mechanisms]. Moscow, Energiya, 1972. 240 p. [in Russian]

Стаття надійшла до редакції 03.10.18

Остаточна версія 30.11.18