

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В НАСОСНОМУ РЕЖИМІ ПРИ ЖИВЛЕНІ ВІД ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

А.П. Вербовий, канд. техн. наук

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

По мірі збільшення встановлених потужностей відновлюваних джерел енергії на основі сонячних та вітроелектростанцій – збільшується необхідність у резервних джерелах потужності. До серйозних недоліків відновлюваних джерел енергії, які обмежують їх широке застосування, відносяться невисока щільність енергетичних потоків і їх мінливість у часі. Особливо цей фактор впливає на виробництво електроенергії вітро- і фото електростанціями: графік виробництва енергії має імовірнісний характер. Джерелом маневрової потужності може бути гідроакumuлювальна електростанція. Гідроакumuлювальні електростанції за досить тривалий час зарекомендували себе як відносно прості і надійні станції, що володіють максимальними маневреними можливостями – швидким набором та скиданням навантаження, великим діапазоном регулювання. Розроблена імітаційна модель гідроакumuлювальної електростанції при живленні асинхронного двигуна відцентрового насосу від вітротурбіни з асинхронним генератором. За основу взята відома модель вітротурбіни з асинхронним генератором в складі вітродизельної системи в ізольованій електричній мережі, яка була доповнена асинхронним двигуном, перемикачами, відцентровим насосом, з'єднувальними трубопроводами, резервуарами, сенсорами і приладами для відображення необхідних характеристик. Модель реалізована у сучасному математичному пакеті MATLAB. Визначено основні переваги і недоліки асинхронного генератора. За допомогою створеної моделі були проведені теоретичні дослідження роботи вітротурбіни з асинхронним генератором при застосуванні стохастичної складової швидкості вітру. При цьому було проаналізовано вплив стохастичної складової швидкості вітру на вихідні параметри асинхронного генератора, такі як швидкість, частота, напруга, струм. Також були проведені дослідження асинхронного двигуна з навантаженням від відцентрового насосу в динамічних і квазістатичних режимах роботи. Бібл. 25, рис. 6.

Ключові слова: гідроакumuлювальна електростанція, відцентровий насос, швидкість, частота, напруга, струм.

MODELING THE OPERATION OF A HYDRO-ACCUMULATING POWER PLANT IN THE PUMP MODE AT POWER SUPPLY FROM THE WIND POWER PLANT

A. Verbovij, candidate of technical science

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

As the installed capacity of renewable energy sources on the basis of solar and wind power plants increases, the need for backup power sources increases. The serious disadvantages of renewable energy sources, which limit their widespread use, include the low density of energy flows and their variability over time. In particular, this factor influences the production of electricity by wind and photo power plants: the schedule of energy production is probabilistic. The source of the shunting power may be a pumped hydro electrical station. Hydropower plants for a long time have proven themselves to be relatively simple and reliable with maximum maneuverability - fast dialing and load relief, a large range of regulation. A simulation model of a pumped hydroelectrical station for powering an induction motor of a centrifugal pump from a wind turbine with an induction generator is developed. The known model is a wind turbine with an asynchronous generator in the composition of a wind-driven diesel system in an isolated electrical network, which was supplemented by an induction motor, switches, a centrifugal pump, connecting pipelines, tanks, sensors and devices for displaying the necessary characteristics. The model is implemented in the modern mathematical package MATLAB. The advantages and disadvantages of an induction generator are determined on the basis. With the help of the created model, theoretical studies of the work of a wind turbine with an induction generator were carried out using a stochastic component of wind speed. The influence of the stochastic component of wind speed on the output parameters of an induction generator, such as speed, frequency, voltage, current, are analyzed. Studies of an induction motor with load from a centrifugal pump in dynamic and quasi-static modes were also carried out. Ref. 25, fig. 6.

Keywords: pumped hydroelectrical station, centrifugal pump, speed, frequency, voltage, current.



А.П. Вербовий
A. Verbovij

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

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Спеціальність: "Електропривод та автоматизація промислових установок".

Наукова сфера: перетворення відновлюваних видів енергії, мала гідроенергетика.

Публікації: 129.

ORCID: 0000-0003-2838-6032.

Контакти:

тел./факс: +38-044-206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

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

Education: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Specialty: "Electric drive and automation of industrial installations".

Research area: conversion of renewable energy types, small hydropower.

Publications: 129.

ORCID: 0000-0003-2838-6032.

Contacts:

tel./fax: +38-044-206-28-09

e-mail: hydro@ive.org.ua

Перелік умовних позначень та скорочень:

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВЕС – вітроелектростанція;

ФЕС – фотоелектростанція;

ГАЕС – гідроакмулювальна електростанція;

АГ – асинхронний генератор;

АД – асинхронний двигун;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

N – потужність;

H – напір;

Q – витрата.

Вступ. До серйозних недоліків відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які обмежують їх широке застосування, відносяться невисока щільність енергетичних потоків і їх мінливість у часі [1,2]. Особливо цей фактор впливає на виробництво електроенергії вітро- і фотоелектростанціями (ВЕС, ФЕС): графік виробництва енергії ВЕС та ФЕС має імовірнісний характер і не збігається з графіком споживання енергії в електроенергетичній системі; процес виробництва енергії ВЕС та ФЕС характеризується нестабільністю параметрів електроенергії, зумовленою пульсаціями швидкості вітру і зміною інтенсивності сонячного випромінювання [3,4]. Необхідні технології, здатні тимчасово акумулювати надлишки "зеленої електрики" і тим самим вирівнювати подібні коливання. Найбільш апробованим способом накопичення електроенергії є гідроакмулюючі електростанції (ГАЕС) [5]. В години пікових навантажень воду застосовують для виробництва електроенергії, що віддається в мережу, а при падінні навантаження вона накопичується в водосховище [6,7]. Устаткування ГАЕС досить надійно, а для малих електростанцій не потрібно постійного обслуговування і спостереження, процеси їх управління легко піддаються автоматизації. Тому кілька малих ГАЕС можуть експлуатуватися без постійної присутності персоналу, а їх обслуговування зводиться до періодичних профілактичних оглядів.

В даний час в світі при будівництві сучасних ГАЕС застосовується гідроагрегати зворотної дії, при якій насос працює як в насосному, так і турбінному режимах, а двигун насосу в генераторному. На малих ГАЕС в якості гідромашин зворотної дії можуть встановлюватися серійні насоси замість турбін, так як вони покривають широ-

кий діапазон по напорам (10 – 100 м) і витратам (0.01 – 10 м³/с). Особливість використання насосу в якості турбіни полягає в тому, що при однаковому числі обертів витрата насосу становить тільки частину витрати, отриманої при роботі його в якості турбіни, якщо подоланий насосом напір рівний напору турбіни [9,10]. Дослідження можливості використання насосів у якості турбін для генерування енергії проводилися в 90-х роках в Німеччині [11], Англії [12], Ірані [13], Індії [14] та інших країнах. Зростання останнім часом кількість публікацій про проведення досліджень з даної тематики в Англії, США, а також про застосування в країнах, що розвиваються підтверджує необхідність і перспективність використання насосів у малій гідроенергетиці.

На сучасних ВЕС в основному застосовуються генератори змінного струму такі, як синхронні і асинхронні [15]. Стаття присвячена дослідженню роботи ГАЕС в насосному режимі при живленні від ВЕС з асинхронним генератором (АГ).

Основні переваги і недоліки асинхронного генератора. АГ відрізняються простотою експлуатації та обслуговування, легко включаються на паралельну роботу, а форма кривої вихідної напруги у них ближче до синусоїдальної, ніж у синхронного генератора (СГ) при роботі на одне і те ж навантаження. Крім того, маса АГ потужністю 5 – 100 кВт приблизно в 1,3 – 1,5 рази менше маси СГ такої ж потужності [16]. При цьому в конструктивному відношенні вони нічим не відрізняються від звичайних асинхронних двигунів і їх серійне виробництво можливо на електромашинобудівних заводах, що випускають асинхронні машини.

Клір-фактор, або коефіцієнт гармонік, кількісно характеризує наявність вищих гармонік в

вихідній напрузі генератора. Вищі гармоніки викликають лише даремний нагрів і нерівномірність обертання електромашини, нестійкість в роботі електронних приладів з імпульсно-фазовим керуванням і т.п. Стандарти допускають величину клір-фактора не більше 15%, що нерідко спостерігається в синхронних генераторах. Клір-фактор АГ не перевищує 2%. АГ практично виробляє тільки корисну електроенергію без шкідливих складових [17].

Один з недоліків АГ – це те, що вони є споживачами значної реактивної потужності (50% і більше від повної потужності), необхідної для створення магнітного поля в машині, яка повинна надходити з мережі при паралельній роботі асинхронного двигуна в генераторному режимі з мережею або від іншого джерела реактивної потужності (батареї конденсаторів (БК) або синхронного компенсатора (СК)) при автономній роботі АГ. Для поліпшення експлуатаційних властивостей асинхронного режиму генератора в ланцюг статора додатково можуть включатися конденсатори послідовно або паралельно з навантаженням. У всіх випадках автономної роботи асинхронного двигуна в генераторному режимі джерела реактивної потужності (БК або СК) повинні забезпечувати реактивну потужність як АГ, так і навантаження, що має, як правило, реактивну (індуктивну) складову ($\cos\varphi_n < 1$). В такому випадку маса і розміри БК або СК можуть перевершувати масу АГ.

Імітаційна модель ГАЕС в насосному режимі роботи при живленні від ВЕС з АГ. Впровадження в практику більш досконалих методів розрахунку і проектування, заснованих на максимально повному врахуванні реальних параметрів всієї вітро- та гідромеханічної системи, дозволяють отримати розрахункові технічні характеристики і параметри створюваного об'єкта при необхідних навантаженнях і передбачуваних умовах експлуатації.

Для дослідження роботи моделі ГАЕС в насосному режимі при живленні від ВЕС з АГ доцільно її реалізувати в сучасних математичних програмних пакетах. При цьому значно скорочуються витрати на проведення безпосереднього чисельного 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, який найбільш широко використовується при проведенні різного роду

розрахунків та досліджень є математичний пакет MATLAB [18,19].

Для моделювання роботи ГАЕС в насосному режимі при живленні від ВЕС візьмемо за основу імітаційну модель, яка представлена в [20], де досліджується вітротурбіна з асинхронним генератором в складі вітродизельної системи в ізолюваній електричній мережі. До складу моделі входять вітротурбіна з асинхронним генератором, повна потужність якого складає 275 кВт, а також вітродизельна система з синхронною машиною потужністю 300 кВт. При низькій швидкості вітру АГ і дизельний синхронний генератор (СГ) працюють паралельно для подачі необхідної напруги на навантаження. Коли енергія вітру перевищує потужність навантаження, дизельний генератор вимикається, і синхронна машина працює як синхронний компенсатор. В даній моделі робота дизель-генератора не моделюється. Навантаження складається з основного – потужністю 50 кВт, додаткового – 25 кВт і вторинного. Вторинний блок навантаження використовується для регулювання частоти всієї системи шляхом поглинання надлишкової енергії вітру, коли вона перевищує попит споживачів. Величина навантаження може змінюватися від 0 до 446,25 кВт з кроком в 1,75 кВт як в одну, так і в іншу сторону.

Для вирівнювання частоти мережі застосований регулятор, який використовує стандартну систему автоматичного підстроювання. Вимірjana частота порівнюється з заданою для отримання похибки відхилення по частоті. Ця похибка інтегрується для отримання фазової похибки, яка потім використовується пропорційно-диференціальним (PID) контролером для отримання вихідного сигналу, який представляє собою необхідну кількісну величину потужності вторинного навантаження. Цей сигнал керує перемиканням восьми трифазних резисторів вторинного навантаження. З метою мінімізації коливань напруги перемикання виконується при перетині синусоїди напруги нульової позначки.

Модель [20] була доповнена блоками асинхронного двигуна АД (тип 4А200М4У3, $P_{\text{пАД}} = 37$ кВт, $n_{\text{пот}} = 1474$ об/хв), відцентрового насоса (тип СМ150–125–315–4, номінальна подача – 200 м³/год, напір – 32 м), двох резервуарів, з'єднувальних трубопроводів і вимірювальних приладів (рис. 1) [21]. Номінальні данні напруги і частоти були приведені до стандартних величин, тобто $U_{\text{л}} = 380$ В і $f_1 = 50$ Гц. Номінальні потужності не змінювались. АД представляє собою активно-індуктивне навантаження і при під'єднанні його до клем збудженого АГ споживана

генератором реактивна потужність зміниться. Це явище необхідно врахувати та компенсувати реактивну потужність АД збільшенням ємності збудження по формулі [22]

$$C = \frac{P_{nAD}(tg\varphi_{AD})}{\pi f_1 U_n^2}, \quad (1)$$

де P_{nAD} – номінальна потужність АД; φ_{AD} – кут зсуву між напругою і струмом; f_1 – частота мережі; U_n – лінійна напруга. Додаткова ємність приєднана до клем АД і підключається до мережі

одночасно з двигуном.

Робота і дослідження моделі проводилось за наступним алгоритмом при допущенні, що кут повороту лопаті приймаємо постійним і рівним $\beta = 1$: в початковий момент сигнал стохастичної складової швидкості вітру надходить на блок вітоторурбіни, з якої сигнал обертового моменту подається на АГ, вихідна напруга генератора надходить на навантаження; на 10 с відключається додаткове навантаження, а на 12 с до мережі підключається АД, який обертає відцентровий насос, для перекачування води з нижнього резервуару до верхнього.

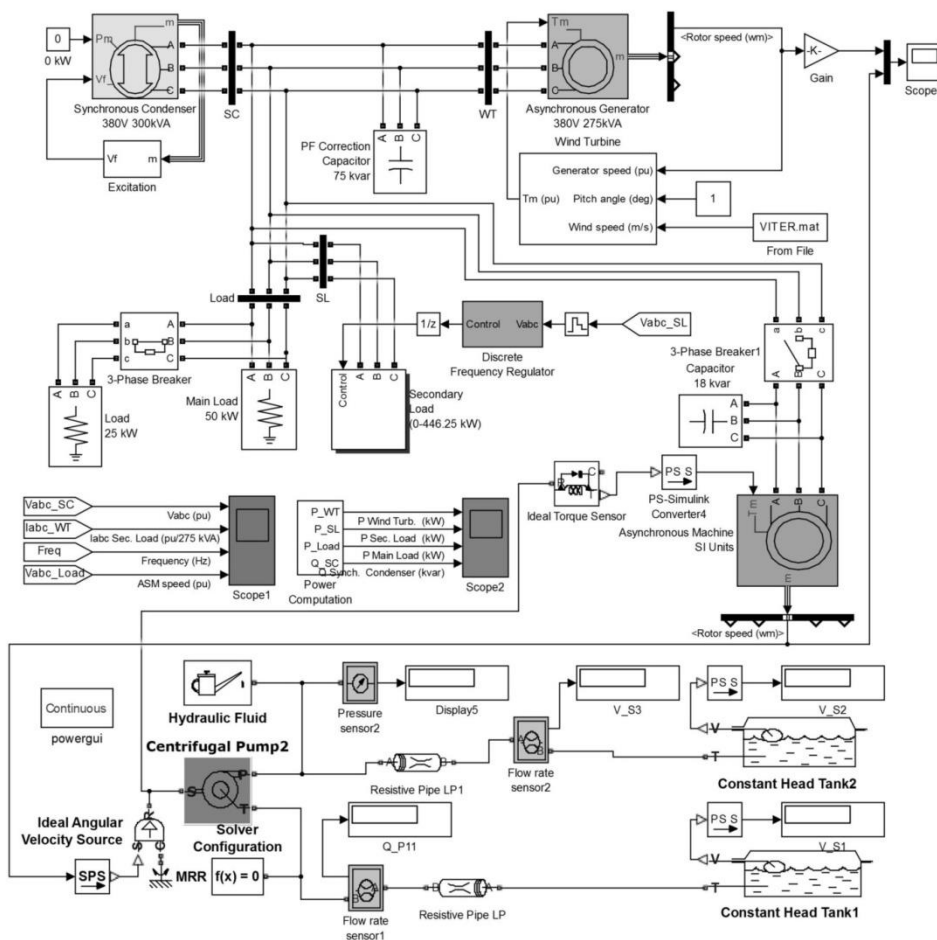


Рис. 1. Схема моделі ГАЕС в насосному режимі роботи при живленні від ВЕС з АГ.

Fig. 1. The scheme of the model of the PHES in the pumping mode of operation at power supply from the WPP with the AG.

Результати моделювання ГАЕС в насосному режимі роботи при живленні від ВЕС з АГ. На рис. 2 зображені графіки частоти. При застосуванні стохастичної складової швидкості вітру (рис. 3) [23] спостерігаються коливання частоти, які найбільші в моменти комутації та знаходяться в межах 0.42-0.73 Гц. Також при значних поривах вітру більше ≥ 2 м/с частота також коливається в порівнянні з усталеними режимами, але за допомогою

регулятора автоматичного підстроювання частота повертається до значень, близьких номінальним.

На рис. 4 зображенні графіки швидкості АГ і АД. Швидкість генератора має також коливальний характер і змінюється в межах від 158 до 162 рад/с. Швидкість АД змінюється тільки в момент пуску, тобто в динамічному режимі. В квазістатичному режимі вона практично не відхиляється від номінальної [24].

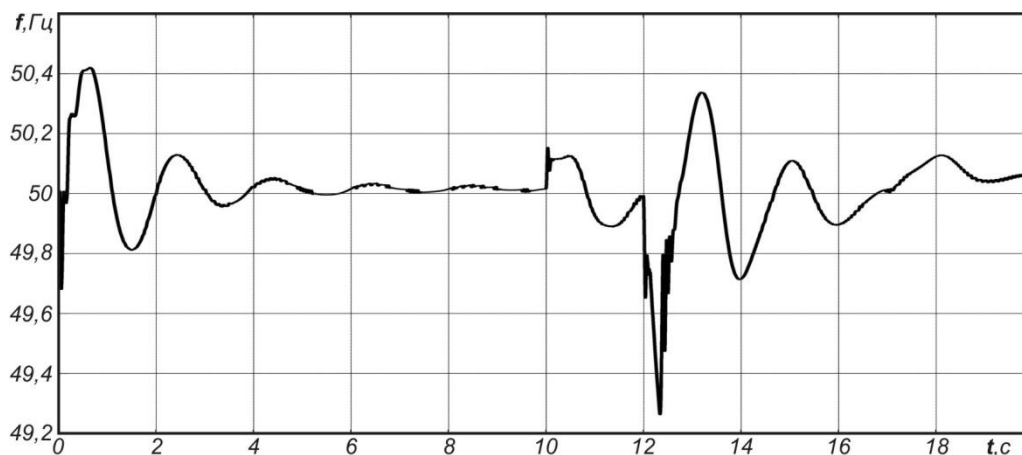


Рис. 2. Графік частоти вихідної напруги АГ.

Fig. 2. Graph of the frequency of the output voltage AG.

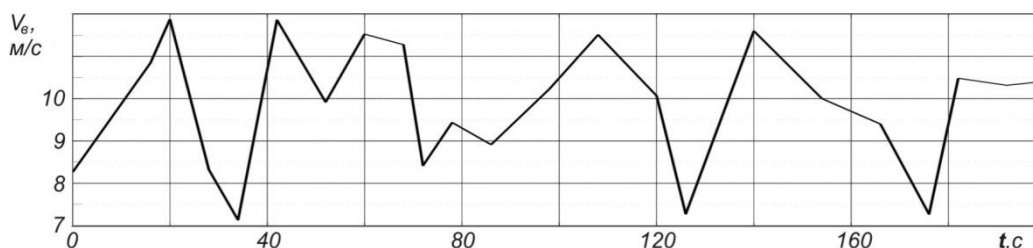


Рис. 3. Стохастична складова швидкості вітру.

Fig. 3. Stochastic component of wind speed.

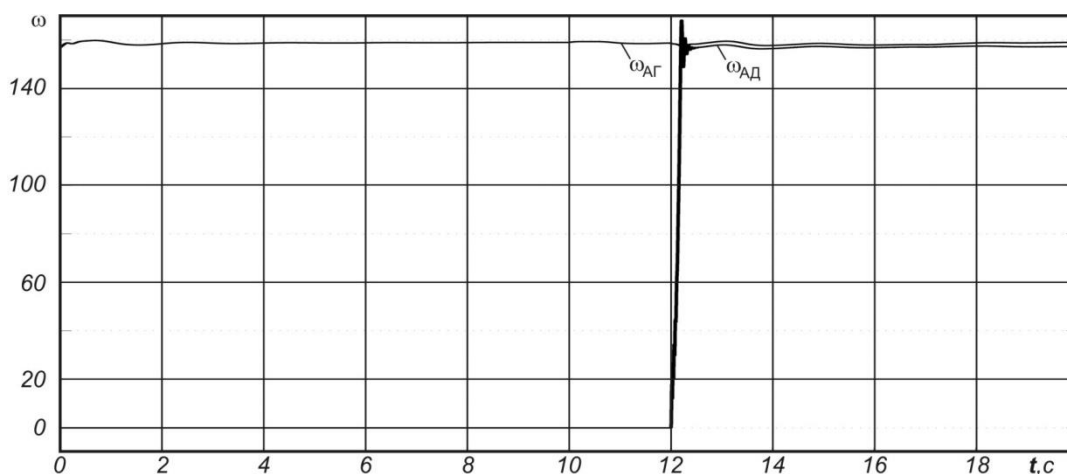


Рис. 4. Швидкість АГ і АД.

Fig. 4. Speed AG and AM.

Графік вихідної напруги рис. 5 має вигляд синусоїди, дійсне значення якого складає 380 В. На всьому проміжку моделювання відбуваються коливання напруги, які не перевищують 5 В [25]. При від'єднанні додаткового навантаження і під-

ключенні АД спостерігається падіння напруги до 360 В, а потім її зростання до 400 В внаслідок виникнення перехідного режиму. Після зростання швидкості АД до номінальної напруга наближається до номінального значення.

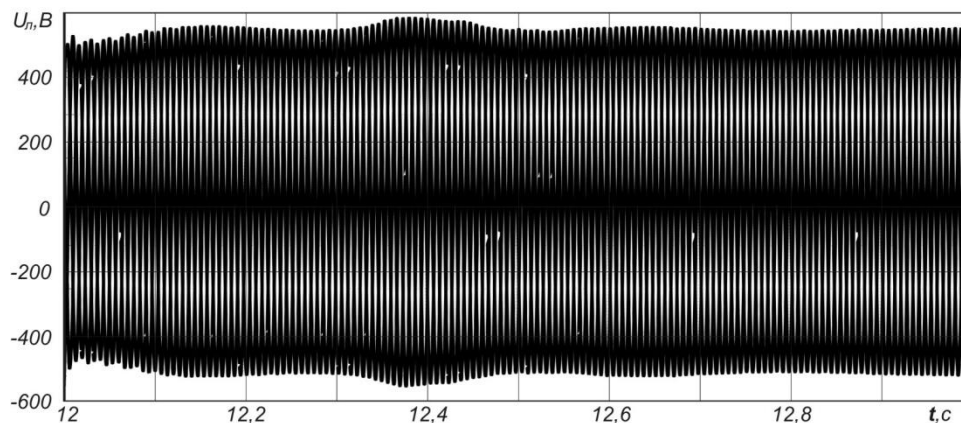


Рис. 5. Графік вихідної напруги АГ.

Fig. 5. Graph of output voltage AG.

Зовсім по іншому виглядає характер зміни струму АГ (рис. 6), який має мінливий характер і залежить від навантаження і швидкості генератора, в свою чергу швидкість генератора залежить від швидкості вітрогенератора, яка в свою чергу залежить від поривів вітру. В початковий момент і в моменти комутації спостерігаються кидки струму АГ. Він приблизно у два рази більший від номінального значення і складає 360 і 192 А відповідно. При поривах вітру більше

2 м/с струм АГ може значно збільшуватися, або зменшуватися від номінальних значень. При поривах вітру менших 2 м/с відхилення значень струму мінімальні, які наближаються до номінальних значень. Для порівняння були проведені дослідження при постійному сигналі швидкості вітру $v_s = 10$ м/с. В цьому випадку збільшення значень струму відбувається тільки в моменти комутації, а в усталеному режимі дійсне значення струму постійне.

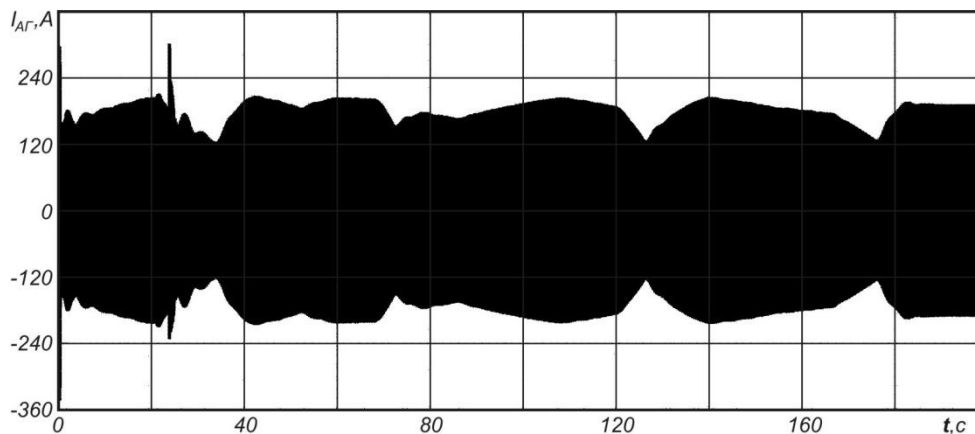


Рис. 6. Графік струму статора АГ.

Fig. 6. AG stator current graph.

Струми статора і ротора АД не відрізняються від таких, як і при живленні від потужної мережі. Тобто в усталеному режимі вони номінальні, а в пусковому режимі досягають 5–7 кратних значень. Це відбувається внаслідок того, що при живленні від АГ вітрогенератора АД розвиває практично повну потужність і номінальну швидкість. В цьому випадку відцентровий насос працює з максимальними коефіцієнтом корисної дії, подачею і напором.

Висновки. В роботі доведено, що стохастична складова швидкості вітру суттєво впливає на частоту обертання та механічний момент генера-

тора, що зумовлює зміну вихідних електричних параметрів. Імітаційна модель з урахуванням збурень швидкості вітру дозволяє досліджувати поведінку ВЕУ з АГ для живлення АД з навантаженням від відцентрового насоса, як в стаціонарних, перехідних, так і в аварійних режимах роботи. Перехідні процеси в досліджуваній системі цілком задовільні з точки зору стійкості, швидкодії, рівня і періоду коливань. Для стабілізації струму генератора модель вітрогенератора необхідно доповнити зворотнім зв'язком по швидкості для регулювання кута повороту лопатей.

1. *Холодов Д.В., Обухов Е.В., Степанов В.Н., Полнарев С.Я.* Нетрадиционные стратегии в освоении природных энергоресурсов приморских регионов Украины. О. Астропринт. 2003. 162 с.
2. *Кривцов В.С., Алейников А.М., Яковлев А.И.* Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектростанции. Учебник. Харьков. Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». Севастополь. Севаст. нац. техн. ун-т. 2003. 400 с.
3. *Barnhart J.Ch., Dale M., Brandtb A.R., Benson S.M.* The energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity. *Energy Environ. Sci.* 2013. № 6. Pp. 2804-2810.
4. *Харитонов В.П.* Автономные ветроэлектрические установки. М. 2006. 280 с.
5. *Vasko P., Verbovij A., Moroz A., Pazych S., Ibragimova M., Sahno L.* Concept of Accumulation of Energy from Photovoltaic and Wind Power Plants by Means of Seawater Pumped Hydroelectric Energy Storage. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine. 2019. Pp. 188-191. doi: 10.1109/ESS.2019.8764167.
6. *Серебряников Н.И., Родионов В.Г., Кулешов А.П., Магрук В.И., Иванущенко В.С.* Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС. М. Издательство НЦ ЭНАС. 2000. 368 с. ISBN 5-93196-024-4.
7. *Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г.* Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. М. Издательство НЦ ЭНАС. 2008. 352 с. ISBN 978-593196-917-6.
8. *Schnitzer V.* Pumpenantriebe mit regenerativer Energie; ihre besondere Anforderungen an Pumpen. *Pumpentagung Karlsruhe'92. Fachgemeinschaft Pumpen im VDMA*. Frankfurt/Main. Oktober. 1992. Beitrag A5-11.
9. Pumps as turbines for hydraulic energy recovery and small hydropower purposes in Poland. 2008. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/269992946> (дата звернення: 12.09.2019).
10. *Baumgarten S., Guder. W.* Pumpen als Turbinen. S. Baumgarten. KSB Pump company. *Technik kompakt*. July 2005. № 11. Pp. 2-9.
11. *Williams A.A.* The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods. *Proc. IMech. Part A*. 1994. Vol. 208. Pp. 59-66.
12. *Nourbakhsh A., Derakhshan S.* Mini and Micro Hydropower Stations for Production Inexpensive Energy. *HIDROENERGIA 2008-05-04. Intern. Conf. and Exhibition. SMALL HYDROPOWER*. Bled-Slovenia. 11-13 June 2008.
13. *Singh P., Ramasubramanian V., Rao A.* Performance Evaluation of the Pump as Turbine based Micro Hydro Project in Kinko Village. Tanzania. P. Singh. *Himalayan Small Hydropower Summit*. Dehradun. India. October 12-13. 2006. Pp. 159-166.
14. *Maher P., Smith N.A., Williams A.A.* Assessment of pico hydro as an option for off-grid electrification in Kenya. *Renewable Energy*. 2003. Vol. 28. Pp. 1357-1369.
15. *Фатеев Е.М.* Ветро двигатели и ветроустановки. М. Гос. изд. сельхоз. лит. 1957. 536 с.
16. *Вольдек А.И.* Электрические машины. 2-е изд. Л. Энергия. 1974. 840 с.
17. *Васько П.Ф., Головки В.М., Вербовий А.П.* Вищі гармонійні складові напруги і струму асинхронного генератора с короткозамкнутою обмоткою ротора у складі малих вітро- та гідроелектричних установок. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 4(47). С. 63-67.
18. *Черных И.В.* SIMULINK: среда создания инженерных приложений. М. ДИАЛОГ МИФИ. 2004. 496 с.
19. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6/6.1/6.5 + SIMULINK 4/5 в математике и моделировании. М. Солон-Пресс. 2003. 768 с.
20. *Gagnon R., Saulnier B., Sybille G., Giroux P.* Modeling of a Generic High-Penetration No-Storage Wind-Diesel System Using Matlab/Power System Blockset. *Global Windpower Conference*. April 2002. Paris. France.
21. *Вербовий А.П.* Структурна схема імітаційної моделі автономної гідроаккумуляційної електростанції. *Матеріали 20 міжнародної наук.-практ. конференції «Відновлювана енергетика і енергоефективність у 21 столітті»*. 15-16 травня 2019 р. Київ. С. 506-510.
22. *Лежнюк П.Д., Никиторович Р.В., Нгома Ж.-П.* Компенсация реактивной мощности асинхронных генераторов на малых гидроэлектростанциях. *Энергетика и электротехника. Научные работы. ВНТУ*. 2008. № 2. С.1-7.
23. *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.
24. *Вербовий А.П., Пазич С.Т.* Моделювання динамічних і квазістатичних режимів роботи вітроводонасотної установки з урахуванням стохастичної складової швидкості вітру. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 4(55). С. 25-33.
25. *Брыль А.О., Васько В.П., Васько П.Ф., Соловйов П.Б.* Математическое моделирование пусковых режимов синхронных и асинхронных генераторов малых ГЭС. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2014. № 15. С.71-81.

REFERENCE

source]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/269992946>. (Applying date: 12.09.2019). [in English].

10. Baumgarten S., Guder W. Pumpen als Turbinen.. KSB Pump company. Technik kompakt. July 2005. No. 11. Pp. 2-9. [in English].

11. Williams A.A. The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods. Proc. IMech. Part A. 1994. Vol. 208. Pp. 59-66. [in English].

12. Nourbakhsh A., Derakhshan S. Mini and Micro Hydropower Stations for Production Inexpensive Energy. HIDROENERGIA 2008-05-04. Intern. Conf. and Exhibition. SMALL HYDROPOWER. Bled–Slovenia. 11-13 June 2008. [in English].

13. Singh P., Ramasubramanian V., Rao A. Performance Evaluation of the Pump as Turbine based Micro Hydro Project in Kinko Village. Tanzania. P. Singh. Himalayan Small Hydropower Summit. Dehradun. India. October 12-13. 2006. Pp. 159-166. [in English].

14. Maher P., Smith N.A., Williams A.A. Assessment of pico hydro as an option for off-grid electrification in Kenya. Renewable Energy. 2003. Vol. 28. Pp. 1357-1369. [in English].

15. Fateev E.M. Vetrodovigateli i vetroustanovki. [Wind turbines and wind installations]. M. State publ. of agric. lit. 1957. 536 p. [in Russian].

16. Voldek A.I. Elektricheskie mashiny. [Electric machines]. 2 edition. L. Energy. 1974. 840 p. [in Russian].

17. Vasko P., Holovko V., Verbovij A. Vyshchi harmoniini skladovi napruhy i strumu asinhronnoho heneratora s korotkozamknenoiu obmotkoiu rotora u skladi malykh vitro- ta hidroelektrychnykh ustanovok. [Analysis of power quality at the output of the asynchronous generator with short-circuited in different operating modes in the small wind and hydroelectric installations on the experimental data]. Vidnovluvana energetika. 2016. No. 4(47). Pp. 63-67. [in Ukraine].

18. Chernyih, I.V. SIMULINK – Sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy. [Environment for creating engineering applications]. Moscow. Dialog MIFI. 2004. 496 p. [in Russian].

19. 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].

20. Gagnon R., Saulnier B., Sybille G., Giroux P. Modeling of a Generic High–Penetration No–Storage Wind–Diesel System Using Matlab/Power System Blockset. Global Windpower Conference. April 2002. Paris. France. [in English].

21. Verbovij A. Strukturna skhema imitatsiinoi modeli avtonomnoi hidroakumulivualnoi elektrostantsii. [Structural diagram of a simulation model of an autonomous pumped hydro electric station]. Proceedings of the 20th International Science – Practical Conference «Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century». 2019. Kyiv. Pp. 506-510. [in Ukraine].

22. Lezhnyuk P.D., Nikitorovich R.V., Ngoma Zh.–P. Kompensaciya reaktivnoj moshnosti asinhronnyh generatorov na malyh gidroelektrostanciyah. [Compensation of the reactive power of asynchronous generators at small hydroelectric power stations]. Power engineering and electrical engineering. Scientific works. VNTU. 2008. No. 2. Pp.1-7. [in Russian].

23. Vasko P., Verbovij A., Pazych S. Realizaciya stohastichnoyi modeli pozdovzhnoyi skladovoyi shvidkosti vitru dlya zadach vitroenergetiki. [Implementation of a stochastic model of the longitudinal component of wind speed for wind power problems]. Vidnovluvana energetika. 2017. No. 3. Pp. 54-61. [in Ukraine].

24. Verbovij A., Pazych S. Modelyuvannya dinamichnih i kvazistatichnih rezhimiv roboti vitrovodonasosnoyi ustanovki z

urahuvannyam stohastichnoyi skladovoyi shvidkosti vitru. [Modeling of dynamic and quasi-static modes of operation of a wind-pumping installation taking into account stochastic component of wind speed]. Vidnovluvana energetika. 2018. No. 4(55). Pp. 25-33. [in Ukraine].

25. Bryl A., Vasko V., Vasko P., Solovjov P. Matematicheskoe modelirovanie puskovyh rezhimov sinhronnyh i asinhronnyh generatorov malyh GES. [Mathematical modeling of starting modes of synchronous and asynchronous generators of small hydropower plants]. Alternative energy and ecology (ISJAE). 2014. No. 15. Pp.71-81. [in Russian].

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГІДРОАККУМУЛІРУЮЩОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В НАСОСНОМ РЕЖИМІ ПРИ ПИТАННІЙ ОД ВЕТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ С АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

А.П. Вербовой, канд. техн. наук.

Інститут возобновляемой энергетики НАН України
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Киев.

По мере увеличения установленных мощностей возобновляемых источников энергии на основе солнечных и ветроэлектростанций - увеличивается необходимость в резервных источниках мощности. Использование возобновляемых источников энергии не делают серьезного негативного влияния на окружающую среду, в большинстве своем они являются экологически чистыми и доступными источниками энергии. К серьезным недостаткам возобновляемых источников энергии, которые ограничивают их широкое применение, относятся невысокая плотность энергетических потоков и их изменчивость во времени. Особенно этот фактор влияет на производство электроэнергии ветро- и фотоэлектростанциями: график производства энергии имеет вероятностный характер. Источником маневровой мощности может быть гидроаккумулирующая электростанция. Гидроаккумулирующие электростанции за довольно длительное время зарекомендовали себя как относительно простые и надежные станции, обладающих максимальным маневренными возможностями - быстрым набором и сбросом нагрузки, большим диапазоном регулирования. Разработанная имитационная модель гидроаккумулирующей электростанции при питании асинхронного двигателя центробежного насоса от ветротурбины с асинхронным генератором. За основу взята известная модель ветротурбина с асинхронным генератором в составе ветродизельной системы в изолированной электрической сети, которая была дополнена асинхронным двигателем, переключателями, центробежным насосом, соединительными трубопроводами, резервуарами, сенсорами и приборами для отображения необходимых характеристик. Модель реализована в современном прикладном, математическом пакете MATLAB. Определены основные преимущества и недостатки асинхронного генератора. С помощью созданной модели были проведены теоретические исследования работы ветротурбины с асинхронным генератором при применении стохастической составляющей скорости ветра. Проанализировано влияние стохастической составляющей скорости ветра на выходные параметры асинхронного генератора, такие как скорость, частота, напряжение, ток. Также были проведены исследования асинхронного двигателя с нагрузкой от центробежного насоса в динамических и квазистатических режимах работы. Библ. 25, рис. 6.

Ключевые слова: гидроаккумулирующая электростанция, центробежный насос, скорость, частота, напряжение, ток.

Стаття надійшла до редакції 30.10.19

Остаточна версія 20.12.19