

АВТОНОМНА ГІДРОАКУМУЛЮЮЧА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ

В. М. Головка, доктор технічних наук, професор

Р. Ю. Семененко, студент магістратури

Національний технічний університет України "КПІ ім. Ігоря Сікорського"

E-mail: golovkovm@ukr.net, semenenko.roman@iit.kpi.ua

Анотація. Одним із можливих шляхів вирішення задачі акумулювання енергії відновлювального джерела в автономній електроенергетичній системі є її акумулювання у вигляді потенційної енергії води з подальшим використанням за заданим графіком споживання. Гідроакumuлююча електростанція в комбінації з фотоелектричною установкою дозволяє заощаджувати енергію від непостійних джерел (таких як сонячна енергія, енергія вітру) та інших відновлюваних джерел енергії, або від постійних джерел на основі мінеральних видів палива (таких як вугілля чи атомна енергія) протягом періодів попиту.

У роботі наведені результати розроблення математичної моделі автономної гідроакumuлюючої електростанції в програмному пакеті Matlab/Simulink та описані основні її елементи, що дозволяє визначити динаміку зміни енергетичних показників та водневих балансів у водосховищах установки впродовж доби для заданої пори року. Модель створена з метою дослідження параметрів та характеристик вузлів автономної гідроакumuлюючої установки. У результаті аналізу її роботи на моделі встановлено, що рівень забезпеченості споживача електроенергією впродовж доби становить 100 %. Різниця в часі між виробленою та спожитою електроенергією повністю компенсується гідроакumuлюючою установкою та наприкінці дня літнього періоду має приріст у рівні води близько 0,2 %. Розраховано водний баланс у верхньому та нижньому водосховищах та отримано динаміка зміни рівня води впродовж доби різних сезонів.

Ключові слова: автономна гідроакumuлююча установка, гідравлічний таран, фотоелектростанція

Актуальність. У сучасній фото- та вітроенергетиці через стохастичність та нестабільність добового надходження енергії важливою задачею є акумулювання електроенергії та її зберігання [1]. Ефективність і надійність електропостачання досягається за рахунок застосування акумулюючих установок, що перетворюють енергію відновлюваних джерел, наприклад, у потенційну енергію води шляхом підйому її електроприводними насосами до баку-акумулятора, з подальшим використанням за заданим графіком споживання [2]. Застосування саме

гідроакумуючої електростанції обмовлено відносно невеликою вартістю її технології та помірними ризиками за наявності відповідних топографічних і гідрологічних умов.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як правило, сучасні системи акумулювання для компенсації провалів генерації енергії об'єктами відновлюваної енергетики та забезпечення безперебійного електрозабезпечення споживача використовують хімічні акумулятори або гідроакумуючі електростанції (ГАЕС) [3]. При врахуванні питомої вартості інвестицій технологія ГАЕС є найбільш ефективним регулятором для автономної енергосистеми [4]. ГАЕС, у комбінації з фотоелектричною установкою, дозволяє заощаджувати енергію від непостійних джерел (таких як сонячна енергія, енергія вітру) та інших відновлюваних джерел енергії, або від постійних джерел на основі мінеральних видів палива (таких як вугілля чи атомна енергія) протягом періодів підвищеного попиту. Резервуари, що використовуються в установках із замкнутим циклом використання води, досить малі порівняно із звичайними гідроелектростанціями аналогічної потужності. Крім того, періоди генерації електроенергії можливі цілодобово.

Мета дослідження – розроблення математичної моделі автономної гідроакумуючої електростанції шляхом структурного імітаційного моделювання та визначення характеру протікання динамічних процесів у ній.

Матеріали та методи дослідження. Методи дослідження – математичне моделювання процесів перетікання енергії між вузлами гідроакумуючої установки за допомогою програми MATLAB/SIMULINK.

Автономна гідроакумуюча електростанція складається з верхнього резервуару, живильної труби гідротурбіни, гідротурбіни, електричного генератора, споживача, гідравлічного тарану, нагнітальної труби (труби подачі), нижнього резервуара, насосної станції, насосної труби та фотоелектростанції. Блок-схема автономної гідроакумуючої станції наведена на рис. 1.

Верхній резервуар використовується для накопичування потенційної енергії води, яку туди подають насоси та гідравлічний таран. Вода через живильну трубу потрапляє на лопатки гідротурбіни та обертає їх. Турбіна передає крутний момент

на вал генератора з подальшим перетворенням механічної енергії в електричну. Після турбіни встановлено гідравлічний таран, який перекачує частину води назад до верхнього резервуару через трубу подачі, а залишки води скидає до нижнього резервуару. Фотоелектростанція генерує електричний струм для живлення насосної станції, яка закачує воду до верхнього резервуару.

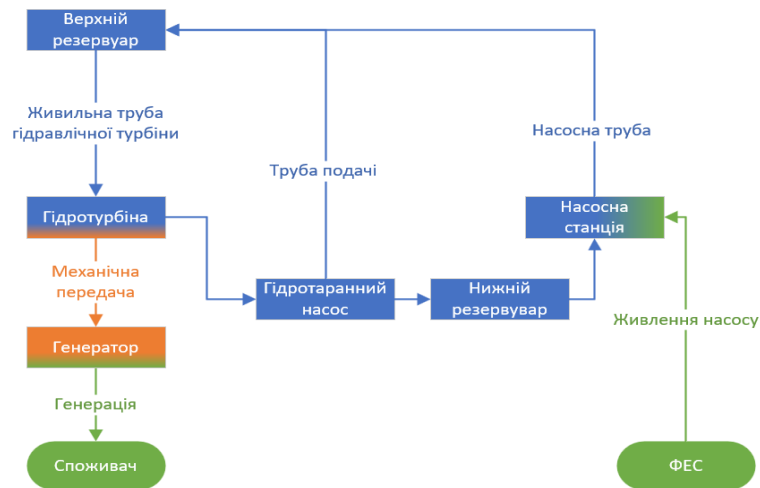


Рис. 1. Блок-схема автономної гідроакumuлюючої станції

Для імітації процесів перетворення енергії та перетікання води між резервуарами в системі автономної гідроакumuлюючої станції розроблена модель, що містить наступні елементи:

- джерело значень поточної інсоляції – сигнал, що генерує, відповідне значення миттєвої інсоляції на фотомодулі;
- модель фотоелектричної станції (ФЕС), що на основі інформації про інсоляцію розраховує генеровану електричну потужність;
- модель насосної станції, що приймає на вхід значення генерованої електричної потужності ФЕС;
- модель турбіно-генераторного блоку, який в залежності від споживання електроенергії витрачає воду із бака-акumuлятора;
- джерело значень поточного споживання, сигнал, що генерує, відповідне значення миттєвого споживання;
- модель споживача електричної енергії, що генерує поточне значення електричної потужності, яке віддається у навантаження;

- модель гідравлічного тарану, що споживає воду на виході із гідротурбіни, підіймає частину води до бака-акумулятора, а решту води скидає до нижнього резервуару.

Усі зв'язки моделі представлено у вигляді перетікання електричної енергії та води між елементами системи.

Модель споживання електричної енергії забезпечує два способи видачі сигналу: за допомогою безпосередньо графіка споживання та за допомогою внесення ймовірнісних параметрів для генерації випадкових зовнішніх впливів, що змінюють графік споживання. Блок-схему моделі споживача електричної енергії наведено на рис. 2.

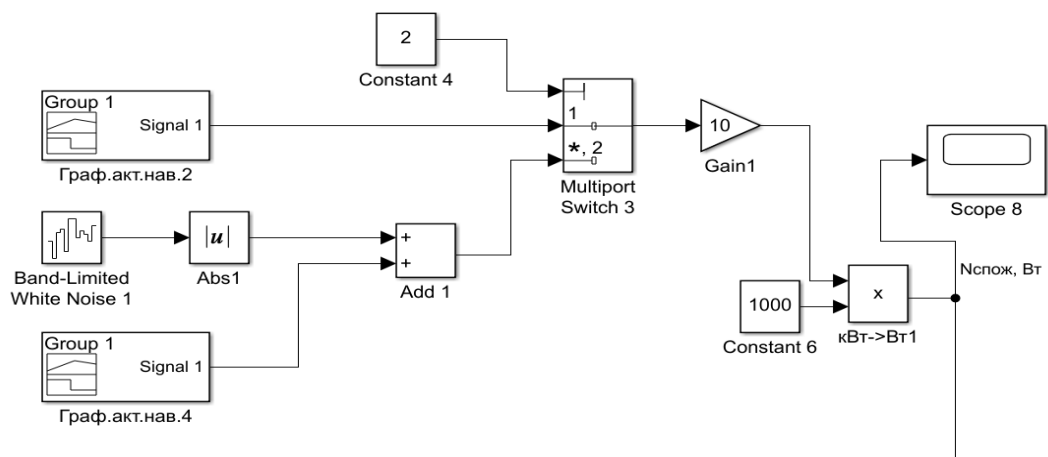


Рис. 2. Модель споживача електричної енергії

Загальний графік споживання задано за допомогою блоку Signal builder, до якого занесено відомості про навантаження споживача. За допомогою блоку Band-Limited White Noise генеруються випадкові величини відповідно до нормального закону розподілу, модуль яких потім сумується із значеннями Signal 1 графіку активного навантаження. Ця модель генерує сигнал про споживання із врахуванням ймовірнісної складової.

У ролі блока фотоелектростанції використовується імітаційно кероване джерело потужності. Управління цим елементом описується такою залежністю:

$$P_{pv}(t) = \eta \cdot S \cdot I(t), \quad (1)$$

де P_{pv} – потужність, яку виробляють фотомодулі, кВт; η – ККД сонячних модулів; S – сумарна площа сонячних модулів, м²; I – сумарна інсоляція що надходить на похилу поверхню, кВт/м²; t – час доби, год.

Дані про величину надходження сумарної сонячної інсоляції впродовж доби $I(t)$ на поверхню фотомодулів для різних сезонів року занесені в таблицю .excel та зчитуються блоком Signal builder у вигляді 4 сигналів Imported_signal_1...4. Після перемикача за допомогою блока Multiply підраховується значення функції 1 та виводиться Scope 7 на графік.

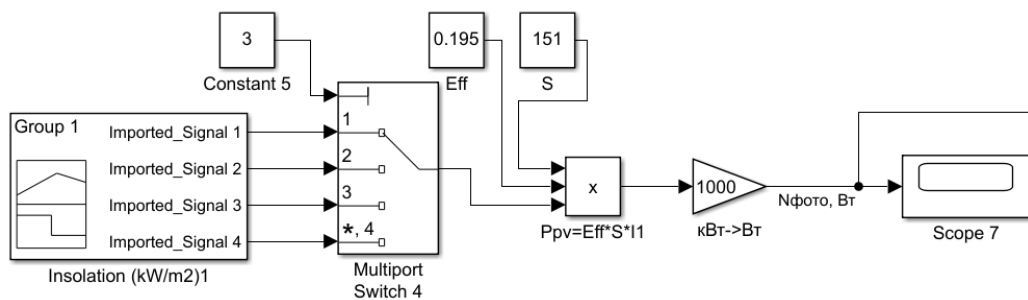


Рис. 3. Блок-схема фотоелектростанції

Вихідними даними для моделювання водосховища є початковий об'єм води в ньому. Розрахунок об'єму води у водосховищі відбувається за такою залежністю:

$$V(t) = V_{\text{поч}} \pm \int Q_{\text{вб}} dt, \quad (2)$$

де $V_{\text{поч}}$ – початковий об'єм водосховища, м³; $Q_{\text{вб}}$ – витрата води бака-акумулятора, м³/с.

$Q_{\text{вб}}$ може приймати як додатні значення за умови подавання води в бак насосною станцією, так і від'ємні значення, коли вода споживається турбіною.

При моделюванні верхнього водосховища автономної гідроакумуючої електростанції необхідно скласти баланс витрати води у верхньому б'єфі та також провести розрахунок відмітки верхнього б'єфу за морфометричними характеристиками резервуара. Об'єм води від насоса $Q_{\text{нас}}$ та гідравлічного тарану $Q_{\text{гт}}$ подачі надходить до верхнього резервуара, об'єм води $Q_{\text{турб}}$ подається на гідротурбіну. Блоком «різниця» вираховується поточний водний небаланс, а блоком integrator 1/s здійснюється інтегрування цієї величини, що є другою складовою рівняння (2). Далі

вираховується загальний об'єм води у водосховищі та абсолютний рівень води в резервуарі відповідно до морфометричних характеристик водосховища. Модель для нижнього резервуару будується за тим же принципом, за умови, що баланс витрати води вираховується шляхом різниці витрати води, що скидає гідравлічний таран $Q_{\text{ГТ_скидання}}$ та води, що викачує насосна станція $Q_{\text{нас}}$.

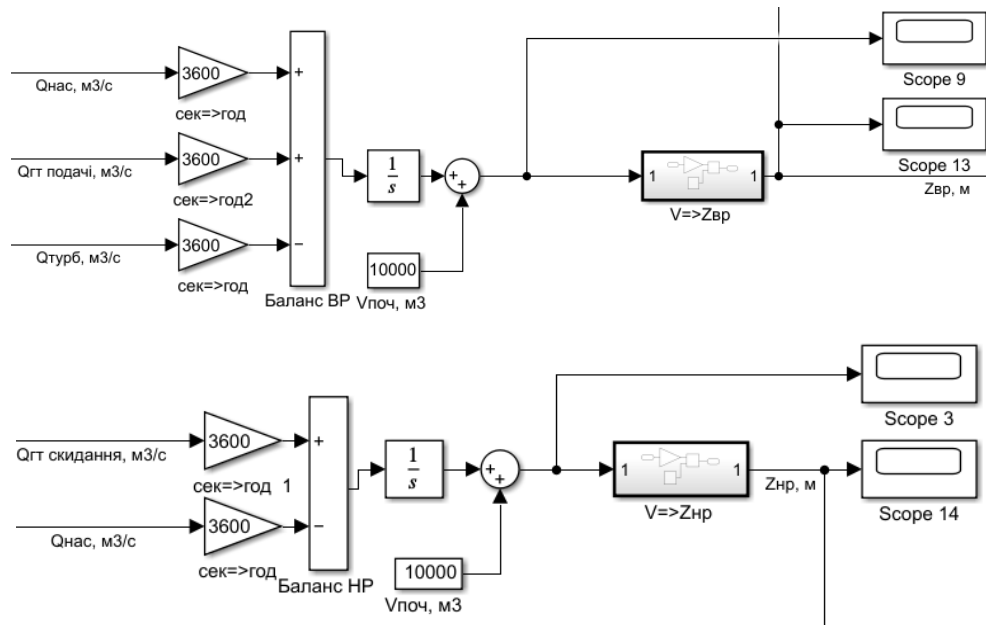


Рис.4. Модель верхнього та нижнього водосховища

Розрахунок потужності на валу гідравлічної турбіни виконується за такою залежністю:

$$N_{\text{тр}} = 9,81 \cdot \rho \cdot \eta \cdot Q_{\text{тр}} \cdot H_{\text{тр}}, \quad (3)$$

де η – ефективність гідротурбіни;

$N_{\text{тр}}$ – механічна потужність гідротурбіни, кВт;

ρ – густина води кг/м³;

$Q_{\text{тр}}$ – витрата води через гідротурбіну м³/с;

$H_{\text{тр}} = (Z_{\text{ВР}} - Z_{\text{ГТ}})$ – гідростатичний напір, м.

За використання універсальних гідромеханічних характеристик та методикою [5], отримано залежність $\eta = f(Q_{\text{тр}})$ та внесено дані до блока LookupTable. Тоді витрата води через турбіну $Q_{\text{тр}}$ буде:

$$Q_{тр} = \frac{N_{тр}}{9,81 \cdot \rho \cdot \eta \cdot H_{тр}} = \frac{\frac{N_{cons}}{\eta_{ген}}}{9810 \cdot \eta(Q_{тр}) \cdot (Z_{вр} - Z_{гт})}, \quad (4)$$

де $N_{тр}$ – потужність на валу гідротурбіни, кВт;

N_{cons} – потужність віддана споживачу, кВт;

$\eta_{ген}$ – коефіцієнт корисної дії генератора.

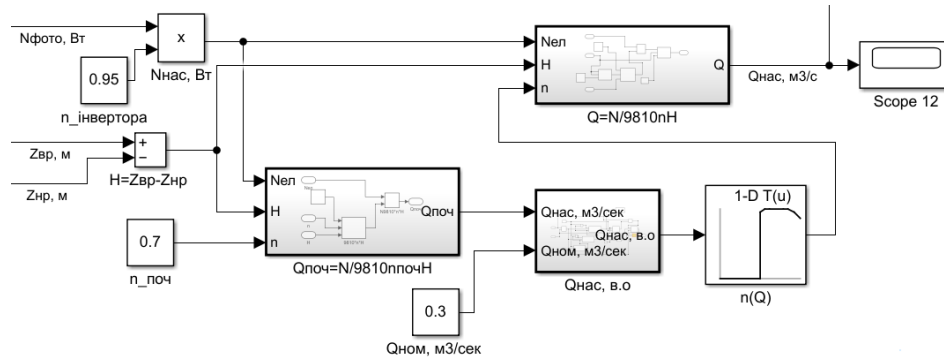


Рис. 5. Модель турбінно-генераторного блоку

Вихідними даними для моделювання гідравлічного тарану є дані про надходження води від гідравлічної турбіни, а також напір у живильній трубі та подавальній трубі. Значення про витрату води у трубі подачі гідравлічного тарану розраховуємо за залежністю [6]:

$$q = \eta Q_{вх} \frac{H}{h.} \quad (5)$$

Створена на основі рівнянь (5) модель гідравлічного тарану зображена на рис.6. Вона приймає на вході значення про витрату води у каналі між турбіною та гідравлічним тараном $Q_{турб}$ та рівень води у верхньому б'єфіх $Z_{вр}$ і нижньому б'єфіх $Z_{нр}$ і на основі цього підраховує потік води у м³/с до верхнього водосховища $Q_{гт}$ подачі. Витрату води через скидальний клапан гідравлічного тарану $Q_{гт_скидання}$ знаходиться, як різниця між витратою води, що надійшла $Q_{турб}$ та витратою через напірний клапан $Q_{гт_подачі}$.

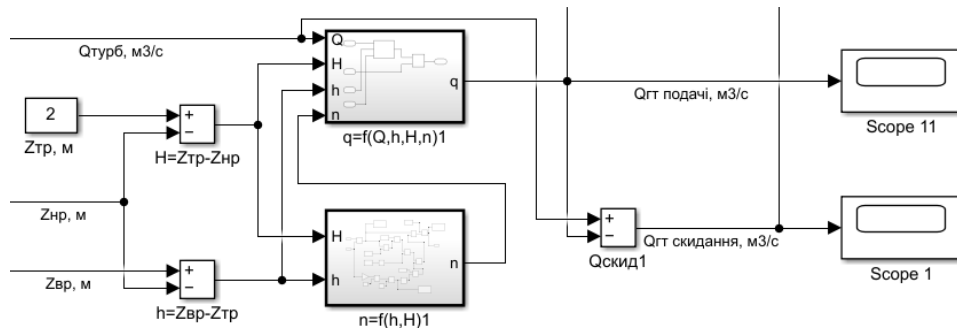


Рис. 6. Модель гідралічного тарану

Розрахунок витрати води через електроприводний насос виконується за наступною залежністю:

$$Q_{\text{нас}} = \frac{N_{\text{ел}}}{9,81 \cdot \rho \cdot \eta \cdot H_{\text{нас}}}, \quad (6)$$

де η – ефективність насосу;

$N_{\text{ел}}$ – споживана електрична потужність насоса, кВт;

ρ – густина води кг/м³;

$Q_{\text{нас}}$ – витрата води через насос м³/с;

$H_{\text{нас}} = (Z_{\text{вр}} - Z_{\text{нр}})$ – гідростатичний напір, м.

Зображена на рис. 7 модель електричного насоса приймає на вході значення про генеровану потужність фотоелектростанції $N_{\text{фото}}$, рівень води у верхньому б'єфі $Z_{\text{вр}}$ та нижньому $Z_{\text{нр}}$.

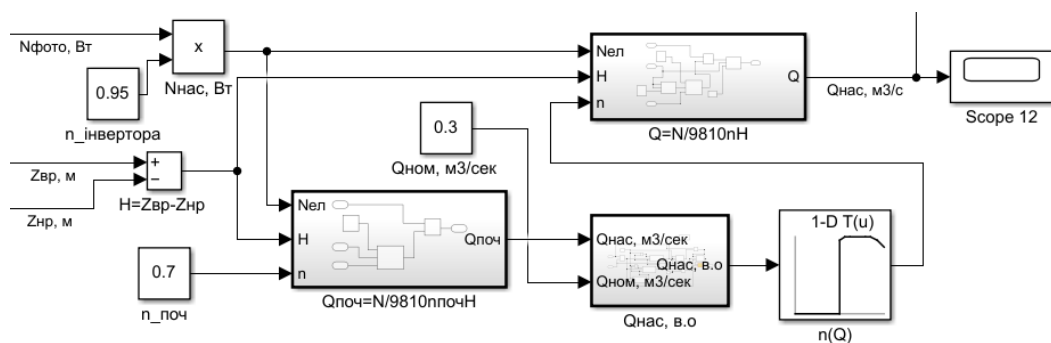


Рис 7. Модель електричного насоса

Дані про залежність $\eta = f(Q)$ отримані з гідроелектричних характеристик у паспорті насоса та описані графічно за допомогою блоку LookupTable з входом для розрахункової відносної витрати води через насос $Q_{\text{в.о}}$. На виході цього блока буде

значення коефіцієнта корисної дії η у %. Далі за рівнянням (6) остаточно розраховується витрата води насосом $Q_{\text{нас}}$ та передається на вихід моделі електричного насосу.

Результати досліджень та їх обговорення. У результаті роботи моделі маємо симуляцію генерації, накопичення та споживання енергії в автономній системі із замкнутим циклом витрат води. При цьому можна прослідкувати перетікання енергії та води між основними вузлами.

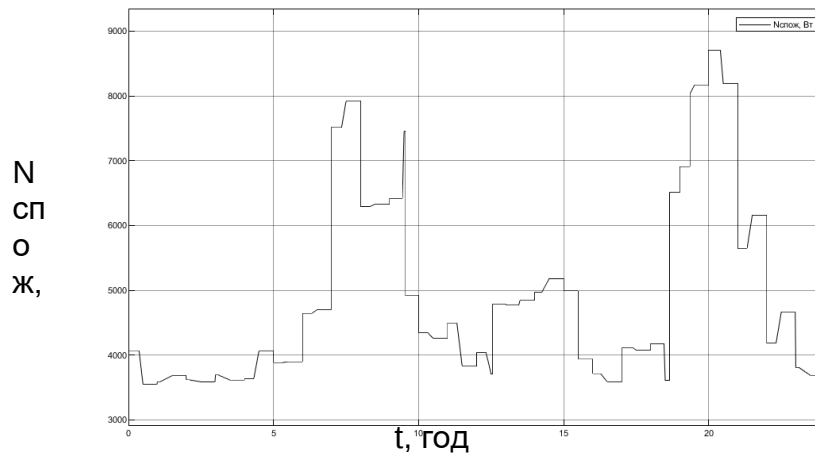


Рис 8. Рівень споживання електроенергії споживачем впродовж доби

Результат споживання електроенергії впродовж доби із врахуванням шумів (за нормальним законом розподілу) зображено на рис. 8. При цьому для забезпечення цієї потужності крізь гідротурбіну впродовж доби проходить наступна витрата води:

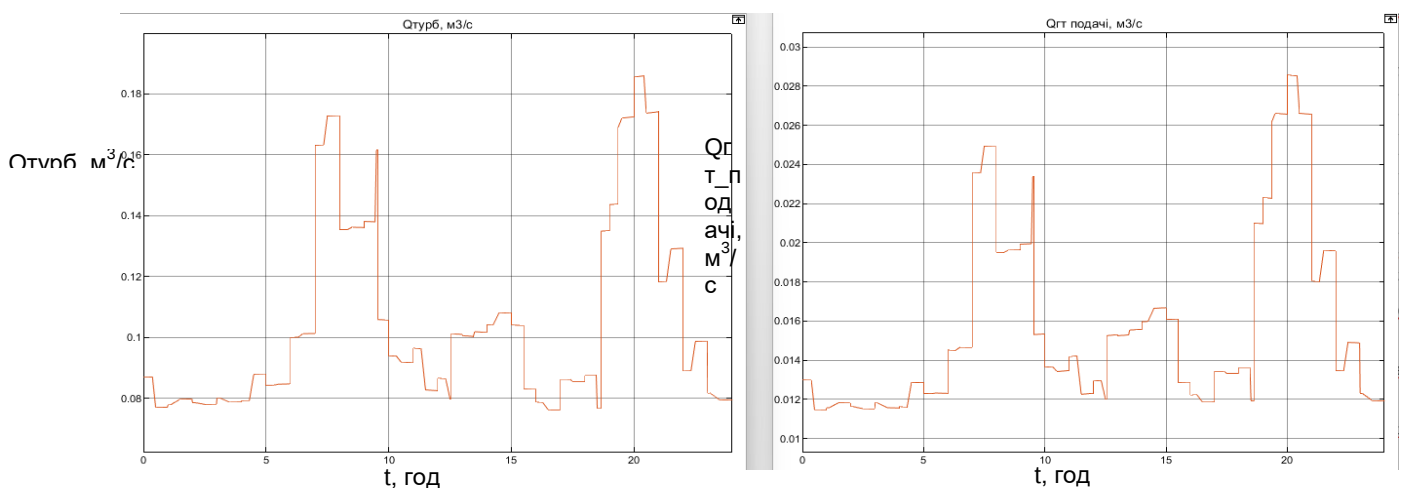


Рис 8. Витрата води через гідравлічну турбіну та гідравлічний таран впродовж доби

Близько 10-20 % (залежно від режиму) від води, скинутої гідротурбіною перекачується назад до верхнього резервуару за допомогою гідравлічного тарану. Паралельно насосна станція живиться від фотоелектростанції та подає воду із нижнього резервуару, графік споживання води якої наведено на рис. 9.

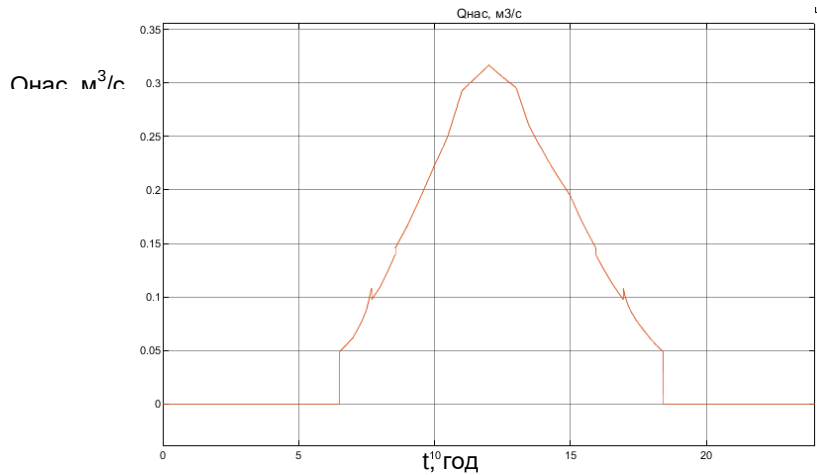


Рис 9. Витрата води насосною станцією впродовж доби

Динаміку зміни рівня води у верхньому та нижньому б'єфі зображено на рис. 10. У першій половині доби фотогенерація відсутня і відповідно відбувається споживання води гідротурбіною із верхнього резервуару для забезпечення енергією споживача. Вода частково повертається за допомогою гідравлічного тарану, але цього недостатньо для повної компенсації витрат води. Близько 6:30 ранку (для 15 червня) відбувається стрибок, що пов'язаний із вмиканням насосів і динаміка падіння рівня води сповільнюється, а ближче до 8:20 ранку витрата води, що перекачується, перевищує споживання, тому рівень води у верхньому б'єфі починає зростати. Зворотна ситуація спостерігається о 16:30.

Створена модель установки дозволяє виявити умови, за яких здійснюється добове забезпечення споживача електроенергією. Рівень води у верхньому б'єфі наприкінці дня більше за рівень води на початку дня.

Висновки та перспективи. Розроблено математичну модель автономної гідроакумуючої установки в програмному пакеті Matlab/Simulink. У результаті аналізу її роботи на моделі, встановлено, що рівень забезпеченості споживача електроенергією впродовж доби становить 100 %. Різниця у часі між виробленою та спожитою електроенергією повністю компенсується гідроакумуючою

установкою та наприкінці дня літнього періоду має приріст у рівні води близько 0,2 %. Розраховано водний баланс у верхньому та нижньому резервуарах води та отримано динамічні залежності зміни рівня води впродовж доби. Запропонована математична модель може бути використана при обґрунтуванні доцільності розроблення гідроакумуючих станцій для накопичення енергії від відновлюваних джерел.

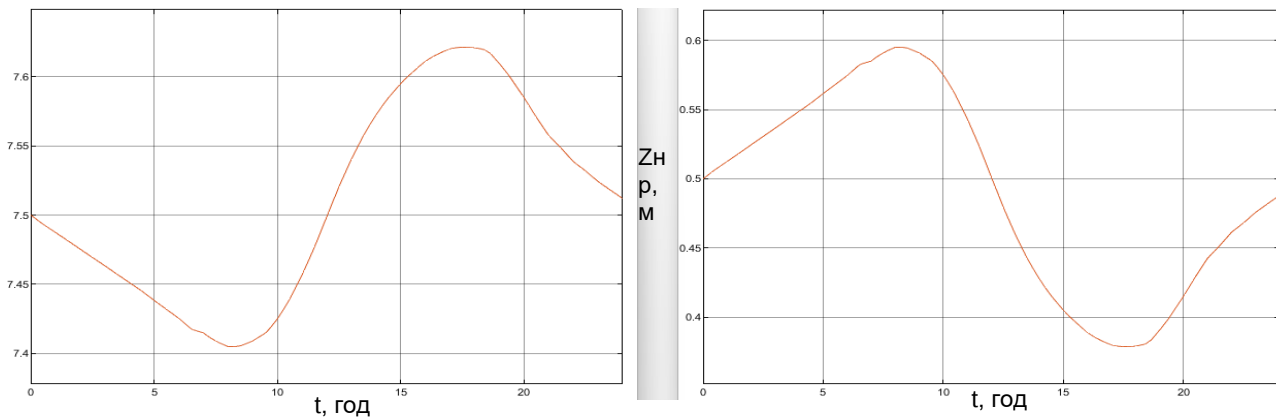


Рис 10. Рівень води у верхньому та нижньому резервуарах

Список використаних джерел

1. KEMPENER, Ruud; BORDEN, Eric. Battery storage for renewables: Market status and technology outlook. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2015, 32.
2. Вербовий А. Моделювання роботи гідроакумулювальної електростанції в насосному режимі при живленні від вітроелектростанції з асинхронним генератором. *Відновлювана Енергетика*. 2019. Вип.4 (59). С. 56-63.
3. Васько П.Ф., Ібрагімова М.Р., Пазич С.Т. Гидроаккумулирующие электростанции на морской воде - технологическая основа крупномасштабного использования ветровой и солнечной энергии в электроэнергетической системе Крыма. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2014. Вып. 15.С. 38-49.
4. Speicher und Pumpspeicherkraftwerke in Österreichkraftwerke in Österreich. Universität Innsbruck. 2011. Available at: (<https://www.uni-due.de/imperia/md/content/wasserbau/30-11aufleger.pdf>)
5. Семененко Р. Ю., Міхалін В. І. Розрахунок енергетичної ефективності поворотно-лопатевої гідротурбіни при змінних витратах води на основі використання часткових гідромеханічних характеристик. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: матеріали наук.-практ. конф.* Київ, 2021. С. 717-721.
6. Овсепян, В. М. Гидравлический таран и таранные установки. Теория, расчёт и конструкции. Москва: 1968. 123 с.

References

1. Kempener, R., Borden, E. (2015). Battery storage for renewables: Market status and technology outlook. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 32
2. Verbovij, A. (2019). Modelyuvannya roboti gidroakumulyuvalnoyi elektrostanciyi v nasosnomu rezhimi pri zhivleni vid vitroelektrostanciyi z asinhronnim generatorom [Simulation of the operation of a hydro-accumulating power plant in pumping mode when powered by a wind power plant with an asynchronous generator]. Renewable and hydrogen energy, 4(59), 56–63.
3. Vasko, P.F., Ibragimova, M.R., Pazich, S.T. (2014). Gidroakkumuliruyushie elektrostancii na morskoy vode - tehnologicheskaya osnova krupnomasshtabnogo ispolzovaniya vetrovoj i solnechnoj energii v elektroenergeticheskoy sisteme Kryma [Hydroaccumulating power plants on sea water - the technological basis of large-scale use of wind and solar energy in the electric power system of Crimea]. Alternative energy and ecology (ISJAE), 15, 38–49.
4. Speicher- und Pumpspeicher-kraftwerke in Österreichkraftwerken Österreich. Universität Innsbruck. 2011. Available at: (<https://www.uni-due.de/imperia/md/content/wasserbau/30-11aufleger.pdf>)
5. Semenenko, R. Yu., Mihalyn, V. I. (2021). Rozrakhunok enerhetychnoi efektyvnosti povorotno-lopatevoi hidroturbiny pry zminnykh vytratakh vody na osnovi vykorystannia chastkovykh hidromekhanichnykh kharakterystyk {Energy efficiency calculation of kaplan hydro turbine at variable water flow rates based on the use of partial hydro mechanical characteristics}. Vidnovlyuvana energetika ta energoefektivnist u XXI stolitti, 717-721.
6. Ovsepyan, V. M. (1968). Gidravlicheskiy taran i tarannye ustanovki. Teoriya, raschyot i konstrukcii [Hydraulic ram and ram installations. Theory, calculation and constructions]. Moskow, 123.

AUTONOMOUS PUMPED STORAGE HYDROPOWER

V. Golovko, R. Semenenko

Abstract. *One of the possible ways to solve the problem of accumulating the energy of a renewable source in an autonomous electric power system is its accumulation in the form of potential water energy and subsequent energy consumption according to a given consumption schedule. A pumped storage hydropower with solar panels allows to save energy from intermittent renewable energy sources (such as solar energy, wind energy and other), or sources based on mineral fuels (such as coal or nuclear energy) during periods of low consumption.*

The paper presents the results of developing a mathematical model of an autonomous pumped storage hydropower in the Matlab/Simulink and describes its main elements. Model allows determining the dynamics of energy flows and water balances in the reservoirs during the day for a given time of the year. The model was created for the purpose of researching the parameters and characteristics of the nodes of the pumped storage hydropower with solar panels. As a result of the analysis of its model, it was established that the level of supply of electricity to the consumer during the day is 100%.

The difference in time between the produced and consumed electricity is fully compensated by the hydro-accumulating plant and at the end of the day in the summer period there is an increase in the water level of about 0.2%. The water balance in the upper and lower reservoirs was calculated and the dynamics of water level changes during the day of different seasons were obtained.

Key words: *autonomous hydro-storage installation, hydraulic ram, photoelectric power station*