

# ТЕХНОЛОГІЇ TECHNIQUE

УДК 621.22-546

С.Ф. Артюх, д-р техн. наук, професор; І.І. Червоненко  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## ЗАОЩАДЖЕННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ЗА РАХУНОК ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОАГРЕГАТІВ ПРИ ЇХ РОБОТІ ЗІ ЗМІННОЮ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ

*В статті розглянуто передумови та способи підвищення ефективності роботи енергообладнання гідроакмулюючих електростанцій та, як наслідок, зменшення за рахунок цього споживання енергоносіїв. Зокрема детально розглянуто питання підвищення ККД діючого обладнання ГЕС та ГАЕС за рахунок його роботи з несинхронною частотою обертання. На прикладі радіально-осьових турбін, які встановлені на Дністровській ГАЕС показана можливість підвищення ефективності їх роботи, як в турбінному так і в насосному режимах. Для цього на основі універсальних характеристик турбін були визначені нові значення оптимальних ККД гідроагрегатів при умові, що частота обертання агрегату буде змінюватися разом зі зміною напору. Запропоновано найбільш раціональний склад енергоблоку, до якого мають увійти радіально-осьова гідротурбіна та асинхронізований синхронний генератор, що дозволить забезпечити стійку та надіну видачу потужності з шин станції, яка б відповідала всім вимогам до якості електроенергії. В статті описана структура нової системи автоматичного керування, що дозволить гідротурбіні працювати з оптимальними параметрами при несинхронній частоті обертання та забезпечить необхідну якість регулювання при динамічних процесах.*

**Ключові слова:** енергосистема, гідроакмулююча електростанція, гідротурбіна, ККД, асинхронізований генератор, система автоматичного керування, змінна частота обертання.

На сьогоднішній день проблема ефективного використання обладнання електростанцій, тобто його робота з максимально можливим ККД, є одною із основних в енергетиці. Сучасні енергосистеми важко уявити без гідроелектростанцій (ГЕС) та гідроакмулюючих електростанцій (ГАЕС), які суттєво впливають на стійку та ефективну роботу інших електростанцій (ТЕС, АЕС), та всієї системи в цілому. Це зумовлюється різкими змінами графіку навантаження впродовж доби та наявністю в енергосистемі станцій з нерівномірною генерацією (СЕС та ВЕС).

Робота теплових електростанцій в маневреному режимі призводить до підвищеного зносу обладнання та зростанню собівартості енергії, за рахунок зменшення ефективності використання обладнання та збільшення споживання енергоресурсів при роботі агрегатів станції з не номінальними параметрами.

Використання ГЕС та ГАЕС дає змогу оптимізувати роботу енергосистеми та при цьому заощадити енергоносії. Тому перші гідроакмулюючі електростанції почали з'являтися вже в 20-ті роки ХХ сторіччя. На сьогоднішній день за даними International Energy Statistics в світі експлуатується близько 460 ГАЕС загальною потужністю 104 млн. кВт, при чому у Франції та Німеччині потужність ГАЕС від всієї встановленої потужності енергосистем складає 4 %, в Японії 8 %, в Австрії взагалі 20 %. Тільки за останнє десятиліття Китай ввів 6 млн. кВт потужності ГАЕС.

Але при цьому будівництво нових гідроелектростанцій ускладнюється багатьма факторами, серед яких основними є необхідність значних інвестицій та питання пов'язані з екологічною безпекою.

Також не треба забувати і про те, що багато станцій вже морально та фізично застаріли та не відповідають сучасним вимогам з економічності.

На нашу думку одними з основних шляхів вирішення цієї проблеми є модернізація та реконструкція діючих ГАЕС. Пропонується використовувати гідроагрегати в режимі з несинхронною частотою обертання. Якщо проаналізувати залежність (1)

$$\eta_T = \frac{M \cdot n}{\gamma \cdot Q \cdot H} \quad (1)$$

де  $Q$  – витрати води через турбіни, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – напір, м;  $\eta_T$  – ККД турбіни;  $M$  – обертальний

момент на валу турбіни, Н м;  $n$  – частота обертання турбіни, хв.-1;  $\gamma$  – густина води, г/см<sup>3</sup> або кг/м<sup>3</sup>; можна побачити що ККД турбіни обернено пропорційний напору та витратам води через агрегат та прямопропорційний моменту та частоті обертання. Тому при зниженні напору ККД можна збільшити за рахунок зміни частоти обертання, що призведе до зменшення витрат води і, як наслідок, підвищенню ККД. При цьому момент опору на валу турбіни повинен залишатись заданим.

Це можна довести, якщо при обробці універсальної характеристики радіально-осьової гідротурбіни припустити, що частота обертання буде змінюватися разом зі зменшенням напору. Такі дослідження були проведені, як вітчизняними так і закордонними вченими [1-5].

Універсальна характеристика турбіни типу ОРОНТ 170 приведена на рис 1.

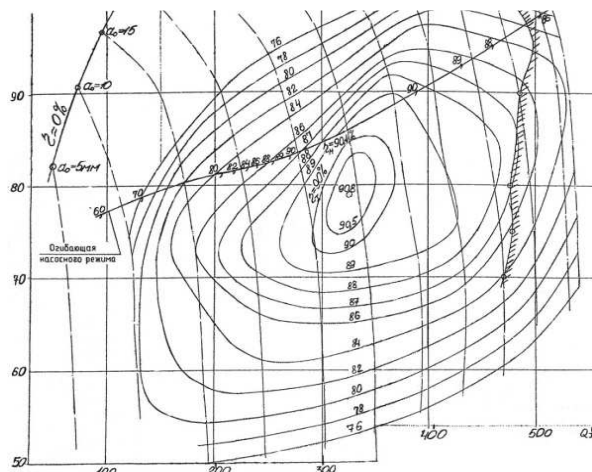


Рис. 1 Універсальна характеристика турбіни типу ОРОНТ- 170

Науково доведено, що для різних турбін при таких режимах підвищення ККД, в середньому, становить від 2 до 5 %, що може суттєво збільшити величину виробленої електроенергії за рік, а в насосному режимі заощадити велику кількість спожитої електроенергії.

Наприклад для Дністровської ГАЕС розрахунки показали, що збільшення ККД в середньому становитиме 1,5 – 2 % (Рис. 2). Зважаючи на потужність агрегатів в турбінному режимі, (330 МВт), сумарний приріст потужності на станції становив би 35 – 46 МВт. Це дозволило б скоротити різницю в потужностях станції в турбінному та насосному режимах і сприяло б підвищенню загальної ефективності станції.

Для Київської ГАЕС підвищення ККД від роботи агрегату з несинхронною частотою складає 3 – 5 %, що дало б приріст потужності на 7–11 МВт.

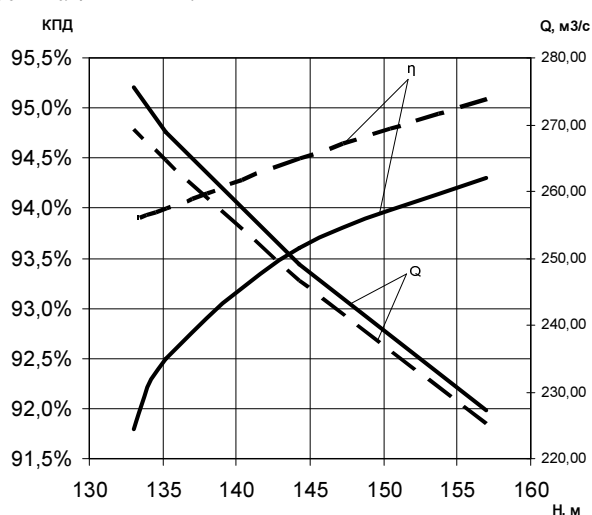


Рис. 2 Залежність ККД та витрат води від напору (суцільна лінія – при постійній частоті обертання, пунктирна – при змінній частоті обертання)

Проте не треба забувати про те, що при роботі в таких режимах напруга на шинах станції має мати частотою 50 Гц, а з огляду на запропонований нами спосіб підвищення ККД гідроагрегатів, шляхом їх роботи з несинхронною частотою, постає нова проблема, пов'язана з синхронізацією такого гідрогенератора з мережею та забезпечення необхідної якості електроенергії.

Проаналізувавши багато способів вирішення цієї проблеми та беручи до уваги всі переваги та недоліки кожного з них, пропонується для вирішення поставленої задачі використовувати замість традиційних синхронних генераторів асинхронізовані синхронні генератори. В таких країнах як Японія, Іспанія, Швейцарія, такі генератори вже широко використовуються на гідростанціях, де вони себе добре зарекомендували. Досвіду роботи таких генераторів на вітчизняних ГЕС поки що немає. Особливості конструкції такої машини дозволяють в широкому діапазоні змінювати швидкість обертання ротора, при цьому на виході частота буде залишатися незмінною. Використання асинхронізованих генераторів суттєво впливає на стійкість та надійність окремої станції та енергосистеми в цілому.

Така компоновка гідроагрегату потребує розробки нової системи керування, яка б забезпечила стійку та надійну роботу енергоблоку при різних режимах його роботи з максимальним ККД. Нами пропонується структура нової системи автоматичного управління гідроагрегатом ГАЕС, яка є багатоконтурною системою зі змінною структурою, яка відповідає всім вищезазначеним вимогам.

Система передбачає роботу агрегатів в режимах підтримання заданої частоти обертання, або роботу агрегату в режимі оптимізації ККД по напору. В останньому випадку, структура системи змінюється і перетворюється на електрогидравличну слідкуючу систему витрати води по напору.

На вхід системи подається діючі значення напору та потужності, задаючий елемент формує на виході сигнал відповідний необхідній кількості витрати води, яка забезпечує оптимальний для цього напору ККД, далі електричний сигнал подається в електрогидравличний перетворювач (ЕГП), а це призводить до необхідного зміщення поршнів блоку золотників (БЗ) та сервомотору (СМ), який регулює відкриття направляючого апарату турбіни (Т), від якого здійснюється зворотний зв'язок на вхід системи. Значення діючої частоти обертання турбіни подається на вхід системи регулювання збудження (СРЗГ) асинхронізованого генератора (АСГ), яка підтримує незмінним потужність генератора. В разі різкого зменшення потужності агрегату, система управління автоматично змінює свою структуру, перетворюючись на динамічний контур регулювання частоти обертання, і забезпечує необхідні дії, які нічим не відрізняються від відповідних дій штатного регулятора частоти обертання гідротурбіни.

#### **Висновки.**

1. Існує необхідність в будівництві та модернізації діючих ГЕС та ГАЕС, бо саме наявність таких станцій в енергосистемі та ефективність їх роботи суттєво впливає на роботу теплових та атомних електростанцій, на збереження енергоресурсів за рахунок оптимізації графіка навантаження.

2. Доведена можливість підвищення ККД гідротурбін при їх роботі зі змінною частотою обертання. Зокрема на прикладі Дністровської ГАЕС та Київської ГАЕС було розраховано ефект від впровадження такої технології. Сумарний приріст потужності становив би від 42 до 57 МВт.

3. Доведена доцільність застосування в складі такого блоку асинхронізованого синхронного генератора замість класичного синхронного генератора.

4. Запропонована структура регулятора ККД для енергоблоку, до складу якого входить радіально-осьова гідротурбіна та асинхронізований синхронний генератор, що забезпечує стійку та надійну роботу з необхідною якістю електроенергії.

#### **Список літератури.**

1. Sheldon L.N. An analysis of the benefits to be gained by using variable speed generators on Francis Turbines//DDE/EPRJ Variable speed Generator Work shop – Hydro Application USSR, Denver Federal Center, May 24-26, 1983.-P.201-208.

2. Farell C., Gulliver J. Hydromechanics of variable speed turbines// Proc. Amer. Power Conf.Vol.17:47th Annu. meet., Chicago,22-24 Apr., 1985. Chicago, Ill, 1985. –P.1154-1160.

3. Артюх С.Ф. Анализ целесообразности работы агрегатов электростанций в режиме переменной частоты вращения//Энергохозяйство за рубежом.-1988.-№3.-С.30-33.

4. Артюх С.Ф. Предпосылки нормальной работы агрегатов ГЭС, ГАЭС и ПЭС с переменной частотой вращения//Тезисы докладов в ВсесоюзНТК «Будущее гидроэнергетики. Основные направления создания гидроэлектростанций нового поколения», октябрь 1991 г. Дивногорская ГЭС.-Л.,1991.-С.91-93.

5. Оптимизация работы гидротурбин посредством применения переменной частоты вращения/Абубакиров Ш.И., Лунаци М.Э., Плотникова Т.В., Сокур П.В., Тузов П.Ю., Шаварин В.Н., Шакарян Ю.Г.//Гидротехническое строительство.-2013.№2.-С.2-8.

S.F. Artjuch, I.I. Chervonenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

**ENERGY SAVING BASED ON ENHANCEMENT OF HYDRAULIC UNIT EFFICIENCY WITH ITS WORK AT VARIABLE SPEED**

*The article describes the background and the ways of pump-storage plant power equipment efficiency upgrading and, as a consequence, reduction due to this energy carriers consumption. Particularly the question is consider in depth how to upgrade efficiency of HEP and PSP operating equipment due to it work with non-synchronous rate of rotation. On an example of Francis turbine installed on the Dniester PSP the possibility of increasing the efficiency of their work both in turbine and pump modes was shown. For this purpose, based on universal turbines characteristic, new value of hydroelectric unit optimum efficiency were determined on condition that aggregate rate of rotation will change along with changes in source pressure. The most rational electrical power unit structure was proposed, which should include Francis turbine and asynchronized synchronous generator which will provide a stable and reliable transmission of power from the tires station that would meet all the requirements for power quality. The article describes the structure of a new automatic control system that will allow hydraulic turbines operate with optimal parameters in non-synchronous speeds and ensure the required quality control during dynamic processes.*

**Keywords:** electric power system, pump-storage plant, hydroturbine, efficiency, asynchronized generator, automatic control system, variable speed.

1. Sheldon L.N. An analysis of the benefits to be gained by using variable speed generators on Francis Turbines//DDE/EPRJ Variable speed Generator Work shop – Hydro Application USSR, Denver Federal Center, May 24-26, 1983.-P.201-208.

2. Farell C., Gulliver J. Hydromechanics of variable speed turbines// Proc. Amer. Power Conf.Vol.17:47th Annu. meet., Chicago,22-24 Apr., 1985. Chicago, III, 1985. –P.1154-1160.

3. Artjuch S.F. Feasibility analysis plant unit work in variable speed mode//Power utilities abroad.-1988.-№3.-P.30-33.

4. Artjuch S.F Background of HEP, PSP and TES aggregate normal working with variable speed// Scientific conference abstracts in All-Union STC «The future of hydropower. The main directions of the development of a new generation of hydroelectric power plants», october 1991 Divnogorskiy HEP.-L., 1991.-P.91-93.

5. Work optimization of hydraulic turbines by applying variable speed// Abubakirov S.I., Lunachi M.E., Plotnikova T. V., Sokur P.V., Tuzov P.Y., Shavarin V.N., Shakaryan Y.G.// Hydraulic engineering.-2013.№2.-P.2-8

УДК 621.22-546

**С.Ф. Артюх**, д-р техн. наук, профессор; **И.И. Червоненко**

**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»**

**ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОВ ПРИ ИХ РАБОТЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ**

*В статье рассмотрены предпосылки и способы повышения эффективности работы энергооборудования гидроаккумулирующих электростанций и, как следствие, уменьшение за счет этого потребления энергоносителей. В частности подробно рассмотрен вопрос повышения КПД действующего оборудования ГЭС и ГАЭС за счет его работы с несинхронной частотой вращения. На примере радиально - осевых турбин установленных на Днестровской ГАЭС показана возможность повышения эффективности их работы, как в турбинном, так и в насосном режимах. Для этого на основе универсальных характеристик турбин были определены новые значения оптимальных КПД гидроагрегатов при условии, что частота вращения агрегата будет изменяться вместе с изменением напора. Предложено наиболее рациональный состав энергоблока, в который должны войти радиально - осевая гидротурбина и асинхронизированный синхронный генератор, что позволит обеспечить устойчивую и надежную выдачу мощности с шин станции, которая бы отвечала всем требованиям к качеству электроэнергии. В статье описана структура новой системы автоматического управления, что позволит гидротурбине работать с оптимальными параметрами при несинхронных частотах вращения и обеспечивать требуемое качество регулирования при динамических процессах.*

**Ключевые слова:** энергосистема, гидроаккумулирующая электростанция, гидротурбина, КПД, асинхронизированный генератор, система автоматического управления, переменная частота вращения.

В.В. Кирик, д-р техн. наук, професор; О.С. Губатюк  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## СТВОРЕННЯ БАЗИ ЗНАТЬ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТОКІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

*В середовищі Matlab синтезовано нечіткий логічний контролер для прийняття рішень щодо оптимального генерування реактивної потужності за умови зниження втрат та отримання оптимального рівня напруг у споживачів. Для створення бази знань контролера була використана тестова схема IEEE-14 та виконано серію розрахунків її режимних параметрів в залежності від потужності генерації джерел розподіленої генерації.*

**Ключові слова:** нечіткий логічний контролер, реактивна потужність, розподілена генерація, Matlab.

Розвиток розподіленої генерації істотно ускладнює контроль якості режимних параметрів та статичної стійкості електричної мережі. Методи контролю, які застосовуються базуються на використанні математичної моделі режиму енергосистеми, що відображує топологію мережі, параметри всіх елементів і реалізуються в централізованих системах автоматичного та оперативного управління. Інтеграція в електричних мережах розподіленої генерації вносить додаткову невизначеність при розв'язанні задачі, істотно ускладнює системи управління, знижуючи тим самим економічний ефект від її використання. Виникає технологічний бар'єр на шляху розвитку розподіленої генерації, що актуалізує завдання розробки нових керуючих органів, що створять більш прийнятні умови для інтеграції розподіленої генерації в існуючі системи та мережі.

Проблема компенсації реактивної потужності завжди займала важливе місце в загальному комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Оптимізація потоків реактивної енергії значною мірою зумовлює економію грошових і матеріальних ресурсів, а також підвищення якості енергопостачання.

На сьогодні приріст споживання реактивної потужності перевищує зростання споживання активної потужності (зумовлений розвитком електроприладів з нелінійними елементами). Проведення заходів щодо компенсації реактивної потужності дозволить знизити втрати електроенергії, збільшити пропускну здатність електричних мереж, а також матиме позитивний вплив на режим напруги.

Зменшення перетоків реактивної електроенергії за рахунок застосування засобів компенсації реактивної потужності (РП) дозволяє знизити в електричних мережах до 30% навантажувальних втрат електроенергії [1].

Відзначимо, що в умовах сьогодення створено достатня кількість алгоритмів і програм, доведених до практичної реалізації, що дозволяють виконувати оптимізацію РП окремих миттєвих режимів. Однак, отримання оптимального рішення для заданого тимчасового інтервалу зміни параметрів стану системи досить трудомістке і неефективне, оскільки включає в себе послідовну оптимізацію і аналіз кожного з характерних режимів, підсумовування їх економічних оцінок, внаслідок чого рішення задачі оптимального вибору РП громіздке.

Нечітке керування (Fuzzy Control) в даний час є однією з найперспективніших інтелектуальних технологій, що дозволяють створювати високоякісні системи керування. Метод теорії нечіткої логіки застосовує замість Булевої логіки експертні оцінки та використовує для формування рішення сукупність нечітких функцій належності і правил з декількома висновками, що дозволяють сформувати базу знань (БЗ) експертної системи. При цьому на основі експертних знань визначаються терм-множини параметрів, що формують функції належності всіх лінгвістичних змінних і алгоритми фази-модулів [2].

На основі нечіткої логіки розроблена система прийняття рішення щодо генерування реактивної потужності синхронного двигуна в залежності від потужності джерела розподіленої генерації (РГ) з метою оптимального розподілу РП в мережі.

Для формування бази знань та синтезу НЛК створена в пакеті програм Matlab (Simulink) імітаційна модель тестової схеми IEEE-14 (рис.1). Пакет прикладних програм Matlab дає можливість вирішувати широке коло математичних задач і містить у своєму складі програми Simulink [3] та Fuzzy [4], які дозволяють виконувати широкий спектр задач синтезу та моделювання систем з нечітким логічним контролером.