

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЧЕРВОНЕНКО ІВАН ІГОРОВИЧ



УДК 621.22–546

**СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБОРІТНИХ ГІДРОАГРЕГАТІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ
ЗІ ЗМІННОЮ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Артюх Станіслав Федорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри електричних станцій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ястребенецький Михайло Онисимович,
Державний науково-технічний центр з ядерної та
радіаційної безпеки, головний науковий співробіт-
ник

доктор технічних наук, професор
Канюк Геннадій Іванович,
Українська інженерно-педагогічна академія,
професор кафедри теплоенергетики
та енергозбереження

Захист відбудеться 25 січня 2016 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 18 грудня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Северин В. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасною тенденцією світової гідроенергетики є швидке зростання кількості гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС). Ці станції допомагають вирішувати багато складних проблем пов'язаних з роботою електроенергетичних систем, головними із яких є покриття піків та заповнення нічних провалів графіків навантаження.

При цьому агрегати гідроакумулюючих електростанцій змушені працювати в умовах, коли їх напори змінюються в дуже широких межах, що в свою чергу приводить до значного зменшення їх основного показника ефективності, а саме, коефіцієнта корисної дії. Це призводить до багатомільйонних збитків пов'язаних з недовиробкою електроенергії при роботі станції в турбінному режимі та зі збільшеними витратами енергії при роботі в насосному режимі. Все це є причиною недосконалості управління робочими процесами оборотних гідроагрегатів гідроакумулюючих електростанцій.

Як показують дослідження Кривченко Г. І., Артюха С. Ф., Шакар'яна Ю. Г., Yanagisawa T., Merino J. M., Kubo T. та інших, найбільш ефективним способом підвищення коефіцієнту корисної дії гідроагрегату є введення режиму роботи зі змінною частотою обертання ротора гідротурбіни в залежності від зміни напору води на станції. Найбільші складнощі при цьому викликає алгоритмічне забезпечення автоматизації процесів керування робочими процесами агрегатів гідроакумулюючих електростанцій.

Таким чином, задача синтезу системи автоматичного управління робочими процесами оборотних агрегатів гідроакумулюючих електростанцій при роботі зі змінними напорами є актуальною, що визначило напрям досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних станцій НТУ «ХПІ», відповідно до держбюджетної НДР МОН України «Розвиток теорії та науково-методичних основ для створення і модернізації турбогенераторів, які задовольняють сучасним вимогам електроенергетичної системи України» (№ ДР 0115U000528), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Удосконалення системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами для підвищення їх енергоефективності при роботі в режимі зі змінною частотою обертання.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- обґрунтувати оптимальний склад оборотних гідроагрегатів гідроакумулюючих електростанцій;
- формалізувати задачу керування робочими процесами оборотних гідроагрегатів для забезпечення максимального коефіцієнту корисної дії;
- розв'язати задачу синтезу структури системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами, яка б задовольняла всім режимам їх роботи;
- розробити математичну модель синтезованої системи управління і провести на її основі комп'ютерне моделювання керованих процесів оборотних гідроагрегатів ГАЕС;

– дати рекомендації з практичної реалізації розробленої системи автоматичного управління та визначити очікуваний ефект від її впровадження на гідроакумуючих електростанціях України.

Об'єктом дослідження є процеси керування енергетичними агрегатами гідроелектростанцій.

Предмет дослідження – система автоматичного керування оборотними гідроагрегатами гідроакумуючих електростанцій, які працюють зі змінною частотою обертання.

Методи досліджень. При виконанні дисертаційної роботи використані фундаментальні положення теорії автоматичного керування – при синтезі структури САУ та забезпеченні стійкості системи управління оборотними гідроагрегатами; теорії оптимізації та методів математичного моделювання – при розробці математичної моделі системи автоматичного управління; теорії гідродинаміки та гідравлічних машин – при обґрунтуванні способів підвищення енергоефективності гідроагрегатів ГАЕС, які працюють зі змінними напорами; теорії електричних машин – при розробці системи управління електромагнітним моментом генератора.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше на основі введених критеріїв оптимальності обґрунтовано оптимальний склад оборотних гідроагрегатів гідроакумуючих електростанцій, що працюють зі змінною частотою обертання і дозволяють забезпечити достатню якість електроенергії при змінах в широких межах частоти обертання робочого колеса турбіни.

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод вибору значення відкриття направляючого апарату та частоти обертання оборотної турбіни, при яких забезпечується максимальне значення коефіцієнту корисної дії гідроагрегату, що дозволило підвищити техніко-економічні показники гідроакумуючих електростанцій.

3. Модернізовано систему автоматичного управління енергоблоком гідроакумуючої електростанції шляхом зміни її структури, що дозволило забезпечити функціонування станції як з синхронною, так і зі змінною частотою обертання гідроагрегату та підвищити коефіцієнт корисної дії агрегату в середньому на $3 \div 4$ %.

4. Вперше запропонована математична модель системи автоматичного управління, яка реалізує режим функціонування гідротурбіни зі змінною частотою обертання, що дозволило провести комп'ютерне моделювання робочих процесів в системі при змінних напорах та різних значеннях навантаження.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені математичні моделі гідроагрегату та системи управління, доцільно використовувати при проектуванні нових енергоблоків та для налаштування їхніх систем керування. Втілення такої САУ на гідроакумуючих електростанціях дозволить отримати значний ефект за рахунок додаткової генерації електроенергії в турбінному режимі та заощадженні електроенергії при роботі станції в насосному режимі.

Всі матеріали щодо системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами ГАЕС, які працюють зі змінною частотою обертання, передані

НВП ТОВ «Енергорегулятор» (м. Харків) для реалізації цієї системи управління і подальшої її поставки на діючі ГАЕС та на ті, які будуються. Розроблена система автоматичного управління оборотними гідроагрегатами закладена в проєкт реконструкції Київської ГАЕС.

Одержані наукові результати дисертаційної роботи запропоновані для використання ТОВ «Харківтурбоінжиніринг» (м. Харків) при розробках проєктів на поставку гідромеханічного обладнання для ГАЕС з оборотними гідроагрегатами в складі радіально-осьових гідротурбін та асинхронізованих гідрогенераторів. Науково-технічна рада Асоціації «Укргідроенерго» визначила розроблену в дисертації систему управління оборотними гідроагрегатами, як основну при реалізації пілотного проєкту, який планується вести в Україні для дослідження роботи оборотних гідроагрегатів в режимі зі змінною частотою обертання.

Обґрунтований в дисертаційній роботі метод підвищення енергоефективності роботи гідроакумулюючих електростанцій за рахунок введення режимів роботи зі змінною частотою обертання та спосіб його реалізації впроваджені у навчальний процес кафедри електричних станцій НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно: на основі системного підходу запропоновано дієвий метод підвищення енергоефективності оборотних гідроагрегатів ГАЕС, достовірність якого підтверджена дослідженнями характеристик новітніх радіально-осьових гідротурбін; науково обґрунтовано та визначено оптимальний склад оборотних гідроагрегатів ГАЕС, які працюють зі змінною частотою обертання і забезпечують необхідну якість електроенергії на шинах станції; сформульовані вимоги до перспективної системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами та синтезовано структуру системи, яка задовольняє цим вимогам; розроблені алгоритми перебудови структури системи управління при зміні режимів роботи гідроагрегатів; розроблено математичну модель синтезованої системи управління, яка включає в себе модель радіально-осьової гідротурбіни з урахуванням динамічних процесів, що відбуваються в перехідних режимах, і дозволяє досліджувати процеси при переключенні режимів роботи регулятора; визначено основні положення по реалізації такої системи та визначено очікуваний економічний ефект від її втілення на ГАЕС України.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на: VI Міжнародній науково-практичній конференції гідроенергетиків (Рівне, 2013); II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ-2013 (Вінниця, 2013); I Міжнародній науково-практичній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2014» (Київ, 2014); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2014); на Науково-технічній раді Асоціації Укргідроенерго (Київ, 2015).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 10 наукових публікаціях, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях України (1 – у виданні, що

входить до наукометричних баз), 2 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 2 у матеріалах конференцій, 1 патент України на винахід.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 140 сторінок, включаючи 56 рисунків по тексту, 3 таблиці по тексту, 1 таблиця на 1 окремій сторінці, списку використаних джерел з 91 найменування на 11 сторінках, 1 додаток на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність теми дослідження, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи вирішення задач, наукову новизну та практичну значущість виконаної роботи.

Перший розділ присвячено науковому обґрунтуванню введення на ГАЕС режиму роботи їх оборотних гідроагрегатів зі змінною частотою обертання, що дає можливість підвищити їх ККД при зміні напору на станції. Дієвість цього методу підтверджена під час аналізу універсальних характеристик сучасних турбін вітчизняного виробництва.

На рис. 1 для однієї з вітчизняних гідротурбін показана аналітична залежність ККД η гідроагрегату та витрат води Q через робоче колесо при змінах напору H при роботі з постійною синхронною частотою обертання (суцільна лінія) та зі змінною частотою обертання (пунктирна лінія). Збільшення ККД становить від 1,5 % до 2,1 %.

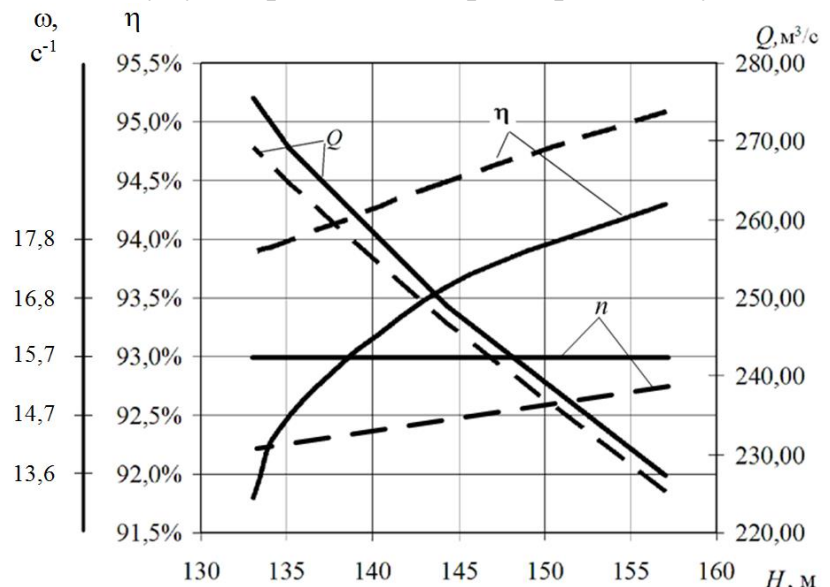


Рисунок 1– Залежність η , Q від H при $n=\text{var}$ для радіально-осьової турбіни типу ОРОНТ-170

Проведений детальний аналіз існуючих систем автоматичного управління агрегатами гідроакумуючих електростанцій, а також приливних та вітрових електростанцій, які вимушені працювати зі зміною частотою обертання своїх агрегатів через зміну параметрів їх енергоносіїв. Розробці та проектуванню систем управління гідроагрегатами присвятили свої праці Кривченко Г. І., Yanagisawa T., Merino J. M., Kubo T., Borghetti A., Fraile-Ardanuy J. та інші. Але при цьому на сьогоднішній день відсутня інформація про системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами ГАЕС, які працюють зі змінною частотою обертання.

Другий розділ присвячений розробці структури автоматичної системи управління оборотних гідроагрегатів ГАЕС, які працюють зі змінною частотою обертання. Визначено, що така САУ, перш за все, повинна забезпечити всі не-

обхідні штатні режими їх роботи та виконувати корекцію ККД при зміні напору на станції та навантаженні генератора, як в турбінному, так і в насосному режимах.

Зважаючи на цілий ряд переваг, обрано турбіни радіально-осьового типу тому, що вони застосовуються в дуже широкому діапазоні напорів, мають компактні розміри, та високий ККД.

Підвищення ККД гідроагрегатів за рахунок роботи зі змінною частотою обертання визначило певну проблему, пов'язану з тим, що при будь яких режимах роботи, частота та напруга на шинах станції мають відповідати всім вимогам до якості електроенергії. Для цього необхідно, щоб у складі блоків станції були відповідні механізми або електричні пристрої, які дозволяли б отримувати на шинах ГАЕС синхронну частоту напруги при несинхронній частоті обертання турбін. Вибір складу перспективного оборотного гідроагрегату проведений на основі методу експертних оцінок за критеріями: вартість установки, плавність регулювання частоти обертання, діапазон зміни частоти обертання, вплив на оточуюче середовище, рівень погіршення показників якості електроенергії, ускладнення експлуатації. Визначено, що до складу оборотного гідроагрегату, робочі процеси в якому є об'єктом управління, і який є найкращим по всім показникам, входять радіально-осьова гідротурбіна та асинхронізований синхронний генератор-двигун (АСГД), який, в силу особливості його конструкції, дає можливість плавно і в широкому діапазоні змінювати робочу частоту обертання гідротурбіни і забезпечувати видачу електроенергії з його шин з синхронною частотою.

Проведена формалізація задач управління для оборотних гідроагрегатів, які працюють зі змінною частотою обертання. Робочі процеси, які протікають в оборотному гідроагрегаті ГАЕС, тісно пов'язані функціональними та експериментальними залежностями, до яких відносяться: характеристика витрат води через робоче колесо турбіни $Q = Q(H, n, \sigma)$, як функція від напору H , частоти обертання n та відкриття направляючого апарату σ , універсальна характеристика турбіни та функціональна залежність потужності гідротурбіни від напору H , ККД η та витрат води Q .

При роботі турбіни в сталих режимах необхідно, щоб потужність турбіни була рівна потужності генератора, навантаження якого задається диспетчером енергосистеми. Напір на станції змінюється в залежності від режиму роботи станції та в заздалегідь визначених межах $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$. При проведенні розрахунків витрат води та відповідного значення відкриття направляючого апарату знаходимо з універсальної характеристики гідротурбіни в залежності від напору, частоти обертання та навантаження на шинах генератора.

Враховуючи те, що напір змінюється незалежно від інших параметрів, приймається його значення постійним для деякого проміжку часу $[t_i; t_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, T$ с, тоді

$$\eta_H = \eta_H(n, \sigma), \quad (1)$$

і задача управління зводиться до пошуку оптимального ККД турбіни при змінних значеннях частоти обертання $n = \text{var}$ та відкриття направляючого апарату турбіни $\sigma = \text{var}$, яке забезпечує оптимальні витрати води Q для даного напору H

$$\eta \rightarrow \max_{n, \sigma}. \quad (2)$$

При цьому враховується, що навантаження гідроагрегату задане і незмінне, а значення частоти обертання та відкриття направляючого апарату мають певні обмеження:

$$\begin{cases} P_T = P_G^* = \text{const}, \\ 0,7 n_0 \leq n \leq 1,1 n_0, \\ \sigma \in [0; 1], \end{cases} \quad (3)$$

де P_G^* – задане навантаження генератора, МВт; n_0 – синхронна частота обертання, 50 Гц; $\sigma = 0$ – значення, яке відповідає закритому направляючому апарату; $\sigma = 1$ – значення, яке відповідає відкритому направляючому апарату.

Значення відкриття направляючого апарату σ та частоти обертання n для кожної величини напору та навантаження генератора розраховуються по універсальним характеристикам гідротурбін і дискретизуються з фіксованим кроком, величина якого залежить від необхідної точності підтримки ККД.

$$\begin{cases} \sigma \in \{ \sigma_i \}_{i=1, \overline{m_\sigma}}, \\ n \in \{ n_k \}_{k=1, \overline{m_n}}, \\ H \in \{ H_j \}_{j=1, \overline{m_H}}, \end{cases} \quad (4)$$

де $m_\sigma = 10 \div 100$, $m_n = 10 \div 100$, $m_H = 10 \div 100$.

Виходячи з цього ККД η також представляє собою масив даних

$$\eta \in \{ \eta_l \}_{l=1, \overline{m_\eta}}, \quad (5)$$

де $m_\eta \in [1000; m_\sigma \cdot m_n \cdot m_H]$.

Таким чином, задача управління зводиться до відшукування оптимальних значень частоти обертання $n = n^*$ та відкриття направляючого апарату $\sigma = \sigma^*$ при кожному новому значенні напору H_j , при яких ККД турбіни буде оптимальним

$$\eta^* = \max_{i, k} \{ \eta(H_j, n_k, \sigma_i) \}. \quad (6)$$

Для синтезу системи управління гідроагрегатами ГАЕС розроблені алгоритми роботи САУ в шатних режимах роботи: пуск та зупинка блоку в турбінному та насосному режимах, синхронізація генератора з мережею, підтримка постійного навантаження та частоти напруги, перевід агрегату з турбінного режиму роботи в насосний і навпаки.

Для переведення оборотного гідроагрегату в режим роботи зі змінною частотою обертання, пропонується використати типову структуру електрогідравлічного регулятора (ЕГР) частоти обертання гідротурбіни та шляхом зміни його структури забезпечувати вищезазначений режим роботи.

Така система повинна складатися з наступних підсистем:

1. Регулятора частоти обертання, який забезпечить всі вимоги до штатних режимів роботи гідроагрегату та динамічну стійкість гідроагрегата при різких змінах навантаження з боку мережі.

2. Системи оптимізації ККД гідротурбін, яка забезпечить необхідну зміну витрат води через турбіну при зміні напору на станції для підтримки оптимального режиму роботи гідроагрегату.

3. Каналу регулювання та стабілізації електромагнітної потужності гідрогенератора агрегату ГАЕС.

Завдання системи збудження АСГД полягає в підтримці заданого графіку навантаження, як при роботі блоку з синхронною частотою обертання ротора гідротурбіни, так і при його роботі в режимі корекції ККД зі змінною частотою обертання. При цьому частота напруги на шинах генератора завжди повинна відповідати вимогам до якості електроенергії. В роботі розглядається АСГД, який має на роторі дві взаємоперпендикулярні обмотки збудження. Для такої машини частота напруги і струму на шинах визначається як

$$\omega_C = \omega_R + \omega_f, \quad (7)$$

де ω_R – частота обертання ротора гідроагрегата, ω_f – частота струму збудження. Наведене співвідношення свідчить про те, що частота напруги на шинах АСГД може регулюватися як частотою обертання ротора гідроагрегату, так і частотою струму збудження, що повністю задовольняє поставленим вимогам. Система управління АСГД реалізує принципову особливість асинхронізованих машин – незалежність регулювання електромагнітного моменту і напруги.

При розробці перспективної системи управління максимально використувалась конструкція ЕГР, яка встановлюється на всіх сучасних гідростанціях, а всі перетворення його структури пропонується робити шляхом внесення певних змін в електричну частину регулятора.

Для розділення функцій системи управління залежно від режимів її роботи та необхідної перебудови структури регулятора, вводиться спеціальний перемикач, який встановлюється між виходом чутливого елемента (ЧЕ) ЕГР та його підсилювачем, і називається фільтром режимів (ФР), що дає можливість автоматично або вручну змінювати структуру системи управління оборотного гідроагрегату відповідно до завдань, передбачених режимами його роботи.

У сталому режимі роботи енергоблоку ГАЕС ФР «розриває» замкнений контур регулювання частоти обертання і підключає на вхід підсилювача замість чутливого елемента додатковий блок, який отримав назву «Коректор ККД» (КК). Ще однією задачею ФР є відключення корегуючих ланок електрогідравлічного регулятора частоти обертання гідротурбіни при переключенні САУ в режим корегування ККД по напору. Автоматичне перемикання ФР здійснюєть-

ся від впливу « X », який формується на основі сигналів поточного значення частоти обертання робочого колеса турбіни.

Коректор ККД аналізує діючі величини напору H , відкриття направляючого апарату σ , частоти обертання n , навантаження генератора P і визначає необхідне для даного режиму оптимальне значення відкриття направляючого апарату σ_H , при якому забезпечується найвищий ККД турбіни при відповідній зміні напору. Ланки перемикання структури САУ показана на рис. 2, де ЖЗЗ – жорсткий

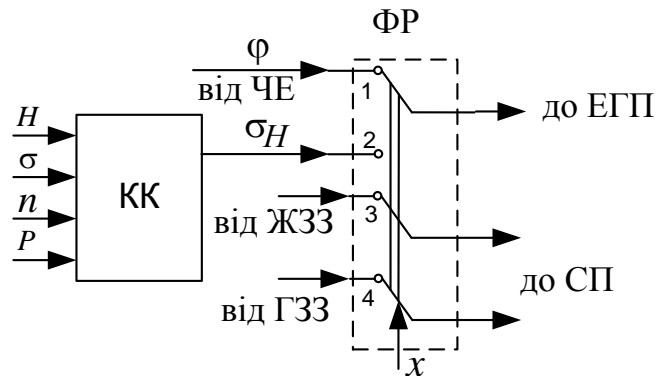


Рисунок 2 – Ланка перемикання структури САУ

зворотний зв'язок, ГЗЗ – гнучкий зворотний зв'язок, СП – суматор-підсилювач.

Якщо в силу різних обставин відбувається різка зміна навантаження гідроагрегату, яка викликана зовнішніми факторами, ФР автоматично відновлює штатну схему регулятора і той забезпечує необхідну динаміку та якість регулювання швидкості турбіни. Перемикання здійснюється від дії керуючого впливу X , який залежить від швидкості зміни частоти обертання ротора гідроагрегату.

Повна синтезована функціональна схема системи автоматичного управління оборотного гідроагрегату зі змінною структурою показана на рис. 3, де P – гідромеханічна частина ЕГР, НА – направляючий апарат, Т – турбіна.

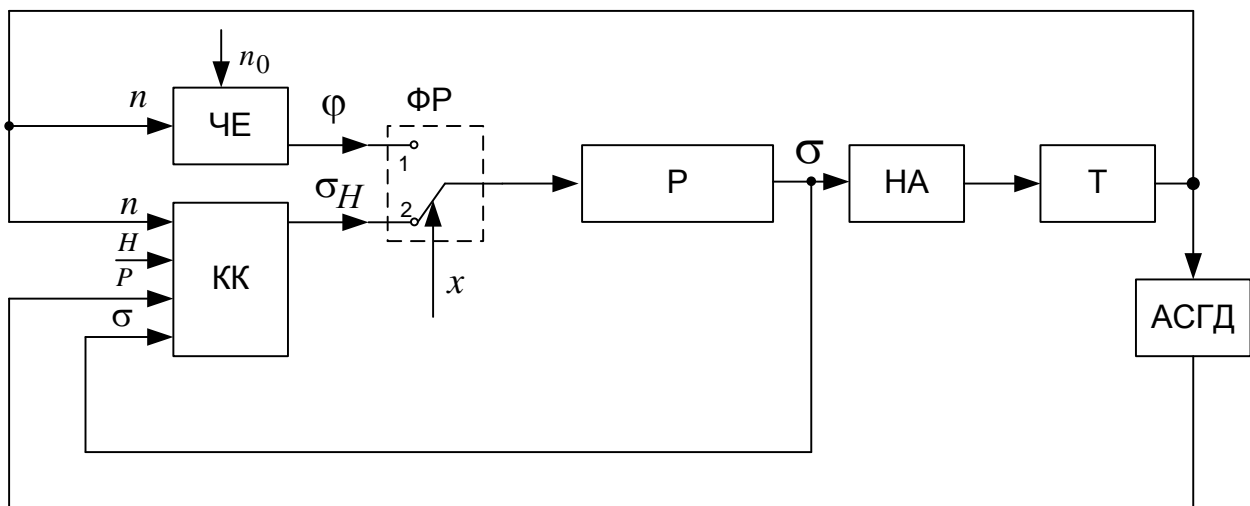


Рисунок 3 – Повна синтезована функціональна схема САУ

Додаткові блоки, які вводяться в структуру електрогідравлічного регулятора, забезпечують роботу системи управління оборотних гідроагрегатів зі змінною частотою обертання робочого колеса турбіни за алгоритмами, які наведені на рис. 4.

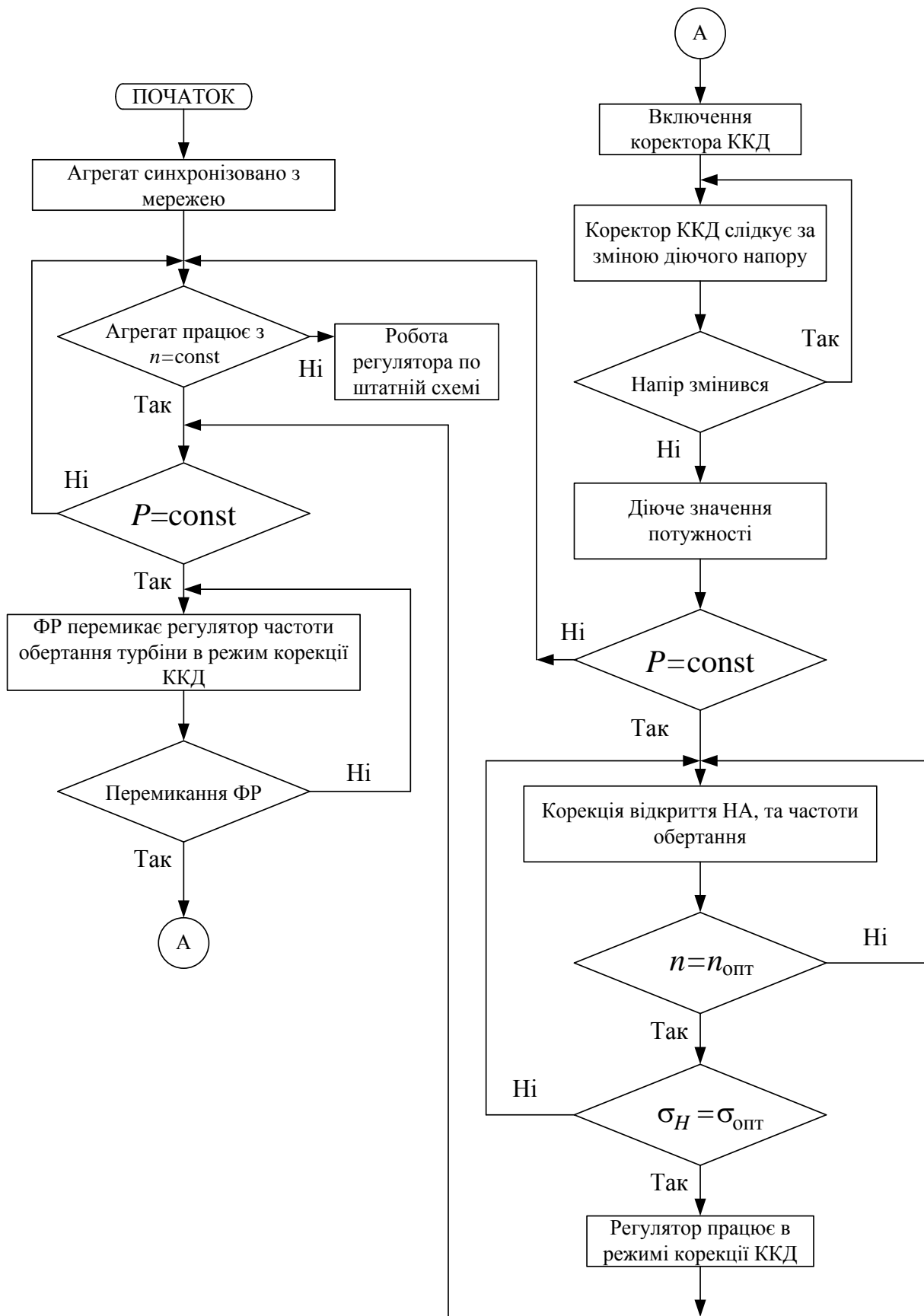


Рисунок 4 – Алгоритм роботи фільтра режимів та коректора ККД

Фактично така система буде представляти собою два регулятори, які мають одну виконавчу частину, а саме перетворювачі та каскад підсилювачів, які

входять до складу електрогідравлічного регулятора. При цьому перший, так званий, штатний регулятор має замкнений контур по частоті обертання, задача якого підтримання синхронної частоти обертання робочого колеса турбіни при будь яких зовнішніх збуреннях системи.

Другий регулятор здійснює регулювання відкриттям направляючого апарату турбіни так, щоб при цьому рівень її ККД був найбільшим при поточному рівні напору на ГАЕС та навантаженні генератора. При цьому контур замикається саме по положенню лопаток направляючого апарату турбіни.

Частота обертання гідротурбіни, яка працює в режимі корегування ККД, в кожен момент часу буде визначатися перетином моментних характеристик турбіни та генератора при фіксованому значенні електромагнітної потужності останнього. Точка перетину цих характеристик відповідає рівноважному, на даний момент, стану агрегату і відповідній частоті його обертання. При постійній моментній характеристиці навантаження агрегату та при змінній моментній характеристиці турбіни буде відповідно змінюватись і величина частоти обертання.

У **третьому розділі** проведена перевірка працездатності, умов стійкості та динамічних якостей перспективної САУ на основі математичного моделювання в програмній оболонці VisSim 3.0. Для цього запропонована математична модель роботи гідроагрегату та системи управління його робочими процесами, яка включає в себе всі ланки розробленої САУ.

При розробці математичної моделі роботи гідротурбіни приймалися до уваги гідромеханічні перехідні процеси в її проточній частині, які впливають на підвищені динамічні навантаження її конструктивних елементів і проявляються у формі гідравлічного удару. Останній, як показує практика, є дуже небезпечним для роботи гідротурбіни, бо виникає в процесі регулювання при зміні потужності агрегату і витрат води через турбіну та має зворотну до зміни електромагнітного моменту дію, що знижує швидкодію регулювання та становить загрозу механічній міцності водоводів і турбіни. Математична модель включає рівняння електрогідравлічної частини САУ в операторному вигляді і описується залежностями:

$$\begin{aligned} \varphi &= k_1(n - n_0), \quad \psi = k_2 \cdot (\varphi - \gamma - \zeta), \quad \delta = k_3 \cdot \psi, \quad \lambda = \frac{k_4}{T_1 s + 1} \delta, \\ v &= \frac{k_5}{T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1} \lambda, \quad \mu = \frac{k_6}{T_3 s + 1} v, \quad \zeta = \frac{k_7}{T_4 s + 1} \mu \\ \sigma &= \frac{k_8}{T_5 s} \zeta, \quad \varsigma = k_{33} \cdot \sigma, \quad \gamma = \frac{\beta T_d s}{T_d s + 1} \sigma, \end{aligned} \quad (8)$$

де φ – відносна величина відхилення частоти обертання ротора; $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8$ – коефіцієнти підсилення ланок ЕГР; n – діюча частота обертання гідроагрегату; n_0 – синхронна частота обертання гідроагрегату; ψ – вихідний сигнал суматора-підсилювача; γ – вихідний сигнал гнучкого зворот-

ного зв'язку; ζ – вихідний сигнал ЖЗЗ; δ – відносний вихідний сигнал ЕГП; λ – вихідний сигнал спонукального золотника; T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 – постійні часу ланок ЕГР; v – переміщення поршня допоміжного сервомотора; ξ – коефіцієнт демпфірування; μ – вихідний сигнал допоміжного сервомотора; ζ – вихідний сигнал головного золотника; σ – відносна величина відкриття направляючого апарату; k_{33} – інтенсивність ЖЗЗ; β – інтенсивність ГОС; T_d – постійна часу ГОС.

Динамічні характеристики гідроагрегату як об'єкта управління визначаються системою рівнянь:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_T - M_G}{J}, \quad M_T = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T}{\omega_R}, \quad H = H_n + \Delta h,$$

$$\Delta h = -T_W \cdot \frac{dQ}{dt}, \quad T_W = \frac{Q_n}{gH_n} \sum \frac{L_i}{S_i}, \quad Q = k_Q \cdot \sigma, \quad M_G = \frac{P_G}{\omega} \quad (9)$$

де ω – кутова швидкість обертання гідротурбіни, рад/с; M_T, M_G – моменти турбіни и генератора (електромагнітний) відповідно, Н/м; J – момент інерції частин, що обертаються, кг·м²; Q – витрата води через гідротурбіну, м³/с; H – напір, м; η_T – ККД гідротурбіни; H_n – номінальний напір ГАЕС, м; Δh – значення гідравлічного удару; T_W – постійна часу водоводу, с; k_Q – коефіцієнт, що зв'язує витрати води і величину відносного відкриття направляючого апарату.

При моделюванні слідкуючої системи ККД по напору приймалось, що для АСГД $P_G = \text{const}$.

На основі (8) та (9) в системі VisSim побудована математична модель оборотного гідроагрегату та повна структура САУ, яка дає можливість дослідити штатні режими роботи енергоблоку та режим корекції ККД гідроагрегату при зміні його напору та навантаження (рис. 5).

Проведена перевірка динаміки роботи синтезованої САУ з параметрами сучасних оборотних гідроагрегатів при їх роботі в штатних режимах з синхронною частотою обертання. Оцінки працездатності синтезованої системи управління в усіх режимах проводилась для умов найбільшої в Європі Дністровської ГАЕС. Щоб оцінити коректність роботи моделі проведено моделювання перехідних процесів при змінах 25 %, 50 % та 75 % номінального навантаження енергоблоку в штатному режимі його роботи з постійною синхронною частотою обертання. Результати моделювання показані на рис. 6-7.

Таким чином, отримана за допомогою математичного моделювання величина збільшення частоти обертання при скиданні 25% та 50% повного навантаження турбіни склали $1,08n_0$ та $1,154n_0$ відповідно. Для порівняння прийняті відповідні величини збільшення частоти обертання гідроагрегатів при аналогічних величинах зміни повного навантаження турбіни Дністровської ГАЕС в умовах їх натурних випробувань, які склали відповідно $1,058n_0$ і $1,145n_0$.

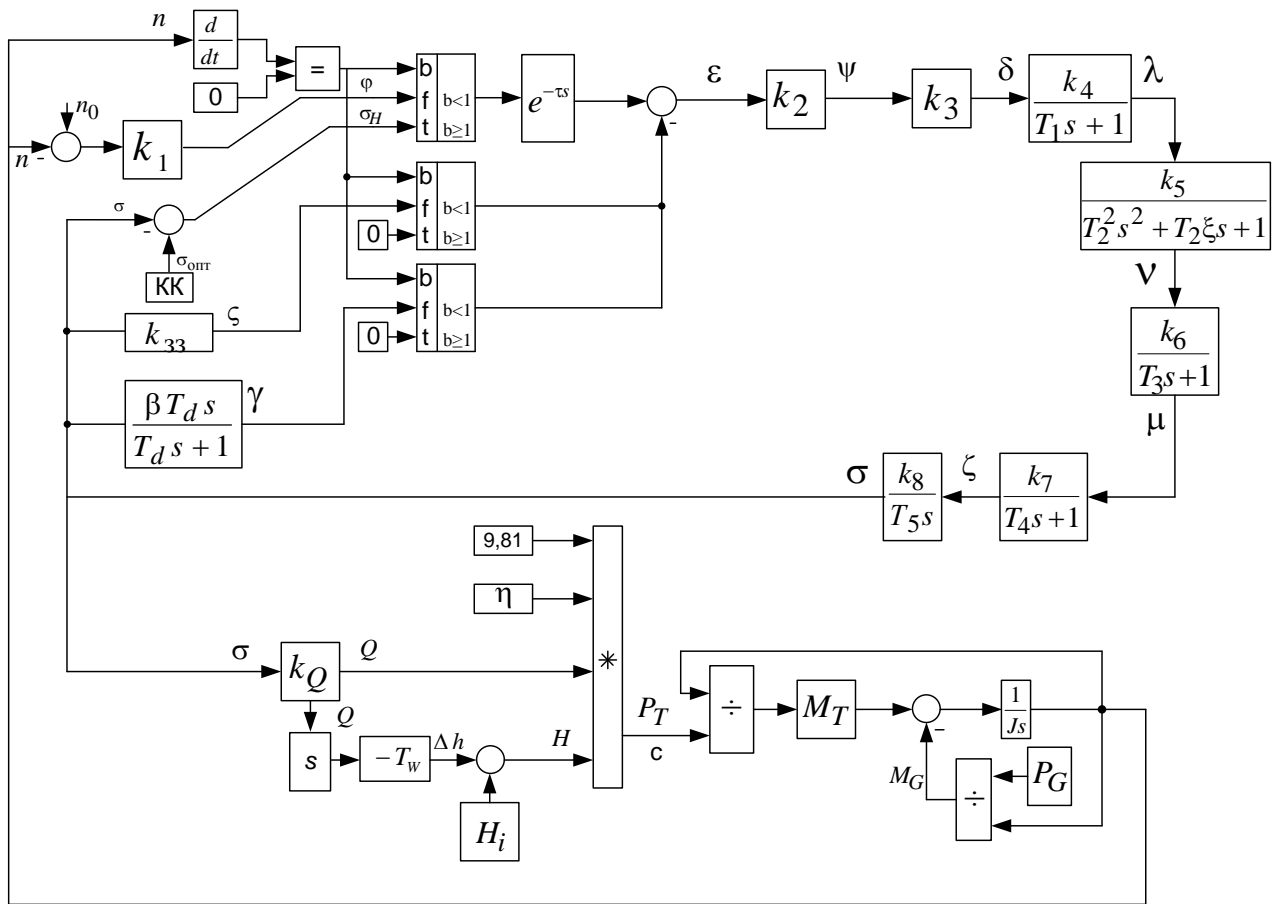
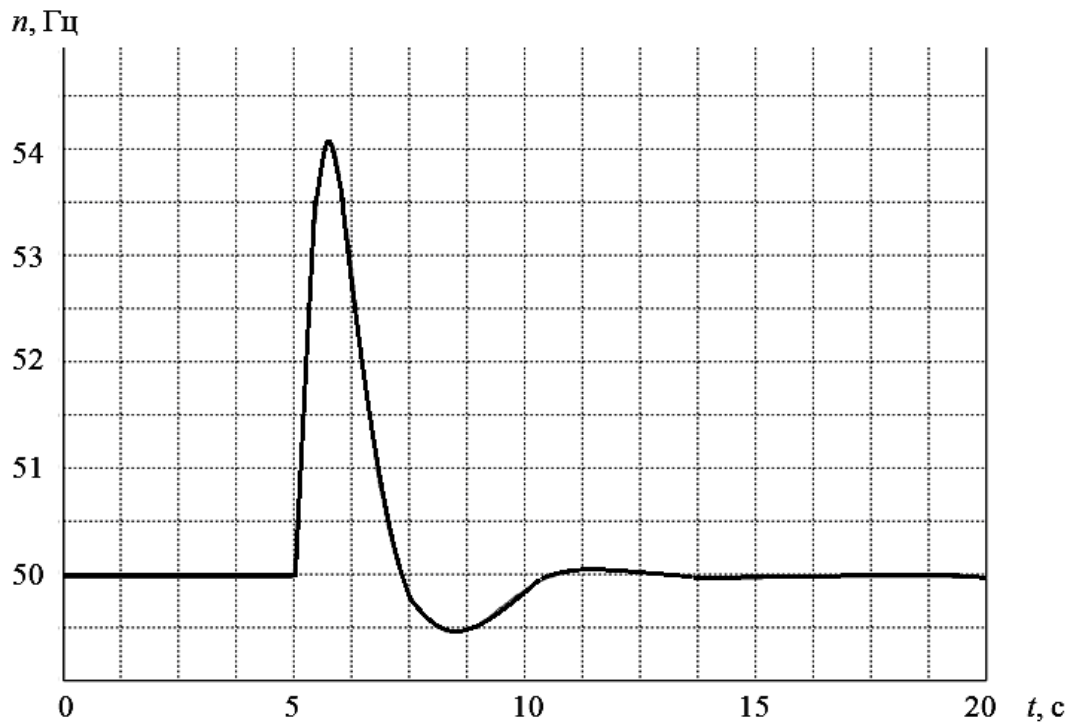


Рисунок 5 – Повна структура моделі САУ оборотного гідроагрегату

Рисунок 6 – Зміна частоти обертання турбіни в режимі з відключеним коректором ККД при зменшенні навантаження на 25 %, $k_{33} = 6\%$, $\beta = 4$, $T_d = 30$ с

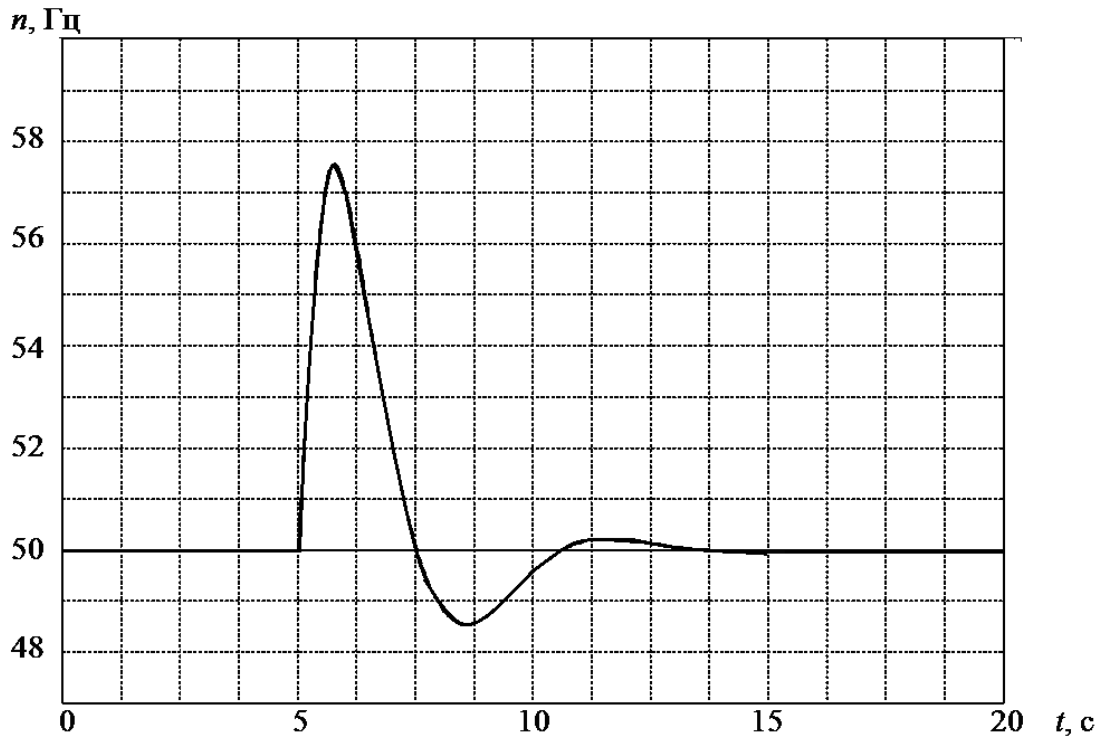


Рисунок 7 – Зміна частоти обертання турбіни в режимі з відключеним коректором ККД при зменшенні навантаження на 50 %, $k_{33} = 6\%$, $\beta = 4$, $T_d = 30$ с

Досліджена робота САУ при перемиканні ФР з режиму корекції ККД в режим роботи з синхронною частотою обертання (рис. 8). Як видно спочатку при виникненні збурення ФР перемикається на роботу з синхронною частотою обертання, а при досягненні сталого режиму знову підключає коректор ККД, який задає нове значення відкриття направляючого апарату турбіни, що відповідає поточним значенням напору на станції та навантаження генератора.

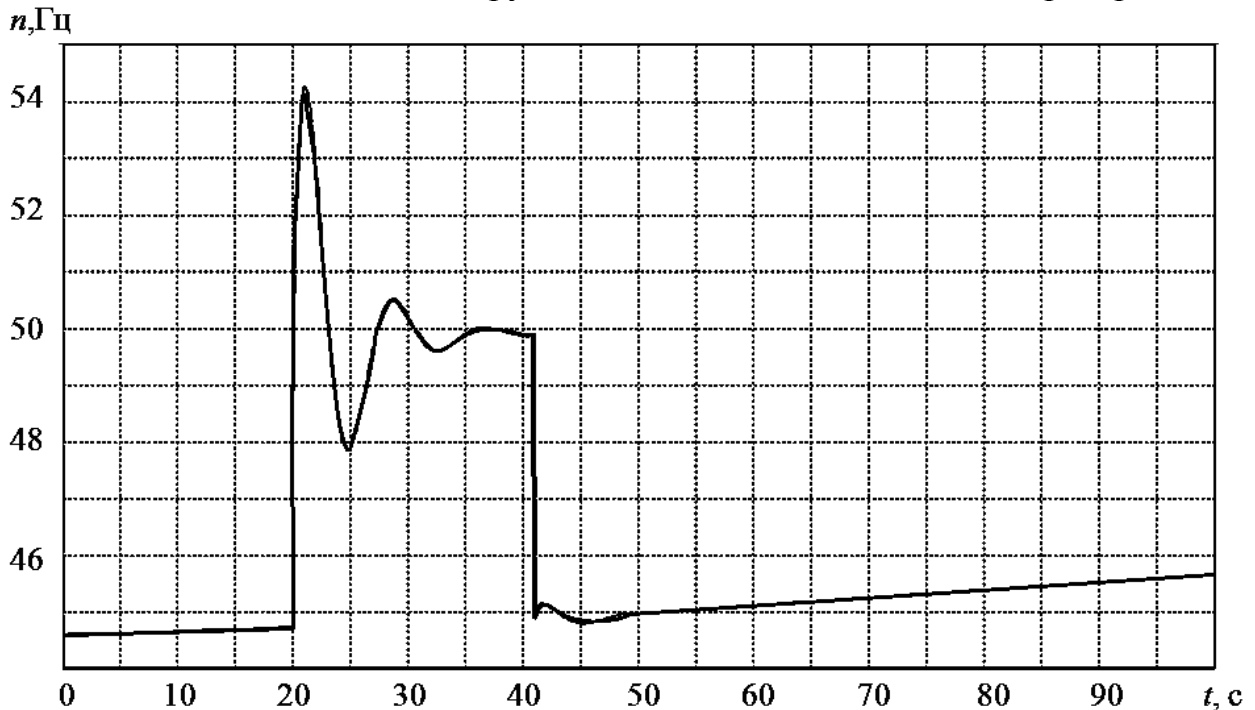


Рисунок 8 – Зміна частоти обертання турбіни при перемиканні ФР

На рис. 9 показано перехідний процес при зменшенні навантаження генератора на 30 %.

P , МВт

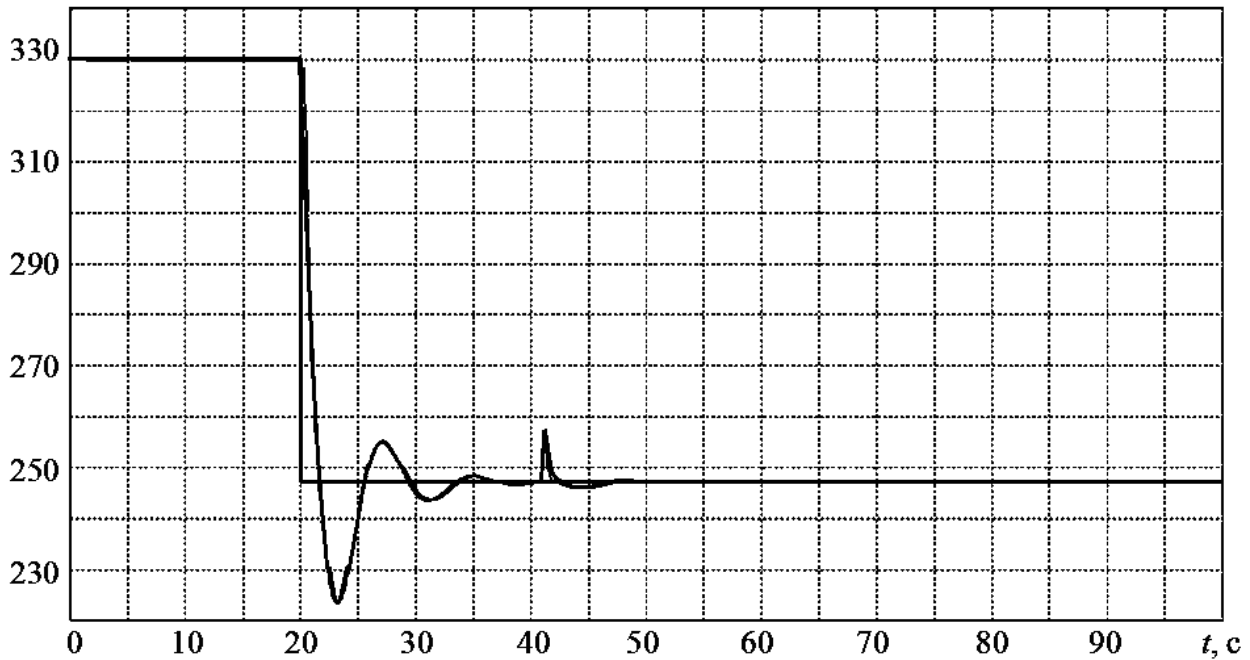


Рисунок 9 – Крива зміна потужності гідроагрегату

Сплеск потужності гідротурбіни, який спостерігається на 42 секунді, зумовлений перемиканням структури ЕГР на роботу зі змінною частотою обертання. При переключенні системи управління в режим слідкуючої системи по напору, регулятор змінює відкриття направляючого апарату, що призводить до виникнення явища гідроудару. Зважаючи на те, що гідроудар чинить зворотну дію зміні витрат води, це призводить до збільшення часу регулювання.

В **четвертому розділі** доведена можливість практичної реалізації синтезованої системи управління на базі мікропроцесорних пристроїв. Перераховані конкретні вузли та пристрої, які повинні застосовуватись при втіленні запропонованої системи управління на діючих об'єктах. Блок корегування ККД запропоновано виконати на базі програмованого логічного контролера (ПЛК).

Основним елементом ПЛК є центральний процесорний блок (ЦПБ), який здійснює логіку функціонування системи на основі програми. ЦПБ здійснює управління всіма входами та виходами пристрою. Оперативно запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) використовується для завантаження програми під час роботи ПЛК, а постійно запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) необхідний для зберігання самої програми та даних. Архітектура програмованого логічного контролера, на базі якого реалізується коректор ККД розробленої системи управління, показана на рисунку 10. Робота коректора ККД та фільтру режимів тісно пов'язана між собою, а саме, вхідний сигнал на спрацювання ФР поступає з дискретного виходу ПЛК. Цей сигнал пропорційний похідній від зміни частоти обертання робочого колеса гідроагрегату.

Для підвищення надійності запропонованої системи обґрунтовано доцільність активного резервування блоків ФР і КК і дані конкретні практичні ре-

комендації для організацій та фірм, які будуть розробляти такі системи управління. Для перевірки впливу зовнішніх факторів на роботу САУ досліджений вплив пульсацій в проточному тракті РО гідротурбіни на стійкість та точність синтезованої системи управління та показана висока поміхостійкість розробленої системи. Проведені розрахунки очікуваного ефекту від впровадження синтезованої САУ на ГАЕС України, які базуються на даних вартості електроенергії в турбінному та насосному режимах, наданих дирекцією Київського каскаду ГЕС-ГАЕС.

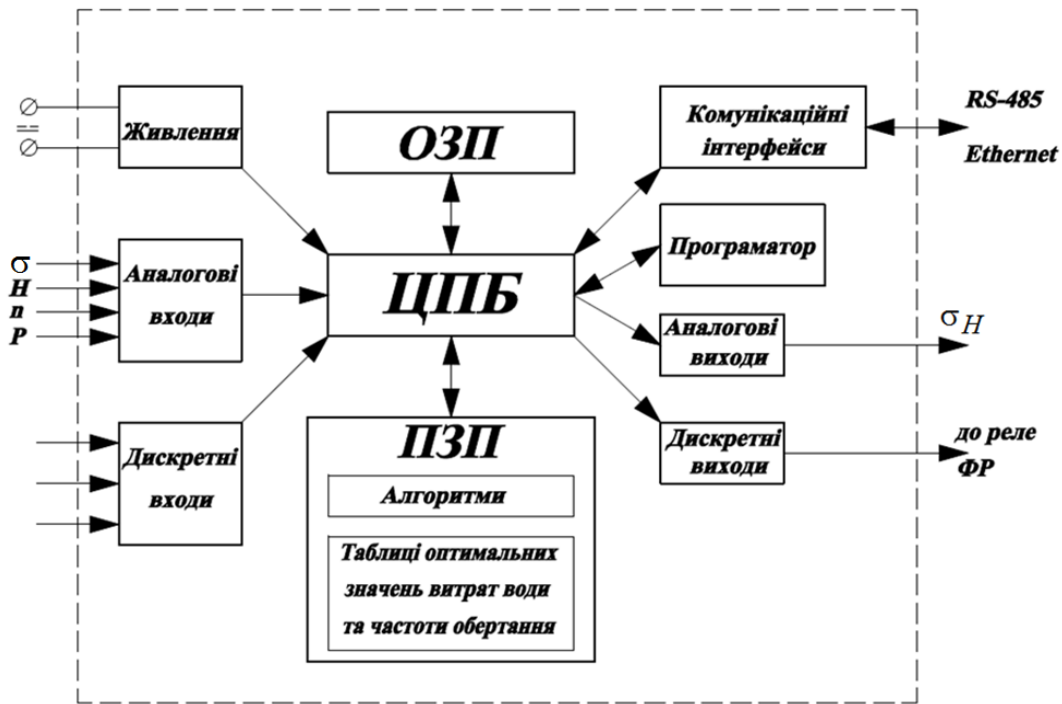


Рисунок 10 – Архітектура ПЛК для реалізації коректора ККД

Розрахунок техніко-економічного ефекту від впровадження нової системи управління оборотними гідроагрегатами ГАЕС полягає в оцінці додаткової виробки електроенергії, яку зможе віддати гідростанція в енергосистему в турбінному режимі, і заощадженої електроенергії, яку споживає ГАЕС для закачування води в верхній басейн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу створення системи автоматичного управління робочими процесами в оборотних гідроагрегатах ГАЕС, які працюють зі змінною частотою обертання, що дає можливість підвищити їх ККД як в турбінному, так і в насосному режимах роботи блоку при зміні напору води на станції.

Основні результати роботи полягають у наступному.

1. На основі розроблених критеріїв оптимальності та з застосуванням експертних оцінок визначено оптимальний склад оборотного гідроагрегату для середньо- та високонапірних гідроакumuлюючих електростанцій, що включає в себе радіально-осьову гідротурбіну і асинхронізований синхронний гідрогене-

ратор-двигун, робочі процеси в яких є об'єктом управління. Цей варіант оборотного гідроагрегату дозволяє без зниження якості електричної енергії, забезпечувати найвищі показники енергоефективності енергоблоку шляхом його переводу в режим роботи зі змінною частотою обертання.

2. Формалізовано задачу керування робочими процесами оборотних гідроагрегатів, що дало можливість удосконалити їх систему автоматичного управління. Це дасть можливість забезпечити найвищий коефіцієнт корисної дії за рахунок введення режиму роботи зі змінною частотою обертання при зміні напору води на станції.

3. Розв'язана задача синтезу структури системи автоматичного управління, яка передбачає зміну структури електрогідравлічного регулятора частоти обертання турбіни в залежності від режиму роботи оборотних гідроагрегатів і забезпечує належний рівень якості регулювання при перехідних процесах, пов'язаних з різкими змінами навантаження, а також підвищення коефіцієнту корисної дії гідротурбін в середньому на $3 \div 4$ %, в залежності від зміни напору. Такий підхід є доцільним з точки зору побудови адаптивних систем автоматичного управління оборотних гідроагрегатів і повністю відповідає поставленим задачам управління.

4. Запропоновано ввести в структуру системи автоматичного управління додаткові ланки, одна з яких забезпечує зміну структури електрогідравлічного регулятора в залежності від режиму роботи оборотних гідроагрегатів, а друга забезпечує оптимізацію коефіцієнту корисної дії шляхом регулювання відкриття направляючого апарату турбіни та його частоти обертання при зміні напору на станції та навантаження генератора.

5. Розроблена математична модель системи управління оборотними гідроагрегатами, які працюють зі змінною частотою обертання, яка відповідає системі зі змінною структурою та враховує гідравлічний удар в підвідних водоводах, а також включає канал стабілізації електромагнітного моменту асинхронізованого синхронного генератора. Розроблена модель дала можливість визначити працездатність синтезованої системи та відповідність якості її регулювання встановленим нормативним документам на постачання таких систем для гідроелектростанцій.

6. Визначені практичні рекомендації для реалізації синтезованої системи автоматичного управління установам та підприємствам, які проектують та виготовляють автоматизовані системи управління для гідроелектростанцій. Для цього запропоновано використовувати програмовані логічні контролери, які добре інтегруються в структуру сучасних електрогідравлічних регуляторів.

7. Результати наукових досліджень дисертаційної роботи втілені в проектну та експлуатаційну практику НВП ТОВ «Енергорегулятор» (м. Харків), ТОВ «Харківтурбоінжиніринг», інституту «Укргідропроект», а також впроваджені в навчальний процес кафедри електричних станцій НТУ «ХП» при підготовці студентів за спеціальностями – «Електричні станції» та – «Енергетичний менеджмент».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Червоненко І. І. Шахтні гідроакумулюючі електростанції з підвищеною ефективністю роботи гідроагрегатів / С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – Вип. 23. – С. 3-9.

Здобувачем проведена оцінка перспективних видів ГАЕС та рекомендовано перевід їх агрегатів в режим роботи зі змінною частотою обертання.

2. Червоненко І. І. Шахтні ГАЕС і шляхи підвищення ефективності їх роботи / С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне: НУВГП. – 2013. – Вип. 2(62). – С. 284-290.

Здобувач обґрунтував доцільність будівництва підземних ГАЕС і визначив найбільш дієвий метод підвищення ефективності їх гідроагрегатів.

3. Червоненко І. І. Система регулювання оптимального ККД гідроагрегатів, що працюють зі змінними напорами / С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ. – 2013. – № 6. – С. 68-70.

Здобувачем сформульовані вимоги до систем автоматичного управління оборотними гідроагрегатами, які працюють зі змінною частотою обертання.

4. Червоненко І. І. Заощадження енергоресурсів за рахунок підвищення ефективності використання гідроагрегатів при їх роботі зі змінною частотою обертання / С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко // Енергетика, економіка, технології, екологія. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – № 2 (36). – С. 7-10.

Здобувач розрахував економічний ефект від впровадження систем управління гідроагрегатів ГАЕС, які працюють зі змінною частотою обертання.

5. Червоненко И. И. Повышение энергоэффективности гидроаккумулирующих электростанций / С. Ф. Артюх, В. В. Галат, В. В. Кузьмин, И. И. Червоненко, Ю. Г. Шакарян, П. В. Сокур // Электрические станции. – М. – 2014. – № 8. – С. 33–37.

Здобувачем показана можливість та доцільність використання різних типів асинхронізованих синхронних генераторів у складі енергоблоку ГАЕС.

6. Chervonenko I. I. Improving the energy efficiency of Pumped-storage power plants / S. F. Artyukh, V. V. Galat, V. V. Kuz'min, I. I. Chervonenko, Yu. G. Shakaryan, P. V. Sokur // Power Technology and Engineering. – 2015. – № 5. – P. 396-399.

Здобувач визначив оптимальний склад оборотного гідроагрегату ГАЕС.

7. Червоненко И. И. Исследование динамических свойств системы управления обратимых гидроагрегатов, работающих с переменной частотой вращения / И. И. Червоненко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2015. – № 3/2 (75). – С. 60-65.

8. Червоненко І. І. Заощадження енергоресурсів за рахунок підвищення ефективності використання гідроагрегатів при їх роботі зі змінною частотою обертання / С. Ф. Артюх, І. І. Червоненко // Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2014: тез. доп. Міжнародної науково-практичної та

навчально-методичної конференції. 27 – 29 травня 2014. – Київ: НТУУ «ХПІ». – С. 11-12.

Здобувач довів можливість підвищення ККД оборотних гідроагрегатів ГАЕС при їх роботі зі змінною частотою обертання.

9. Червоненко И. И. Система автоматического поддержания оптимального КПД гидроагрегатов, работающих с переменной частотой вращения / И.И. Червоненко // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование: тез. доп. Международной научно-практической конференции. 15-17 жовтня 2014. – Харків, 2014. – С. 255.

10. Патент України на винахід №106823, МПК E02B 9/00. Шахтна гідроакumuлююча електростанція / Артюх С. Ф., Болюх В. Ф., Махотіло К. В., Червоненко І. І.; патентовласник НТУ «ХПІ». – № а201302915 / заявл. 11.03.2013; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 19.

Здобувачем розроблена частина патенту, яка стосується безпосередньо конструкції ГАЕС.

АНОТАЦІЇ

Червоненко І. І. Структурний синтез системи автоматичного управління оборотних гідроагрегатів, які працюють зі змінною частотою обертання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2015.

Дисертація присвячена удосконаленню системи автоматичного управління оборотними гідроагрегатами, які працюють зі змінною частотою обертання. На підставі аналізу універсальних характеристик сучасних оборотних гідроагрегатів, доведено можливість суттєво підвищити їх енергоефективність при роботі зі змінною частотою обертання. Досліджено способи отримання синхронної частоти напруги на шинах енергоблоку при несинхронній частоті обертання ротора. Обґрунтовано оптимальний склад оборотного гідроагрегату для його роботи зі змінною частотою обертання. Синтезовано перспективну систему автоматичного управління (САУ) оборотним гідроагрегатом гідроакumuлюючої електростанції (ГАЕС), до складу якого входять радіально-осьова гідротурбіна та асинхронізований синхронний генератор-двигун. Розроблено математичну модель, яка дає можливість дослідити роботу синтезованої САУ в режимі роботи з синхронною частотою обертання і в режимі корекції ККД турбіни при зміні напору на станції та навантаження генератора. Запропоновано шляхи практичної реалізації САУ, розраховано очікуваний економічний ефект від її впровадження на ГАЕС України.

Ключові слова: система автоматичного управління, система управління зі змінною структурою, структурний синтез, оборотний гідроагрегат, енергоефективність, математична модель роботи гідроагрегату.

Червоненко И. И. Структурный синтез системы автоматического управления обратимых гидроагрегатов, работающих с переменной частотой вращения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

Диссертация посвящена совершенствованию системы автоматического управления (САУ) обратимыми гидроагрегатами, которые работают с переменной частотой вращения.

Проанализированы существующие методы повышения эффективности работы обратимых гидроагрегатов, работающих с переменными напорами, и системы автоматического управления таких гидроагрегатов. На основании анализа универсальных характеристик современных обратимых гидротурбин доказана возможность существенного повышения их энергоэффективности при работе с переменной частотой вращения.

Обоснован оптимальный состав обратимого гидроагрегата, который работает с переменной частотой вращения. Доказано, что наиболее эффективным является использование в составе энергоблока гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) радиально-осевой гидротурбины и асинхронизованного синхронного генератора.

Для синтеза системы управления гидроагрегатами ГАЭС разработаны алгоритмы работы САУ в штатных режимах ее работы. САУ представляет собой систему с переменной структурой, которая включает в себя: штатный электрогидравлический регулятор частоты вращения гидротурбины, который обеспечивает динамическую устойчивость гидроагрегата при резких изменениях нагрузки от сети и все штатные режимы работы гидроагрегата; системы оптимизации коэффициента полезного действия (КПД) гидротурбины, которая обеспечивает необходимое изменение расхода воды через турбину при изменении напора на станции и нагрузки генератора для поддержания наиболее эффективного КПД гидроагрегата; канала регулирования и стабилизации электромагнитного момента гидрогенератора блока ГАЭС.

Разработана структура канала коррекции КПД. С целью разделения функций системы управления, в зависимости от режимов ее работы, и необходимой перестройки структуры регулятора, вводится специальный переключатель – фильтр режимов (ФР), который устанавливается между выходом чувствительного элемента электрогидравлического регулятора и его усилителем.

В установившемся режиме работы энергоблока ГАЭС ФР «разрывает» замкнутый контур регулирования частоты вращения и подключает на вход усилителя вместо чувствительного элемента дополнительный блок – «Корректор КПД».

Корректор КПД анализирует величины действующих значений напора, открытия направляющего аппарата, частоты вращения и нагрузки генератора, поступающих от датчиков, и определяет необходимое для данного режима оп-

тимальное значение открытия направляющего аппарата, которое обеспечивает получение высокого КПД турбины.

Для проверки работоспособности системы управления обратимым гидроагрегатом разработана ее математическая модель, которая дает возможность исследовать работу синтезированной САУ в режиме работы с синхронной частотой вращения и в режиме коррекции КПД турбины при изменении напора на станции. При создании математической модели учтено явление гидравлического удара в подводящих водоводах и рабочем колесе турбины, что оказывает сильное воздействие на динамику процесса регулирования, особенно для ГАЭС с большими напорами.

Даны рекомендации по практическому внедрению предложенной системы управления обратимыми гидроагрегатами на гидростанциях. Рассчитан ожидаемый эффект от внедрения новой системы автоматического управления на ГАЭС Украины.

Ключевые слова: система автоматического управления, система управления с переменной структурой, структурной синтез, обратимый гидроагрегат, энергоэффективность, математическая модель работы гидроагрегата.

Chervonenko I. I. Structural synthesis of an automated control system for pumped-storage variable-speed hydropower units. – As manuscript.

The thesis for the degree of technical sciences candidate by specialty 05.13.07 – process control automation. – National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute», Kharkiv, 2015.

The thesis is devoted to the improvement of an automatic control system for pumped-storage variable-speed hydropower units. On the basis of analysis of modern reversible pump turbines universal characteristics, the feasibility of significantly increasing their efficiency under operation at variable speed is proved. Methods of obtaining synchronous voltage on the hydro-unit buses under the turbine rotor nonsynchronous speed are studied. The optimal reversible pump turbine configuration has been substantiated. A new control system for a pumped-storage hydro-unit with a Francis turbine and an asynchronized synchronous generator-motor is synthesized. A mathematical model of the pumped-storage hydro-unit control system is worked out to research into the synthesized control system operation both in the synchronous speed mode and under the turbine efficiency correction due to changing the head available to the hydroplant and the generator load. Proposals as for the designed control system implementation are given, the economic potential of its application in Ukrainian pumped-storage hydroplants calculated.

Key words: automatic control system, variable-structure control system, structural synthesis, pumped-storage hydro-unit, energy efficiency, hydro-unit mathematical model.

