

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повна вища освіта)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повна вища освіта, наука факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електронної та телекомунікацій

(повна вища освіта кафедри (проектної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему

**Розроблення та дослідження системи автоматичного регулювання
активної потужності гідроагрегату міні-ГЕС**

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(цифру і назву напрямку підготовки, спеціальності)

Вітченко Є.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Кожушко Г.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кирилюк С.Г.


(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і
робототехніки
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
 електроніки та телекомунікацій

 О.В. Шефер
 “ 02 ” 09 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вітченку Євгенію Вячеславовичу

1. Тема проекту (роботи) «Розроблення та дослідження системи автоматичного регулювання активної потужності гідроагрегату міні-ГЕС»
 керівник проекту (роботи) Кожушко Григорій Мефодійович, д.т.н., проф.
 затверджена наказом вищого навчального закладу від “ 09 ” 09 2024 року № 818-р, а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.12.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Установлена потужність ГЕС - 500 кВт; максимальні витрати води 1,15 м³/с; тип гідротурбіни – радіально-вісьова.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Обґрунтування силової схеми генераторного комплексу. Огляд и вибір типу гідротурбіни. Постановка задач на магістерську роботу. Побудова і аналіз лінійної моделі об'єкта управління. Аналіз динамічних властивостей об'єкта управління. Розробка структури системи управління та методики синтезу регуляторів гідроагрегатів міні-ГЕС на основі машини подвійного живлення. Розробка структури системи управління гідроагрегату міні-ГЕС. Моделювання динамічних режимів роботи двоконтурної САР активної потужності гідроагрегату на основі МПЖ. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів)
 - 1) Технологічна схема міні -ГЕС
 - 2) Структурна схема математичної моделі радіально-осьової гідротурбіни
 - 3) Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ
 - 4) Математична модель РВ гідротурбіни з урахуванням кінетичної енергії води в водогоні

- 5) Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПДЖ
 6) Математична модель контуру регулювання швидкості ГА на основі машини подвійного живлення
 7) Перехідні процеси ГА по кутовій швидкості вала і витраті води
 8) Плакати дослідної частини
- б. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітки (підписи)
		Термін	Категорія	Відсоток	
1	Обґрунтування силової схеми генераторного комплексу	07.10.24		15%	Пл. 1
2	Огляд и вибір типу гідротурбіни. Постановка задач на магістерську роботу	16.10.24	I	25%	Пл. 2
3	Побудова і аналіз лінійної моделі об'єкта управління	05.11.24		40%	Пл. 3
4	Аналіз динамічних властивостей об'єкта управління	12.11.24		50 %	Пл. 4
5	Розробка структури системи управління та методики синтезу регуляторів гідроагрегатів міні-ГЕС на основі машини подвійного живлення	19.11.24	II	60%	Пл. 5
6	Розробка структури системи управління гідроагрегату міні-ГЕС	26.11.24		70%	Пл. 6
7	Моделювання динамічних режимів роботи двоконтурної САР активної потужності гідроагрегату на основі МПДЖ	11.12.24		90%	Пл. 7
8	Оформлення пояснювальної записки	19.12.24	III	100%	Пл. 8

Магістрант

ЛІ
(підпис)

Вітченко Є.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Кожушко
(підпис)

Кожушко Г.М.

(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	5
1. Обґрунтування силової схеми генераторного комплексу.....	9
1.1 Роль міні-ГЕС в енергосистемі.....	9
1.2 Способи управління активною потужністю гідроагрегату міні-ГЕС	12
1.3 Математичний опис системи векторного керування машини подвійного живлення.....	20
1.4 Огляд и вибір типу гідротурбіни.....	24
1.5 Статичні характеристики радіально-осьової гідротурбіни.....	36
2. Математичне моделювання гідротурбіни з напірного водоводу.....	46
2.1 Динамічні характеристики радіально-осьової гідротурбіни з напірним водоводом.....	46
2.2 Математичний опис гідротурбіни в абсолютних величинах.....	54
2.3 Математичний опис радіально-осьової гідротурбіни в відносних величинах	57
3. Побудова і аналіз лінійної моделі об'єкта управління.....	66
3.1 Передавальні функції гідроагрегату, керованого по частоті обертання валу	66
3.2 Аналіз динамічних властивостей об'єкта управління.....	73
4. Розробка структури системи управління та методики синтезу регуляторів гідроагрегатів міні-ГЕС на основі машини подвійного живлення.....	78
4.1 Розробка структури системи управління гідроагрегату міні-ГЕС....	79
4.2 Методика синтезу контуру регулювання швидкості гідроагрегату на основі МПЖ.....	82
4.3 Методика синтезу контуру регулювання активної потужності гідроагрегату на основі МПЖ.....	87
4.4 Моделювання динамічних режимів роботи двоконтурної САР активної потужності гідроагрегату на основі МПЖ.....	92
Висновки.....	110
Література.....	112
Додатки.....	116

ВСТУП

Сучасна електроенергетика зіткнулася з проблемою виснаження традиційних енергоресурсів при одночасному зростанні споживання електроенергії. В результаті, в зимовий час Україна відчуває нестачу електроенергії. Тому назріла необхідність в інтенсивному освоєнні відновлюваних джерел енергії. Основним таким джерелом в Україні є малі річки, що мають витрату близько $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Рельєф місцевості дозволяє створювати гідропороди ГЕС з перепадом висот від декількох десятків до декількох сотень метрів.

Сучасна ситуація в країні вимагає економічної експлуатації міні-ГЕС. Це найбільш актуально в зимову пору року, яке характеризується меншою витратою води по руслах річки в порівнянні з літнім періодом. У той же час, в зимовий період споживання електроенергії зростає в порівнянні з літнім. Виходом з даної ситуації є створення або модернізація міні-ГЕС з можливістю зміни вироблення електроенергії відповідно до добового графіка електричного навантаження. Така міні-ГЕС повинна мати басейн добового регулювання для запасання води вночі. Протягом доби міні-ГЕС повинні автоматично оперативно змінювати вироблення електроенергії, щоб підтримувати баланс між споживаною потужністю і активною потужністю, що генерується.

Великі ГЕС, що мають кваліфікований черговий персонал, здійснюють автоматичне регулювання активної потужності, що генерується P_e , шляхом зміни відкриття направляючого апарату (НА) гідротурбін. В основному режимі роботи гідроагрегату його кутова швидкість визначається частотою мережі, до якої підключений статор синхронного генератора, а необхідне значення P_e забезпечується установкою відповідного кута відкриття НА.

Суттєвою особливістю такого регулювання P_e є тривалий характер перехідних процесів. Час їх загасання складає десятки секунд [2,3,4,5], що обумовлено неможливістю швидкої зміни швидкості руху води в водогоні. Зменшення P_e виробляють шляхом закриття НА, що викликає зменшення кінетичної енергії води в водогоні. Основна частина енергії гальмування води

перетворюється турбіною в механічну роботу. В результаті, закриття НА спочатку (протягом декількох секунд) призводить до збільшення P_e , і тільки потім починається бажане зниження величини P_e . Аналогічна зміна регульованої величини P_e , на початковій ділянці перехідного процесу в сторону, протилежну керуючому впливу, спостерігається і при переході в режим збільшення P_e .

Тому, експлуатовані нині ГЕС нездатні компенсувати швидкі порушення балансу між споживаною потужністю і потужністю, що генерується в енергосистемі.

При більш інтенсивному використанні гідроенергоресурсів (відсутність холостих водоскидів, використання акумулюючої здатності водосховища) вплив на напрямні апарати гідротурбін здійснюється автоматично системою регулювання P_e за допомогою гідроприводів гідромеханічних блокувань, для роботи яких необхідна маслонапірна установка. Перераховане обладнання вимагає кваліфікованого обслуговування.

В склад стандартних гідроагрегатів (ГА), входить: радіально осьова (РО) гідротурбіна, генератор, затвор, байпас, система підвідних і відвідних водоводів і сервомоторів направляючого апарату. В розглянутих роботах не передбачено регулювання вироблюваної електроенергії зміною частоти обертання гідротурбіни. Розглянуті методи регулювання ГА недоцільно застосовувати в міні-ГЕС, тому що ГА міні-ГЕС повинні працювати в автоматичному режимі, не маючи чергового персоналу.

Регулювання активної потужності шляхом зміни кутової швидкості валу турбіни можливо при використанні асинхронних генераторів з короткозамкненим ротором (АГ), асинхронних генераторів з фазним ротором (АГФР) і синхронних генераторів (СГ) [2-8].

Вимоги стабілізації параметрів електроенергії, що виробляється, при змінній кутової швидкості валу гідротурбіни призводять до двох варіантів побудови генераторного комплексу (ГК) [3]: з механічними (диференціальні редуктори, гідромеханічні і пневмомеханічні пристрої) і електричними

(статичні перетворювачі частоти (ПЧ)) регуляторами. Обидва варіанти забезпечують необхідну стабілізацію параметрів вироблюваної електроенергії, проте другий, що відрізняється простотою механічної частини ГК, більш прийнятний. В цьому випадку ГК може бути побудований як на базі АГФР з ПЧ в колі ротора (машина подвійного живлення (МПЖ)), так і за схемою АГ з ПЧ в колі статора, або СГ з ПЧ в колі статора. Потужність ПЧ в ланцюзі ротора АГФР для ГК за схемою МПЖ прямо пропорційна частоті ковзання.

Потужність ПЧ в колі статора АГ (СГ) розрахована на передачу всієї активної потужності генератора, що збільшує капітальні витрати і втрати в ПЧ [3-4]. У зв'язку зі сказаним, доцільно використовувати в якості генератора машину подвійного живлення з ПЧ в колі ротора.

Відомі з літератури [5-7] ГК на основі МПЖ і системи управління ними орієнтовані на їх застосування в вітроенергетичних установках. Застосування в якості первинного двигуна гідротурбіни зажадає обліку її статичних і динамічних характеристик при синтезі регуляторів системи управління МПЖ-генератором гідроагрегату.

Підвищення якості електропостачання споживачів вимагає підвищення маневреності генеруючих потужностей електроенергетичної системи [9].

Для оперативної зміни вироблення активної потужності в аварійних режимах роботи електроенергетичної системи необхідно забезпечити високу швидкодію САР активної потужності гідроагрегату з відпрацювання позапланового завдання активної потужності міні-ГЕС, що генерується. Це дозволить швидше відновлювати раптові порушення балансу між споживаною і генерованою активними потужностями в електроенергетичній системі.

Метою магістерської роботи є підвищення швидкодії системи автоматичного регулювання активної потужності гідроагрегату за рахунок застосування генератора зі змінною частотою обертання валу шляхом формування необхідного значення електромагнітного моменту генератора.

Для досягнення постановленої мети потрібно було вирішити такі завдання:

1. На підставі порівняльного аналізу робочих характеристик гідротурбін обґрунтувати тип гідротурбін, найбільш придатний для регулювання активної потужності шляхом зміни числа обертів.
2. Отримати математичну модель радіально-осьової гідротурбіни з напірним водоводом для побудови систем управління активною потужністю гідроагрегату зі змінною частотою обертання валу.
3. Обґрунтувати математичну модель керованої по ротору МПЖ, адекватну завданню побудови систем регулювання швидкості і активної потужності гідроагрегату.
4. Розробити методику розрахунку сумарного моменту інерції на валу гідроагрегату і постійної часу напірного водоводу для забезпечення працездатності гідроагрегату в режимі обмеження електромагнітного моменту.
5. Розробити методику синтезу регулятора швидкості, що дозволяє забезпечити прийнятне за швидкодією і коливальності якість гідромеханічних перехідних процесів.
6. Розробити методику синтезу регулятора активної потужності гідроагрегату.

1. ОБҐРУНТУВАННЯ СИЛОВОЇ СХЕМИ ГЕНЕРАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ

1.1 Роль міні-ГЕС в енергосистемі

У магістерській роботі розглянуто міні-ГЕС з водосховищем добового регулювання, приєднана до електричної мережі нескінченної потужності. Даний тип гідроелектростанцій є складовою частиною єдиної електроенергетичної системи (ЄЕС).

Електричні станції, що працюють спільно на загальну електричну мережу, лінії передачі, що підвищують і знижують підстанції, складають ЄЕС. Високовольтні лінії електропередачі, пов'язуючи між собою окремі системи, дозволяють створювати об'єднані енергосистеми. Для призначення режиму і оперативного управління роботою ГЕС і мереж організовані об'єднані диспетчерські управління (ОДУ) і диспетчерські управління систем.

Міні-ГЕС можуть бути використані в енергосистемі:

1. для вироблення електричної енергії;
2. для покриття невеликих піків електричного навантаження ЄЕС.

У даній роботі розглядаються тільки добові коливання електричного навантаження енергосистеми (тому що водосховище міні-ГЕС мале), які визначаються нерівномірним режимом споживання електричної енергії населенням. Дані коливання навантаження відбуваються при одночасному зростанні споживання електричної енергії, що відбувається внаслідок приєднання нових споживачів.

На рис. 1.1 показаний добовий графік електричного комунально-побутового навантаження. Добовий графік електричного навантаження характеризується зміною навантаження $P_{\text{наг}}$ протягом доби.

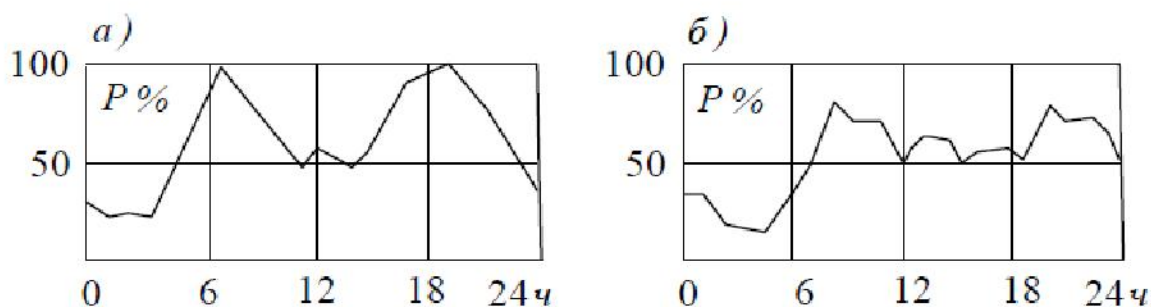


Рисунок 1.1 - Графік добового навантаження енергосистеми. Комунально-побутове навантаження; а - зимовий день, б - літній день

Дані графіки (рис. 1.1) наведені для зимового і літнього часу. З графіків видно, що пік навантаження припадає на ранковий і вечірній час. У зимовий час витрата електроенергії більше ніж в літню пору року. Разом з тим, взимку водостік в рази менше ніж влітку. Осінній - зимовий водостік однієї з річок, яка характеризує водостік на рис. 1.2.

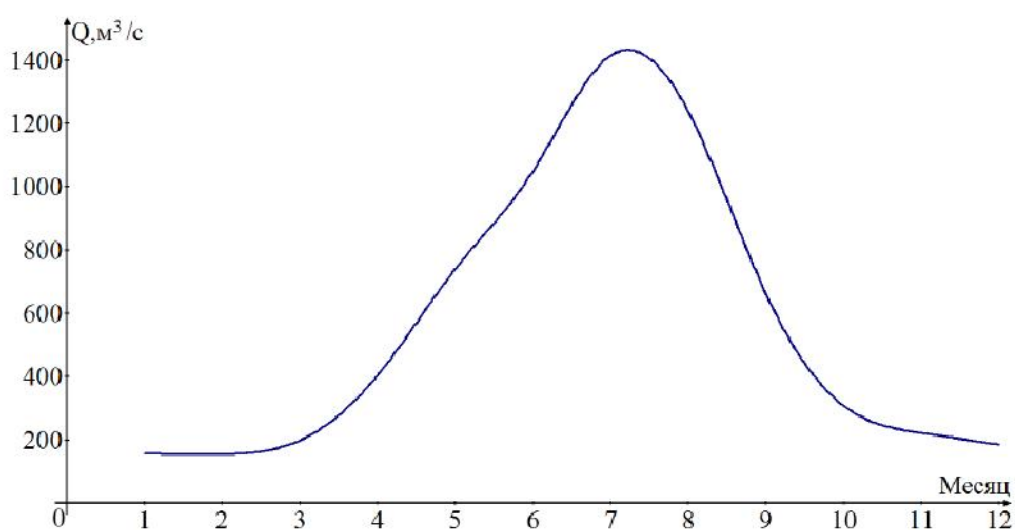


Рисунок 1.2 - Середньорічний річковий стік річки Ворскла за рік

Ворскла — одна з найбільших лівих приток Дніпра. Долина річки трапецієподібна, завширшки 10—12 км. Практично на всій протяжності правий берег високий і крутий, лівий низький і подекуди болотистий. Ширина

плеса річки в середній і нижній течії бл. 40 метрів, іноді перевищує 100 метрів. Середня глибина 1,5 м, максимальна — 10—12 м. Похил річки 0,3 м/км.

Живлення мішане. Замерзає на початку грудня, скресає у березні. Найвищі річні води — у березні — квітні, найнижчі — у липні — жовтні. Середьорічна витрата води біля Кобеляків — 33,4 м³/с. Мінералізація води становить: весняна повінь — 672 мг/дм³; літньо-осіння межень — 766 мг/дм³; зимова межень — 775 мг/дм³.

З рис. 1.2 видно, що основний стік води річки Ворскла приходить в період з травня по вересень і становить 76,0% від річного стоку [4]. Звідси випливає, що в зимовий період водостік річок зменшується, а потреба електроенергії збільшується (рис. 1.1), а при проектуванні міні-ГЕС для розрахунків беруть зимовий стік води, що занижує встановлену потужність міні-ГЕС.

Для того щоб мати можливість швидко збільшити активну потужність, що генерується, і покривати добовий графік електричного навантаження енергосистеми, необхідно будувати міні-ГЕС з водосховищем добового регулювання, для покриття піків електричного навантаження енергосистеми.

Добове регулювання дозволяє підвищити участь мінігідроелектростанцій в покритті максимуму навантаження системи, знизити потребу в потужності інших електростанцій і поліпшити режим їх роботи. У меженний період при цілодобовій роботі на постійній приточній витраті гідроелектростанція може розвивати порівняно невелику потужність. При роботі з добовим регулюванням міні-ГЕС з добовим водосховищем в години пікового навантаження розвиває підвищену потужність, а в години мінімального навантаження знижує свою потужність і акумулює воду у водосховищі.

1.2 Способи управління активною потужністю гідроагрегату міні-ГЕС

Існують кілька варіантів регулювання активної потужності міні-ГЕС. Розглянемо по черзі всі варіанти.

Регулювання баластним опором. На автономних міні-ГЕС встановлюють гідротурбіни без маслонапірних установок, направляючий апарат встановлюють на номінальний режим роботи гідротурбіни, що не дозволяє економити воду при малому споживанні електроенергії. Як генератор використовують машини змінного струму. Автономні міні-ГЕС, як правило, не мають чергового персоналу. Зміна активної потужності, що генерується (P_e) виконується вручну впливом на напрямні апарати гідротурбін під час поточного огляду обладнання міні-ГЕС. Баланс між потужністю, що генерується, і споживаною активними потужностями забезпечується шляхом «викидання» зайвої вироблюваної електроенергії на реостати [41,42,43]. Рівень води у верхньому б'єфі водосховища обмежується шляхом холостого водоскиду. Даний спосіб регулювання вироблюваної електроенергії не є енергоефективним.

Регулювання активної потужності за допомогою направляючого апарату (НА). Розглянемо міні-ГЕС з одним гідроагрегатом (ГА) на основі синхронного генератора (СГ), підключеного до мережі нескінченної потужності. Потужність СГ дуже мала в порівнянні з мережею нескінченної потужності. Зміна режиму роботи СГ не може практично вплинути на величину напруги U_c або частоти f_c електроенергетичної системи. При паралельній роботі СГ з мережею нескінченної потужності напруга U_c і частота f_c на виводах СГ жорстко задані режимом всієї мережі і не залежать від струму збудження, струму навантаження і потужності самого СГ [14].

Отже, частота обертання СГ визначена частотою мережі нескінченної потужності, що впливає з співвідношення

$$\omega = \frac{2\pi f_c}{p_n},$$

де p_n - число пар полюсів СГ.

Міні-ГЕС, як правило, не мають чергового персоналу. При роботі СГ паралельно з мережею нескінченної потужності найбільш часто реалізуються два режими:

1. перший режим характеризується зміною (регулюванням) активної потужності генератора при постійному збудженні;
2. другий режим характеризується зміною збудження (регулюванням реактивної потужності) при сталості активної потужності генератора.

При паралельній роботі СГ з мережею нескінченної потужності зміна (збільшення/ зменшення) активної потужності, що генерується, проводиться двома способами:

1) вручну впливом на НА гідротурбін, під час поточного огляду обладнання міні-ГЕС;

2) в автоматичному режимі впливом на НА за допомогою гідроприводів.

Регулювання активної потужності ГА за допомогою НА не дозволяє отримати високу швидкодію, яке обмежена гідромеханічною інерцією системи.

Синхронний генератор з дволанковим перетворювачем частоти (ПЧ).

Регулювання активної потужності при змінній частоті обертання валу можна здійснити за допомогою СГ з дволанковим ПЧ в колії статора. Дані системи мають велику швидкодію, але мають істотний недолік: потужність ПЧ в статорі СГ розрахована на передачу всієї потужності генератора, що збільшує капітальні витрати і електричні втрати.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є використання асинхронних генераторів з фазним ротором (АГФР). Вимоги до стабілізації параметрів

електроенергії, що виробляється при змінній частоті обертання валу ГА призводять до варіанту побудови ГК з електричними регуляторами [15]. У нашому випадку ГК може бути побудований на базі АГ з ПЧ в роторному колі (машина подвійного живлення).

Машиною подвійного живлення. Принципово нові можливості для швидкої зміни генерованої активної потужності, P_e , надають генераторні комплекси на основі машини подвійного живлення. Використання асинхронної машини ГА давно цікавило дослідників, що працюють в області систем генерування електроенергії.

Новий етап в дослідженні асинхронних ГК пов'язаний з використанням для цієї мети МПЖ. Завдяки широким регульовальним можливостям МПЖ-генератор займає рівноправне місце в ряду альтернативних ГК, а за деякими показниками має суттєві переваги. Нові перспективи застосування МПЖ-генератор отримав завдяки останнім досягненням в області силової електроніки, створення сучасних перетворювачів частоти, які забезпечують практично синусоїдальну форму струмів в фазах електричної машини.

Роботи по дослідженню та впровадженню МПЖ-генератора в вітроенергетику, суднові валогенераторні установки ведуться і за кордоном. Наприклад, в Японії фірмою Hitachi, в Норвегії - ABB KraftAs і ABB Corporate Research, в Австралії-Rainbow Power Company, в Німеччині - AKW, Siemens [13]. Накопичено значний світовий досвід в розробці та дослідженні МПЖ-генераторів.

У даній роботі завдання побудови системи автоматичного управління активною потужністю МПЖ-генератора для гідроагрегату міні-ГЕС розглядається в світлі проблеми створення автоматичного електропривода, що працює в генераторному режимі, як базового елементу автоматизованої системи управління технологічним процесом вироблення електроенергії в об'єднаній електроенергетичній системі України.

Спрощена силова схема ГК на основі МПЖ показана на рис. 1.3.

Генератор являє собою асинхронну машину з фазним ротором (АМ), статор якої підключений до мережі, а ротор отримує живлення від напівпровідникового перетворювача частоти (ПЧ) [4, 9]. Напряга ПЧ по колу ротора АМ практично прямо пропорційно частоті ковзання. Змінюючи частоту живлення ротора, можна регулювати кутову швидкість вала генератора при синхронній роботі ГК з прилеглою енергосистемою. Це дозволяє регулювати потужність P_e , що віддається в мережу.

Силовa схема ГК, показана на рис. 1.3, застосовується у вітроенергетичних установках, що мають діапазон регулювання приблизно 1:2. ПЧ будують по силовій схемі, що дозволяє передавати активну потужність в обох напрямках. Встановлена потужність ПЧ прямо пропорційна максимально допустимій частоті ковзання. Даний ГК дозволяє в темпі електромагнітних перехідних процесів регулювати P_e шляхом зміни електромагнітного моменту M_e генератора. Таким чином, з'являється можливість в десятки разів зменшити час перехідних процесів $P_e(t)$ у порівнянні з експлуатованими в даний час ГК на основі синхронних генераторів, які працюють паралельно з мережею.

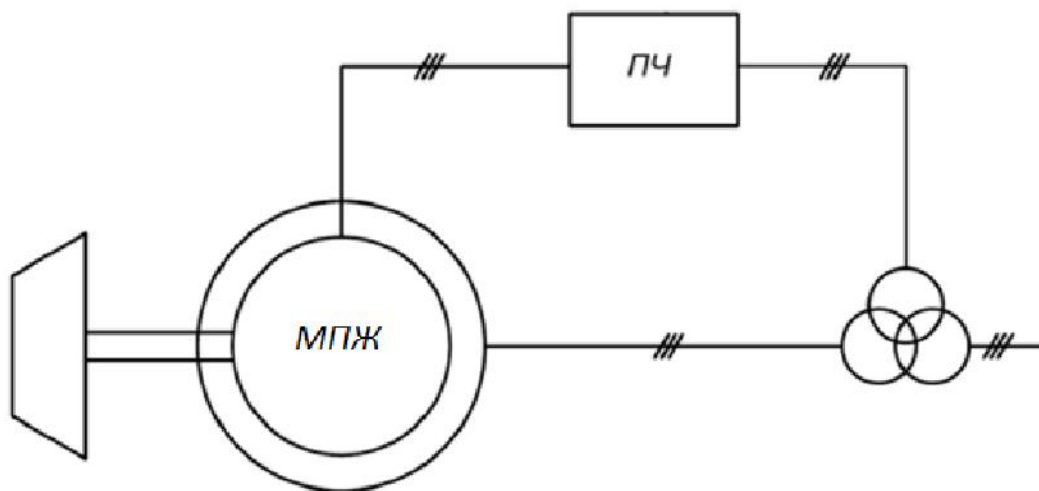


Рисунок 1.3 – Силовa схема ГК на основі МПЖ

Основна перевага міні-ГЕС на базі машини подвійного живлення складається в тому, що управління генератором здійснюється за рахунок перетворення не всієї, як в СГ з дволанковим ПЧ, а лише частини електричної енергії, від потужності генератором.

Дана силова схема широко застосовується в вітроенергетичних установках, що працюють на мережу нескінченної потужності. Регулювання генерується активної потужності P_E виробляється зміною частоти обертання вітротурбіни.

У [13] розглядається два алгоритму управління: для автономного режиму і для роботи на енергосистему потужність, якої перевищує потужність МПЖ в 10 разів. Пропоновані ними алгоритми найбільше підходять до двигунів внутрішнього згорання, вітроустановки і до міні-ГЕС з активними гідротурбінами, де зміна M_e ніяк не впливає на гідросистему.

Був проведений аналіз робіт і були виявлені наступні невирішені питання. В системі управління МПЖ в якості ПЧ був обраний дволанковий автономний інвертор струму (АІС), що є недоліком даної силової схеми - низька швидкодія по M_e внаслідок інерційності дроселя (рис. 1.4).

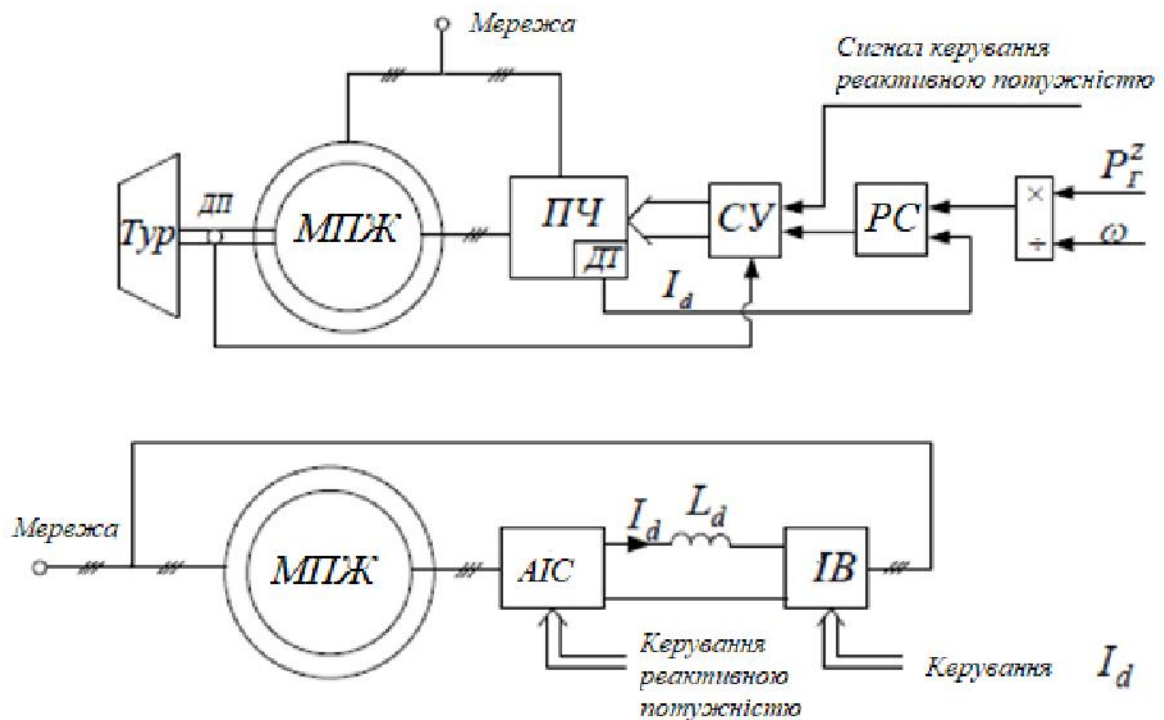


Рисунок 1.4 – Функціональна схема ГА на основі МПЖ з АІС

Авторами попередніх робіт не розв'язано такі завдання:

- не вивчені і не враховані статичні характеристики гідротурбіни;
- не враховано динамічні властивості гідротурбіни з водоводом, а саме, не прийнята до уваги кінетична енергія води в водогоні;
- розглянута система управління МПЖ не обмежує ковзання асинхронної машини в сталих і динамічних режимах;
- не розроблена методика синтезу регуляторів швидкості та активної потужності.

Необхідне продовження цих робіт в напрямках, пов'язаних з аналізом електромагнітних та електромеханічних процесів, синтезом систем автоматичного регулювання МПЖ-генератора, впливом на характеристики генератора типу перетворювача частоти і ін. Взаємодія гідротурбіни і МПЖ досліджено недостатньо.

За результатами зробленого огляду в ГА міні-ГЕС пропонується застосовувати систему векторного керування (СВК) на основі машини подвійного живлення [7]. Сучасні СВК електричними машинами змінного струму, виконані на основі транзисторних перетворювачів частоти, характеризуються високою швидкодією по електромагнітному моменту.

Постійна часу СВУ МПЖ по електромагнітному моменту, а відповідно і по активній потужності, для сучасних СВК електричними машинами змінного струму великої потужності становить від 0,005 до 0,02 сек.

Проти-ЕРС ротора прямо пропорційна величині абсолютного ковзання асинхронної машини. Тому вихідна напруга, на яку повинен бути розрахований перетворювач частоти, визначається переважно величиною максимального ковзання з робочого діапазону швидкостей. Крім того, за рахунок керування струмом ротора асинхронної машини можна забезпечити мінімум сумарних втрат.

Отже, МПЖ з СВК характеризуються високою економічністю при роботі на близькосинхронних частотах обертання ротора асинхронної машини. Зазвичай частота обертання ротора змінюється від -40% до + 30% від

синхронної швидкості. Ці вимоги визначають діапазон варіювання потужності силового перетворювача – в межах $30 \div 40\%$ від номінального значення потужності МПЖ-генератора. Застосування машини подвійного живлення особливо ефективно там, де потрібна тривала робота на швидкостях, що перевищують синхронну для генератора, і повне, зокрема, номінальне механічне навантаження [13].

У цих режимах МПЖ генерує по колах статора і ротора електричну енергію. В режимах, де МПЖ працює нижче синхронної швидкості, МПЖ генерує по колу статора електричну енергію, а по колу ротора споживає. Внаслідок обмеженої потужності сучасних ПЧ, створення ГК на основі МПЖ перспективно, в першу чергу, для міні-ГЕС. Автором ставиться завдання дослідити можливості регулювання основних технологічних параметрів міні-ГЕС шляхом зміни частоти обертання гідроагрегату.

Огляд довідкової літератури по гідротурбін [12,13,14] показує, що для гідротурбін з жорстко закріпленими лопатями збільшення кутової швидкості приблизно в два рази в порівнянні з номінальною, призводить до зниження потужності, що розвивається гідротурбіною, до нуля (рисунок 1.5) [14].

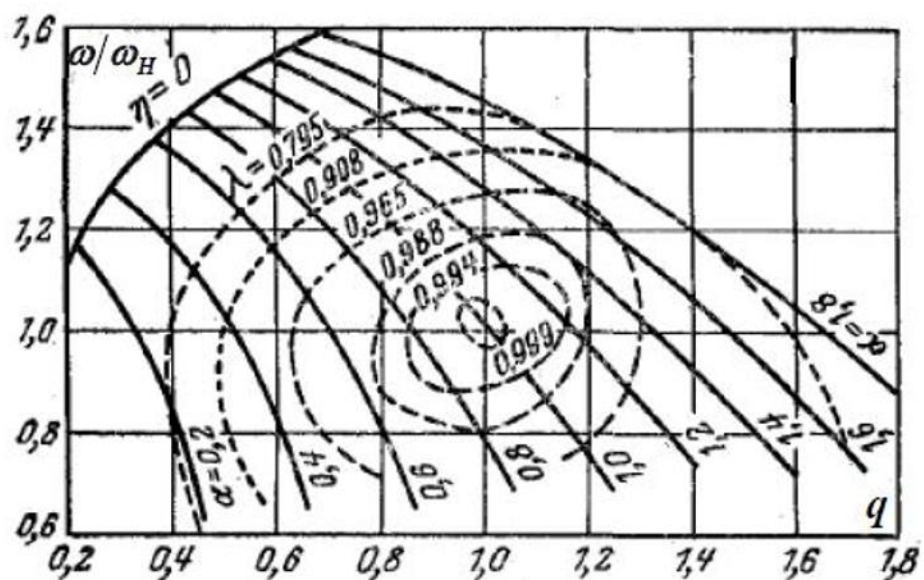


Рисунок 1.5 - Характеристики РВ гідротурбіни.

α - відносне відкриття НА; $\lambda = \eta/\eta_n$ - відносний ККД; $q = Q/Q_n$ - відносна витрата води

Мета регулювання частоти обертання ГА в основному режимі – підтримання максимального значення напору міні-ГЕС, але без холостого водоскиду. Керуючий вплив на ГА в таких міні-ГЕС – електромагнітний момент генератора M_e .

Система автоматичного регулювання (САР) кутової швидкості ГА повинна бути внутрішнім контуром регулювання в САР активної потужності, що генерується P_e (рис. 1.6). Швидкодіючий внутрішній контур – САР ω необхідний, перш за все, для обмеження ω в перехідних процесах при раптових позапланових завданнях по потужності P_e . Оскільки напруга на виводах ПЧ по колу ротора АМ практично прямо пропорційно частоті ковзання, обмеження мінімальної і максимальної величин ω дозволить захистити ПЧ від перевищення допустимих значень напруги по колу ротора.

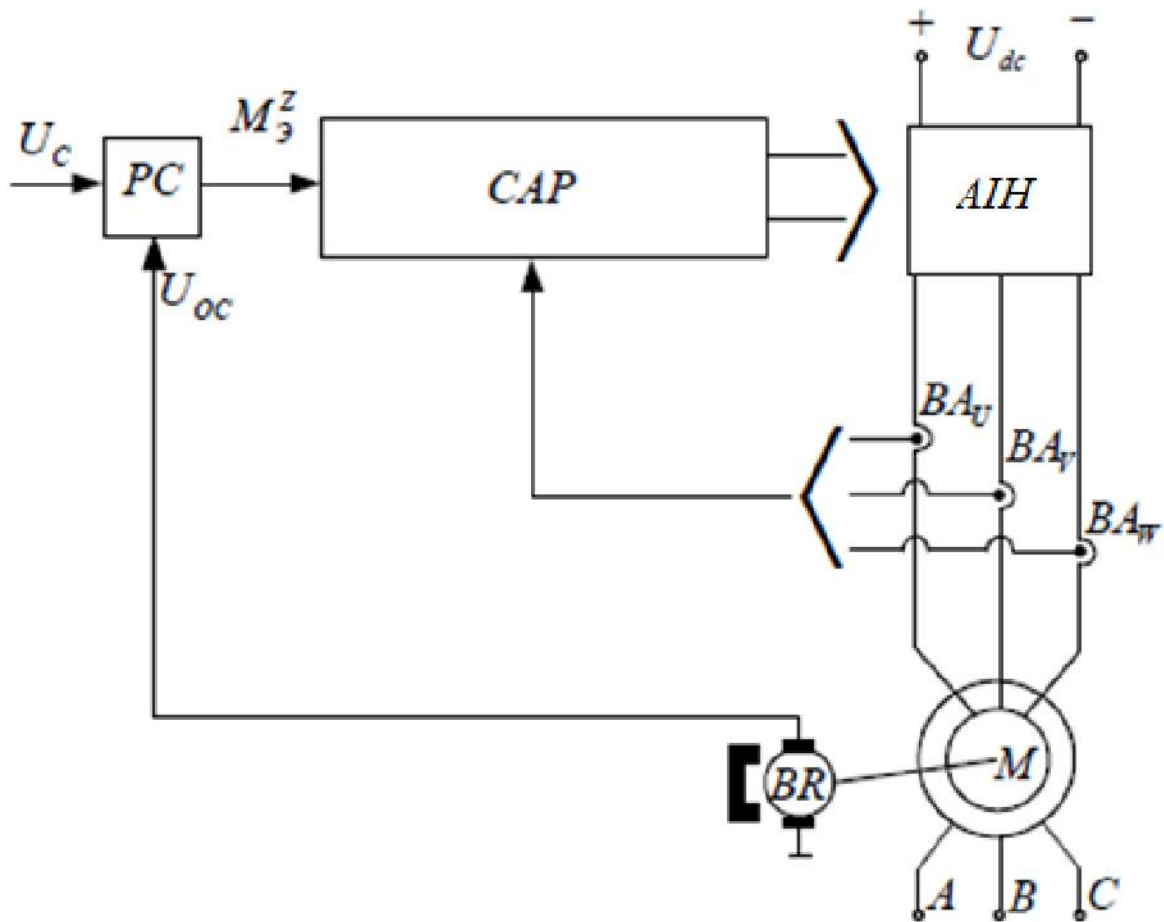


Рисунок 1.6 - Функціональна схема САР МГЖ

МПЖ з системою векторного управління (СВУ) в даний час знайшли широке застосування в вітроенергетичних установках. МПЖ з СВУ має канали впливу для управління активної і реактивної потужності, що передається в мережу.

Система векторного керування електроприводу на основі машини подвійного живлення являє собою двоканальну САУ. Керуючими впливами в ній є компоненти вектору сигналів завдання на струми або напруги ротора генератора. При цьому одна з компонент вектору використовується для регулювання швидкості (моменту).

Завдання побудови контурів регулювання і синтезу регуляторів системи управління активною потужністю ГА міні-ГЕС на основі МПЖ вимагає математичного опису процесів електричної машині перетворювачів електричної енергії рівняннями їх двофазної моделі. Змінними даної моделі повинні бути регульовані координати СВУ і проекції вектору управляючих впливів на осі декартової системи координат, що обертається синхронно з полем двигуна.

1.3 Математичний опис системи векторного керування машини подвійного живлення

Машиною подвійного живлення в даній роботі називається асинхронна машина з фазним ротором, керована за допомогою перетворювача частоти, причому статор генератора підключений до мережі змінного струму, а ротор – до виходів перетворювача. Асинхронна машина може бути як серійною, з трифазними обмотками, так і спеціально спроектованою, зокрема, мати двофазну обмотку на роторі.

Асинхронний генератор з фазним ротором є неявнополюсною симетричною в магнітному і електричному відношенні машиною. Його математичний опис у декартовій системі координат, що обертається з

довільною кутовою швидкістю ω_k може бути представлено наступними векторно-матричними рівняннями:

Рівняння рівноваги напруг обмотки кола

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = U_s - R_s I_s - \omega_k D \Psi_s. \quad (1.1)$$

Рівняння рівноваги напруг кола ротора

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = U_r - R_r I_r - \omega_\Delta D \Psi_r. \quad (1.2)$$

Рівняння магнітного кола

$$\Psi_s = L_s I_s + L_m I_r, \quad (1.3)$$

$$\Psi_r = L_m I_s + L_r I_r, \quad (1.4)$$

$$\Psi_m = L_m (I_s + I_r). \quad (1.5)$$

Вираз для електромагнітного моменту двигуна

$$M_\Delta = c L_m I_s^T D I_r, \quad (1.6)$$

Тут $\Psi_s, \Psi_r, U_s, U_r, I_s, I_r$ – двовимірні вектори-стовпці потокозчеплення, напруг і струмів виду $X_i = [x_{i1}, x_{i2}]^T$; x_{i1}, x_{i2} – компоненти вектора X_i , що є його проєкціями на відповідні осі декартової системи координат 1,2. Індекс i означає, що змінна відноситься до обмотки статора або ротора; T – символ транспонування вектора-стовпця. Ψ_m – вектор потокозчеплення, що характеризує магнітний потік в повітряному зазорі, $\Psi_m = [\Psi_{m1}, \Psi_{m2}]^T$. D – матриця перетворення вектора-стовпця,

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix},$$

R_s, R_r - активні опори обмоток статора і ротора, L_m - головна індуктивність двигуна, L_s, L_r - власні індуктивності обмоток статора і ротора,

$$\begin{aligned} L_s &= L_m + L_{\sigma s}, \\ L_r &= L_m + L_{\sigma r}, \end{aligned}$$

де $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ - індуктивності розсіювання. - швидкість обертання системи координат 1, 2 щодо ротора,

$$\omega_{\Delta} = \omega_k - \pi_n \omega \quad (1.7)$$

За умови, що система координат 1, 2 обертається синхронно з магнітним полем статора, ω_{Δ} в (1.7) є частотою ковзання. M_E - електромагнітний момент, s - конструктивна стала генератора. Далі в роботі будемо вважати, що двухфазна модель асинхронного генератора складена з використанням інваріантної по потужності перетворення фізичних змінних. Тоді $s = p_n$. Рівняння механічного руху має вигляд

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_E, \quad (1.8)$$

де M_T - момент гідротурбіни, M_E - електромагнітний момент МДП-генератора, а J_{Σ} - сумарний момент інерції ГА, приведений до валу генератора.

Рівняння (1.1) - (1.6) математичного опису асинхронного генератора з фазним ротором складені в системі загальноприйнятих припущень [24]:

1. обмотки статора і ротора електричної машини розташовані симетрично щодо осі обертання, а також відносно один одного при будь-якому кутовому положенні вала;
2. взаємні індуктивності фаз статора і ротора є гармонійними функціями кутового положення ротора; нерівномірність повітряного зазору, обумовлена пазами, не береться до уваги;
3. характеристика намагнічування є кусочно-лінійною;

4. не враховується ефект витіснення струму і активний опір кола намагнічування;
5. немає демпферних контурів на роторі;
6. відсутні ємності всередині обмоток і між ними, а отже, енергія електростатичного поля приймається рівною нулю.

При побудові системи регуляторів електроприводу в якості силових впливів на генератор з боку керуючої частини ГА міні-ГЕС будемо розглядати середні за період комутації силового перетворювача значення струмів i_{r1} , i_{r2} або напруг u_{r1} , u_{r2} . Зазначені змінні представляють собою проєкції узагальнених векторів струму, або напруги ротора, відповідно, на осі 1, 2, що обертається синхронно з полем генератора ортогональної системи координат.

Сучасний рівень розвитку напівпровідникової і перетворювальної техніки дозволяє будувати системи електроприводів змінного струму, в яких в якості керуючих впливів виступає узагальнений вектор струму, або напруги на виході силового перетворювача. Це означає, що швидкодія систем регулювання струмів (напруг) таких ЕП як мінімум на порядок вище швидкодії зовнішніх контурів регулювання ГА міні-ГЕС.

Побудову систем векторного керування ЕП будемо виробляти, вважаючи перетворювач електричної енергії безінерційним елементом САУ електроприводу. Математичний опис системи регулювання струмів ротора асинхронного генератора приймемо у вигляді

$$I_r = k_{yT} I_r^z, \quad (1.9)$$

де k_{yT} – коефіцієнт посилення "безінерційного" джерела струму;

$I_r^z = [i_{r1}^z, i_{r2}^z]^T ; i_{r1}^z, i_{r2}^z$ - сигнали завдання струмів на виході зовнішніх регуляторів СВУ.

Аналогічний вигляд матиме математична модель системи регулювання напруги:

$$U_r = k_{yH} U_r^z, \quad (1.10)$$

тут $k_{УН}$ - коефіцієнт посилення джерела напруги;

$$U_r^z = [u_{r1}^z, u_{r2}^z]^T ;$$

u_{r1}^z, u_{r2}^z - напруги на виході зовнішніх регуляторів системи векторного керування МДП.

Електромагнітний момент M_E генератора визначається добутком величини струму ротора I_r (1.9) і амплітуди потокозчеплення статора Ψ_s .

Отже, в режимах роботи ЕП зі стабілізацією магнітного стану ($\Psi_s = \text{const}$) миттєве значення M_E буде прямо пропорційно i_{r2} і вираз для M_E матиме вигляд,

$$M_{\mathcal{E}} = -p_n k_s k_{YT} \Psi_s i_{r2}^z, \quad (1.11)$$

$$M_{\mathcal{E}} = \kappa_M^{CBV} M_{\mathcal{E}}^z. \quad (1.12)$$

де k_s - безмірний коефіцієнт.

1.4 Огляд и вибір типу гідротурбіни

На рис.1.7 представлена міні-ГЕС, яка складається з водосховища добового регулювання, напірного водоводу и гідроагрегату. Гідроагрегат складається з гідравлічної турбіни и генератора змінного струму.

Гідротурбіна – це гідравлічний первинний двигун, призначення для перетворення енергії потоку, яка підводиться до нього, в механічну енергію на його валу. Таким чином, гідравлічна енергія спочатку перетворюється в гідротурбіні в механічну, а потім за допомогою генератора змінного струму – в електричну енергію.

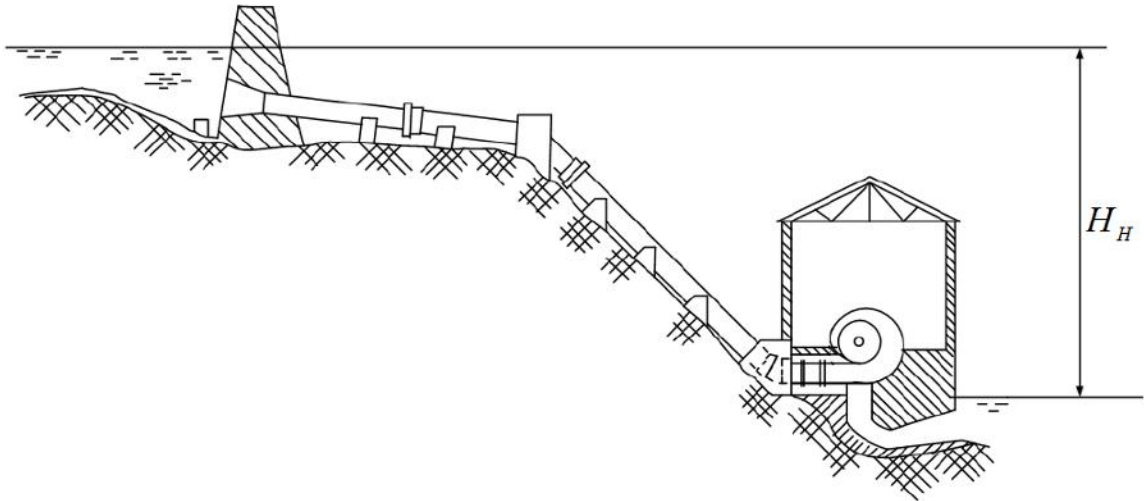


Рисунок 1.7 – Технологічна схема міні-ГЕС

Однією з проблем при проектуванні міні-ГЕС є вибір гідротурбіни.

Потужність гідротурбіни P_T , дорівнює добутку моменту гідротурбіни на кутову швидкість:

$$P_T = M_T \omega. \quad (1.13)$$

Потужність гідротурбіни змінюється при зміні витрати води Q і напору H . Вираз для розрахунку потужності гідротурбіни має вигляд [11]

$$P_T = 9,81QH\eta_T, \quad (1.14)$$

де H - напір води, підведеної до гідротурбіни;

Q - витрати води;

η_T – коефіцієнт корисної дії (ККД) гідротурбіни.

Величина ККД гідротурбіни залежить від її конструкції та розмірів і змінюється при зміні навантаження гідротурбіни. Для малих гідротурбін діаметром приблизно 1 м найбільша величина ККД становить 0,88 - 0,91.

Номінальна потужність P_{TH} визначається при номінальному напорі H_H і номінальною пропускною здатністю Q_H .

Потужність генератора P_E , вимірюється на затискачах генератора. У сталих режимах потужність генератора дорівнює потужності гідротурбіни за вирахуванням втрат в генераторі,

$$P_E = P_T \eta_{ген}$$

Де $\eta_{ген}$ - ККД генератора.

При виборі гідротурбін необхідно звернути увагу на те, що гідротурбіни діляться на два типи:

- активні гідротурбіни, які використовують енергію потоку в кінетичному вигляді (рис.1.8. а);
- реактивні гідротурбіни (рис.1.8. б, в) використовують в основному потенційну частину енергію потоку.

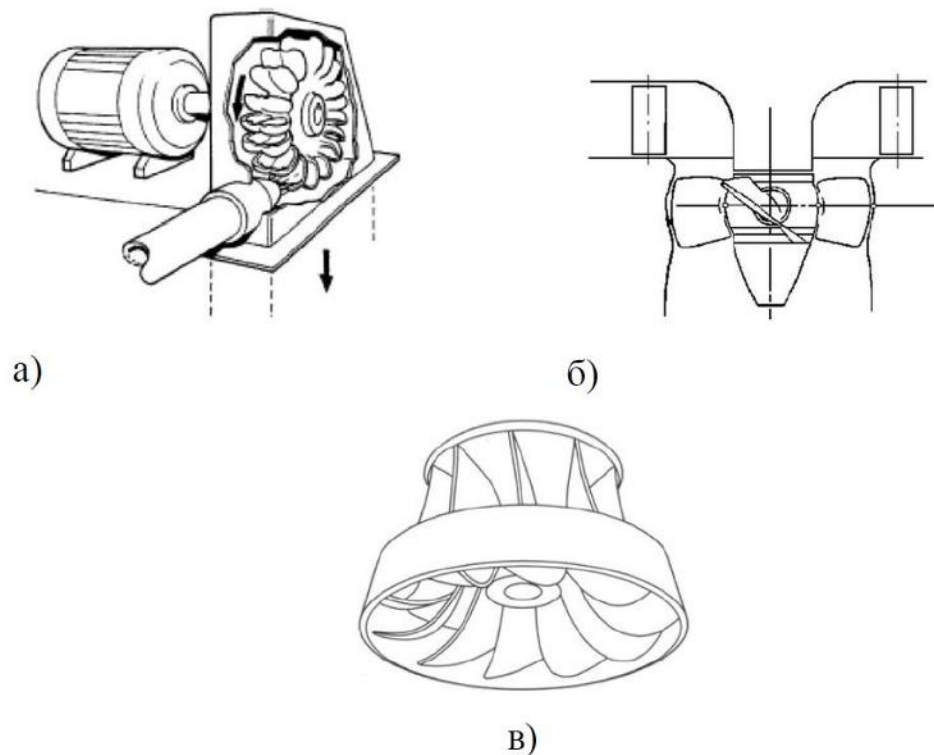


Рисунок 1.8 – Гідротурбіни: а - ковшова, б - пропелерна, в - радіально-осьова

Активні гідротурбіни (рис.1.8.а). Конструктивною особливістю турбін цього типу є те, що вони працюють від вільного струменю при нормальному атмосферному тиску. Сопло направляє воду на лопаті робочих колес, які мають форму ковша, и вся енергія в соплі перетворюється в кінетичну енергію.

Активні турбіни працюють, таким чином, за рахунок кінетичної енергії і застосовуються лише при великих напорах, від 40 до 800 метрів.

Реактивні гідротурбіни. Реактивні гідротурбіни працюють, головним чином, за рахунок енергії тиску.

Реактивні гідротурбіни діляться на два типи, осьові гідротурбіни та радіально-осьові гідротурбіни. Осьові турбіни в свою чергу діляться на пропелерні та поворотлопастні (рис.1.8. б). У осьових турбінах потік в меридіональній площині в зоні лопатей робочого колеса має осьовий напрямок, а в радіально-осьових гідротурбінах – радіально-осьовий напрямок.

Зберігаючи енергію в міру можливості в потенційній формі до самого моменту її перетворення в механічну енергію, турбіни цього типу мають високу інтенсивність використання енергії потоку та високий ККД. Нині реактивні гідротурбіни є найпоширенішим типом турбін, що охоплює область напорів від 1,5-2 до 350 м [11].

Кожен тип гідротурбін відповідає певному діапазону натиску та витраті води і має свою переважну область застосування.

Шляхом зведення гідротехнічних споруд можливо створювати найрізноманітніші напори від мінімального до максимального значення, яке обмежує рельєф місцевості навколо водотоку.

Гідротурбіни повинні мати здатність забезпечувати використання сконцентрованої енергії, без будь-яких обмежень за напором в зазначеній галузі его зміни і з високим ККД ці вимоги задовольняються такими системами гідротурбін, що характеризуються, в основному, конструкцією робочого колеса:

- пропелерними і поворотно-лопатевими – при тиску від 1,5 до 40 м и вище;
- радіально-осьовими – при тиску від 20 до 350 м;
- ковшовими – при тиску від 200 до 1500 м и вище.

Дані турбіни виконуються як з горизонтальним, так і з вертикальним розташуванням валу.

Розглянемо принципові форми універсальних характеристик різних систем турбін і типів їх робочих коліс.

Ковшові турбіни. На рис.1.9 зображена універсальна характеристика ковшової гідротурбіни, для якої характерно, що криві постійних ККД мають форму еліпсів з великою піввіссю уздовж осі Q , і зі зміною наведених оборотів n' значення ККД сильно зменшуються. На рис.1.14 показані основні габарити ковшевої гідротурбіни.

Робоча характеристика ковшевої турбіни має пологу форму. Криві постійних відкриттів на універсальній характеристиці зображуються у вигляді вертикальних прямих. Пояснюється це тим, що витрати води не залежать від оборотів турбіни, а залежать тільки від відкриття сопла и від натиску, під яким відбувається витікання.

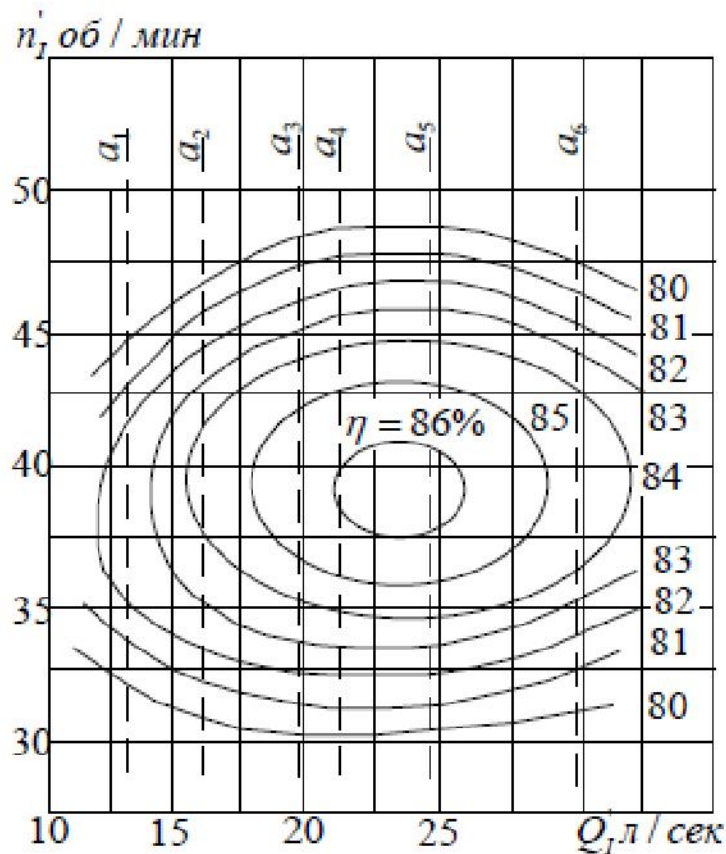


Рисунок 1.9 – Універсальна характеристика ковшової гідротурбіни

Радіально-осьові гідротурбіни з низьким коефіцієнтом швидкохідності $n_s=45\div 150$. Турбіни однієї і тієї ж системи мають різні типи робочих коліс. Кожна система турбін має тихохідні, нормальні і швидкохідні колеса. На

рис.1.10, зображена універсальна характеристика радіально осьової гідротурбіни з низьким коефіцієнтом швидкохідності, а на рис.1.14.б показані основні габарити. Такі колеса мають малі відносини b_0/D_1 . Вхідні кромки лопатей колеса знаходяться поблизу вихідних кінців лопаток направляючого апарату і мають майже вертикальне розташування, а довжина лопатей по лінії струму відносно велика. Число лопатей робочого колеса теж велике – від 17 до 21. Дотичні до кривих постійних відкриттів утворюють з прямою, паралельною осі Q , тупий кут. Витрата води залежить, як від частоти обертання гідротурбіни, так і від відкриття НА.

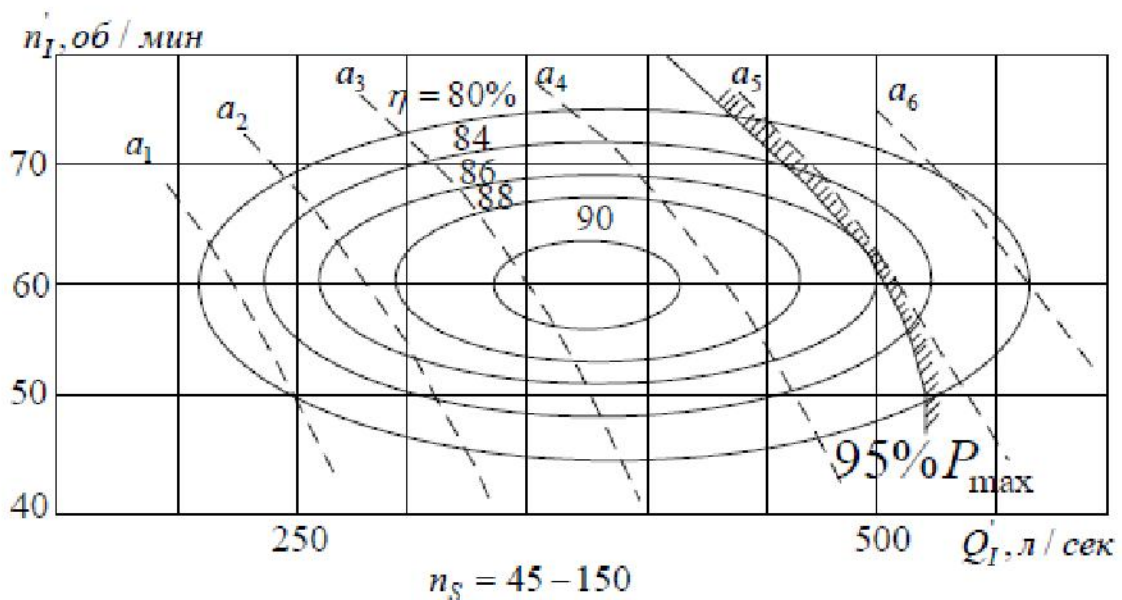


Рисунок 1.10 – Характеристики радіально-осьової гідротурбіни з низьким коефіцієнтом швидкохідності

Радіально-осьова гідротурбіна з середнім коефіцієнтом швидкохідності
 $n_s=145\div 260$. На рис.1.11 зображена універсальна характеристика радіально-осьової гідротурбіни із середнім коефіцієнтом швидкохідності, а на рис.1.14.в показані її основні габарити.

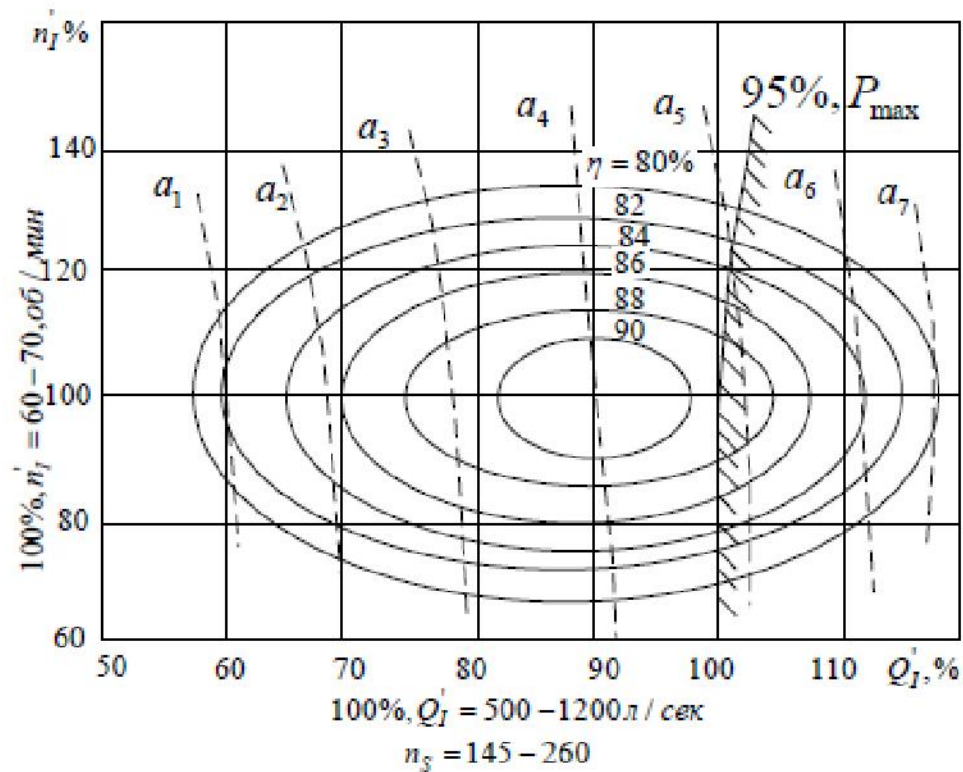


Рисунок 1.11 – Характеристики радіально-осьової гідротурбіни із середнім коефіцієнтом швидкохідності

Колеса нормальних радіально-осьових турбін мають більш високе значення b_0/D_1 в порівнянні з колесами тихоходних турбін. Вхідна кромка лопатей робочого колеса розташовується майже вертикально. Криві постійних відкриттів наближаються до вертикальних прямих.

Радіально-осьові гідротурбіни з високим коефіцієнтом швидкохідності
 $n_s = 260 \div 400$.

На рис.1.12 зображена універсальна характеристика радіально-осьової гідротурбіни з високим коефіцієнтом швидкохідності, а на рис.1.14.г показані її основні габарити.

Вхідна кромка лопатей колеса значно віддалена від вихідних кінців лопаток направляючого апарату і різко нахилена до осі валу. Довжина лопатей по лінії струму відносно невелика, а число лопатей робочого колеса становить 8-16 шт.

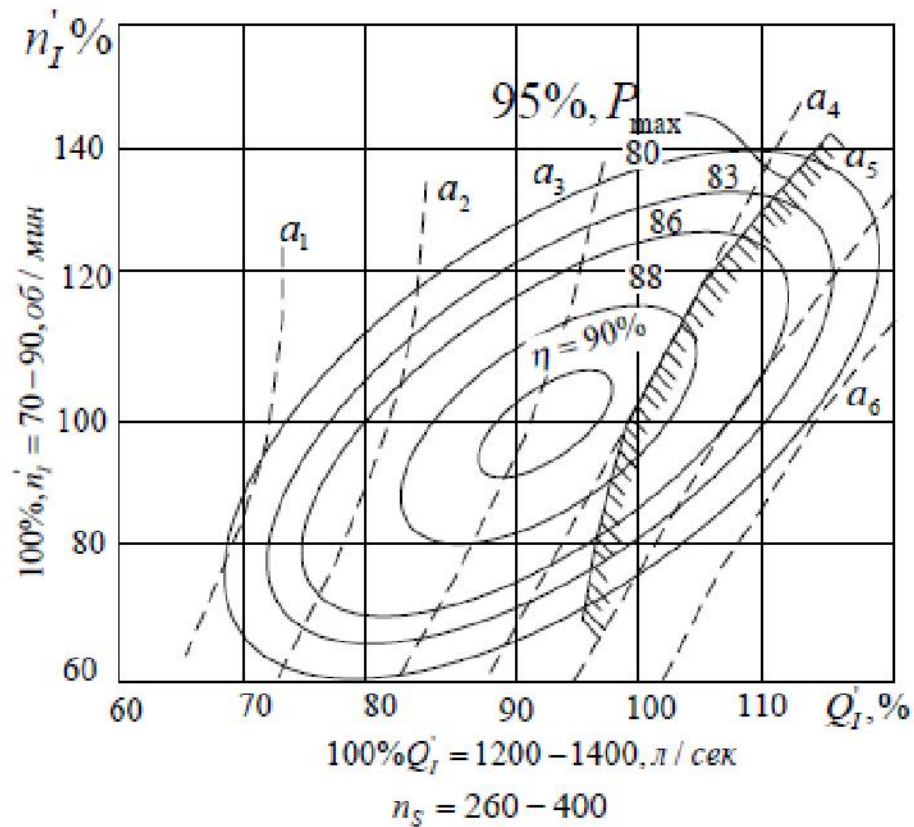


Рисунок 1.12 – Характеристики радіально-осьової гідротурбіни з високим коефіцієнтом швидкохідності

Універсальні характеристики радіально-осьової гідротурбіни з високим коефіцієнтом швидкохідності стиснуті уздовж осі Q , і витягнуті уздовж осі n .

Головним недоліком таких характеристик є різка зміна ККД зі зміною потужності турбіни, причому крива п'ятивідсоткового запасу потужності близько підходить до оптимального значення ККД. Швидкохідні радіально-осьові гідротурбіни доцільно встановлювати на тих станціях, для яких за умовами експлуатації не потрібно змінювати навантаження в широкому діапазоні. Витягнутість уздовж осі n кривих $\eta = \text{const}$ дозволяє зберігати високі значення ККД в більшому діапазоні за рахунок зміни напору.

Пропелерні гідротурбіни. На рис.1.13 зображена універсальна характеристика пропелерної гідротурбіни, а на рис.1.14.д зображена форма її проточної частини. Пропелерним турбінам притаманні всі недоліки радіально-

осьових гідротурбін з високим коефіцієнтом швидкохідності, але тільки в більш різкій формі.

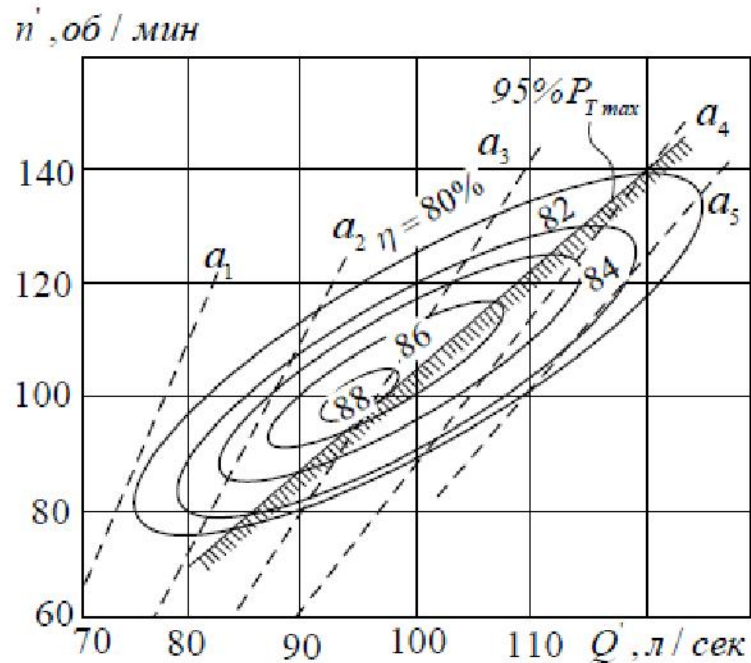


Рисунок 1.13 – Пропелерна гідротурбіна.

Значна зміна ККД виходить вже при малих змінах потужності, а крива п'ятивідсоткового запасу потужності проходить поблизу оптимальних значень ККД. Однак позитивним ефектом є невелика зміна ККД в широкому діапазоні напорів.

Пропелерні гідротурбіни раціонально встановлювати на станціях з великою кількістю агрегатів, так як в цих умовах можна буде вести експлуатацію турбіни з малими змінами потужності, а значні зміни потужності всієї ГЕС забезпечувати шляхом включення і виключення одного або декількох агрегатів.

На рис.1.15 зображена група робочих характеристик гідротурбін різних типів і швидкохідностей. Ковшові поворотлопасті гідротурбіни мають найбільш полого форму характеристики з відносно малою зміною ККД при коливаннях навантаження в межах від 25-30 до 10%. Радіально-осьові турбіни виявляють тим більше падіння ККД при часткових навантаженнях, чим більше їх коефіцієнт швидкохідності.

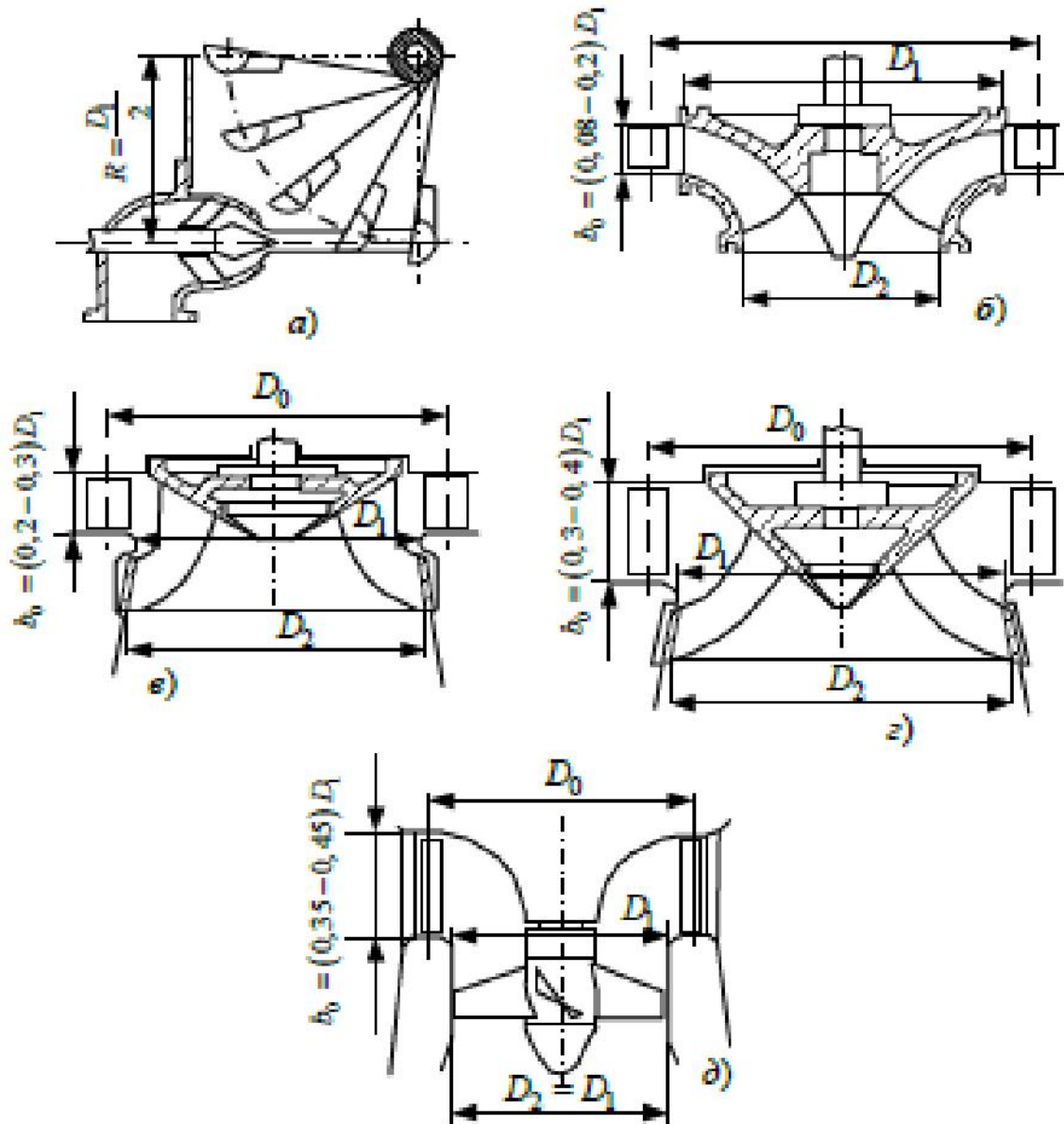


Рисунок 1.14 – Типи гідротурбін

Робочі характеристики зі збільшеним коефіцієнтом швидкохідності наближаються до характеристик пропелерних гідротурбін. З цієї причини робота радіально-осьових з високим коефіцієнтом швидкохідності та пропелерних гідротурбін при часткових навантаженнях є в більшості випадків не економічною.

Зміна витрати при зміні частоти обертання ГА, іншими словами, нахил ліній рівного відкриття на витратних характеристиках, у РО гідротурбін залежить від форми проточної частини, тобто від типу колеса. Вплив типу

колеса на положення ліній рівного відкриття можна простежити, зіставляючи універсальні характеристики коліс різних типів.

Для радіально-осьових гідротурбін з низьким і середнім коефіцієнтом швидкохідності характерно зменшення пропускної здатності при збільшенні частоти обертання. Це пояснюється тим, що їх робочі колеса мають значні ділянки лопатей з радіальним напрямком міжрадіального потоку.

При підвищенні частоти обертання, завдяки відцентровому ефекту створюється протитиск, що перешкоджає надходженню води через направляючий апарат в робоче колесо. У низьконапірних і деяких середньонапірних РО гідротурбін, навпаки, велика частина лопатей працює в режимі з осьовим направленням міжрадіального потоку. Тому при підвищенні частоти обертання за рахунок збільшення осьових складових швидкостей у РО гідротурбін намічається тенденція до деякого зростання пропускної здатності при незмінному відкритті НА.

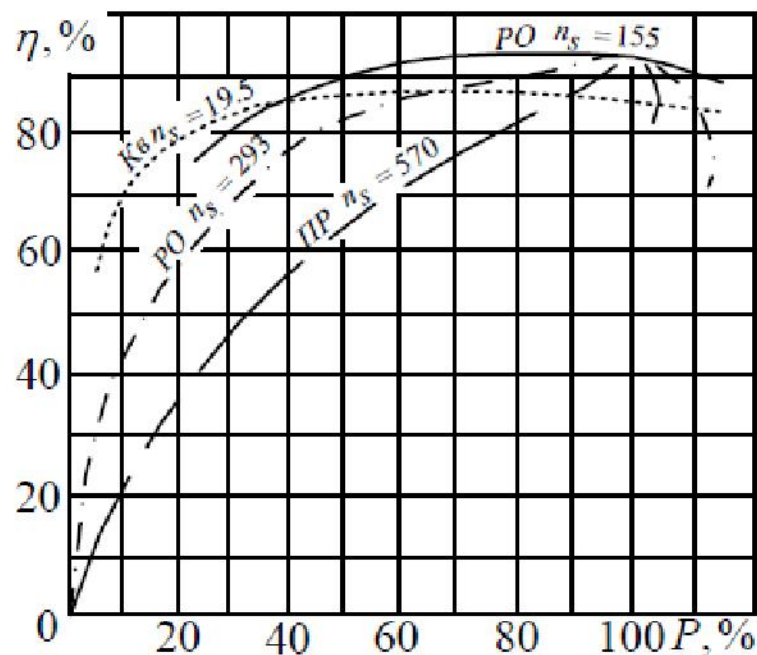


Рисунок 1.15 - Робочі характеристики гідротурбін різних систем і швидкохідні

На підставі огляду технічних властивостей гідротурбін і умов їх експлуатації, зроблений наступний висновок щодо вибору типу гідротурбін.

У зв'язку з тим, що основний стік води (рис.1.2) припадає на період з травня по вересень і становить 76,0% від річного стоку, а на решту місяців доводиться мінімальний стік при одночасному збільшенні потреби в електроенергії (рис.1.1), а при проектуванні міні-ГЕС беруть зимовий стік води, що істотно знижує встановлену потужність міні-ГЕС, і не дозволяє їй брати участь у добовому регулюванні. Для короткочасного збільшення вироблення активної потужності міні-ГЕС та участі її в добовому регулюванні необхідно:

- будувати водосховища добового регулювання, що дозволить підвищити участь міні-ГЕС в покритті максимуму навантаження енергосистеми, знизити потребу в потужності інших електростанцій і поліпшити режим їх роботи;
- вибрати з розглянутих вище гідротурбін радіально-осьову гідротурбіну з низьким коефіцієнтом швидкохідності, що дозволить при зниженні величини активної потужності P_e , що генерується, зменшувати витрати води шляхом збільшення частоти обертання ГА.

З рис.1.5 видно, що при використанні гідротурбін з низьким коефіцієнтом швидкохідності, гідротурбіна має найвищий ККД на основній кутовій швидкості валу ГА $\omega=1$. Розглянемо головну універсальну характеристику (рис.1.5) по лінії $a=1$ яка відповідає номінальному куту відкриття НА ГА. Зростання кутової швидкості валу ГА до $\omega=1,4$ призводить до зменшення витрати води через гідротурбіну (q) приблизно до значення $q=0,6$ і до зменшення потужності, що розвивається гідротурбіною (P_T) - в 2,4 рази. При зменшенні кутової швидкості валу ГА від номінальної вниз до $\omega=0,7$ витрата води зростає всього лише на 16 відсотків, внаслідок зниження ККД гідротурбіни. Подальше зменшення швидкості не має сенсу, оскільки не призводить до збільшення потужності гідротурбіни. При інших кутах відкриття НА ситуація аналогічна.

Таким чином, для гідроагрегатів на основі РВ гідротурбін з низьким коефіцієнтом швидкохідності необхідний діапазон зміни частоти обертання

складе приблизно 1:2. При такому діапазоні кутових швидкостей ГА є можливість змінювати P_T в діапазоні 1:2,4 без впливу на НА гідротурбіни. При цьому є можливість в години мінімуму електричного навантаження зменшувати q приблизно в 2 рази для запасання води у водосховищі.

При незмінному припливі води у водосховищі більшим значенням відповідають менші значення потужності P_E і запасання води; меншим – більше значення P_E і зниження рівня води у водосховищі. Така міні-ГЕС може автоматично оперативно змінювати вироблення електроенергії, підтримуючи баланс між генеруємою і споживаною активними потужностями, і використовувати акумулюючу здатність водосховища для покриття піків графіка електричного навантаження.

Мета регулювання частоти обертання ГА в основному режимі – підтримка максимального значення напору міні-ГЕС, але без холостого водоскиду.

Керуючий вплив на ГА в таких міні-ГЕС – електромагнітний момент генератора (M_E).

1.5 Статичні характеристики радіально-осьової гідротурбіни

З теорії електроприводу відомо, що синхронна машина має абсолютно жорстку механічну характеристику. Дана механічна характеристика не дозволяє ГА змінювати частоту обертання.

При незмінній кутовій швидкості валу ГА, в будь-який відрізок часу зберігається рівність між моментами M_E і M_T . Під час роботи гідроагрегату величину M_T можна змінювати в широких межах. Момент гідротурбіни змінюється за рахунок зміни витрати води на ГА міні-ГЕС.

Момент, що розвивається гідротурбіною, залежить від витрати води Q , кутової швидкості обертання ротора, діючого напору H і визначається за формулою

$$M_T = 9,81 \frac{QH}{\omega} \eta_T. \quad (1.15)$$

З цього виразу видно, що при $\omega = \text{const}$ момент гідротурбіни можна змінювати шляхом зміни витрати води Q або напору H . В реальних умовах практично неможливо автоматично змінити чинний натиск, тому момент турбіни регулюють зміною витрати води. Витрата води Q є так званим параметром регулювання, за допомогою якого величина, що регулюється (активна потужність, що генерується) підтримується в заданих межах. Зміна витрати води здійснюється регулюючими органами, які відповідають типу гідротурбіни.

Для перестановки регулюючих органів в гідротурбінах застосовуються виключно гідравлічні сервомотори, що дозволяють створити необхідні зусилля.

Підтримка активної потужності гідроагрегату в заданих межах при різних навантаженнях генератора здійснюється автоматичним регулятором швидкості, який, змінюючи положення направляючого апарату, відповідним чином змінює витрату води через гідротурбіну. Даний спосіб управління активною потужністю не підходить для міні-ГЕС через ускладнення механічної частини гідротурбіни і відсутності чергового персоналу.

Автором пропонується регулювати активну потужність МПЖ-генератора шляхом зміни числа обертів ГА. Напряга статора МПЖ і частота f_c електричного струму в колі статора підтримується енергосистемою нескінченної потужності.

Шляхом зміни частоти обертання ГА має бути забезпечено регулювання активної потужності P_E МПЖ відповідно до завдання з ОДУ. Рівність між $M_E = M_T$ забезпечується при $d\omega/dt = 0$. У динамічних режимах роботи $d\omega/dt \neq 0$. Момент M_T гідротурбіни і електромагнітний момент M_E МПЖ в динамічних режимах змінюються. Момент M_E змінюється за рахунок зміни завдання

управління, а момент M_T гідротурбіни змінюється за рахунок ефекту саморегулювання, при зміні витрати води.

Завдання автоматичного управління ГА міні-ГЕС зводиться до того, щоб при змінах сигналу управління швидко відпрацювати сигнал завдання по активній потужності МПЖ. При цьому кутову швидкість ГА передбачається змінювати в діапазоні 1:2.

Потужність, що розвивається гідротурбіною при відкритті направляючого апарату (НА) $\alpha = \text{const}$, залежить від витрати Q , чинного напору H і електромагнітного моменту МПЖ і визначається формулою (1.14) і (1.8).

Якщо прийняти, що в сталих режимах $M_E = M_T$, то формулу (1.15) Можна записати в такому вигляді

$$\omega = 9,81 \frac{QH}{M_{\Sigma}} \eta_T. \quad (1.16)$$

З цього виразу видно, що при $\alpha = \text{const}$ кутова швидкість ω ГА і витрату гідротурбіни можна змінювати шляхом зміни електромагнітного моменту M_E МПЖ. За допомогою електромагнітного моменту M_E МПЖ, регульована величина (активна потужність P_E міні-ГЕС) підтримується в заданих межах. Як відомо з практики, в міні-ГЕС практично не зустрічаються системи автоматичного регулювання активної потужності за допомогою регулювання витрати води при зафіксованому відкритті НА $\alpha = \alpha_{\text{ном}}$.

Відповідно до формули (1.15), момент гідротурбіни є функцією витрат, швидкості обертання напору води і коефіцієнта корисної дії, тобто, якщо враховувати, що витрати через гідротурбіну визначається відкриттям регулюючого органу a . Ця залежність називається статичною характеристикою гідротурбіни.

Статична характеристика гідротурбіни може бути побудована за даними універсальної характеристики моделі гідротурбіни, на якій в координатах n_1' і Q_1' , приведених до 1 м напору і 1 м діаметру робочого колеса, побудовані криві

постійних відкриттів регулюючого органу a_m і криві постійних значень коефіцієнта корисної дії гідротурбіни.

Найбільш широке застосування знайшли статичні характеристики (СХ), побудовані на основі [7]:

- в осях відносних безрозмірних параметрів: m - моменту, $\bar{\omega}$ - частоти обертання, \bar{h} - напору, q - пропускної здатності;
- в осях наведених параметрів M'_I , n'_I , Q'_I (рис.1.16).

Відносні безрозмірні параметри визначаються співвідношеннями

$$m = \frac{M}{M_H}, \quad (1.17a)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_H}, \quad (1.17б)$$

$$\bar{h} = \frac{H}{H_H}, \quad (1.17в)$$

$$q = \frac{Q}{Q_H}, \quad (1.17г)$$

де M , M_H - момент турбіни і його номінальне значення, Q , Q_H - витрата води через турбіну і його номінальне значення, H , H_H - напір на турбіні і його номінальне значення, ω_H – номінальна кутова швидкість обертання.

Співвідношеннями для розрахунку наведених параметрів,

$$M'_I = \frac{M}{HD_1^3}, \quad (1.18 а)$$

$$n'_I = \frac{nD_1}{\sqrt{H}}, \quad (1.18 б)$$

$$Q'_I = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}}. \quad (1.18 в)$$

Статичні характеристики (СХ) є повними в тому сенсі, що охоплюють всі режими, які можуть мати місце при експлуатації гідроагрегату. За СХ можна наочно простежити, а також прорахувати (з урахуванням впливу

несталого руху рідини) зміну наведеної витрати, моменту і частоти обертання від моменту скидання навантаження з агрегату до його повної зупинки.

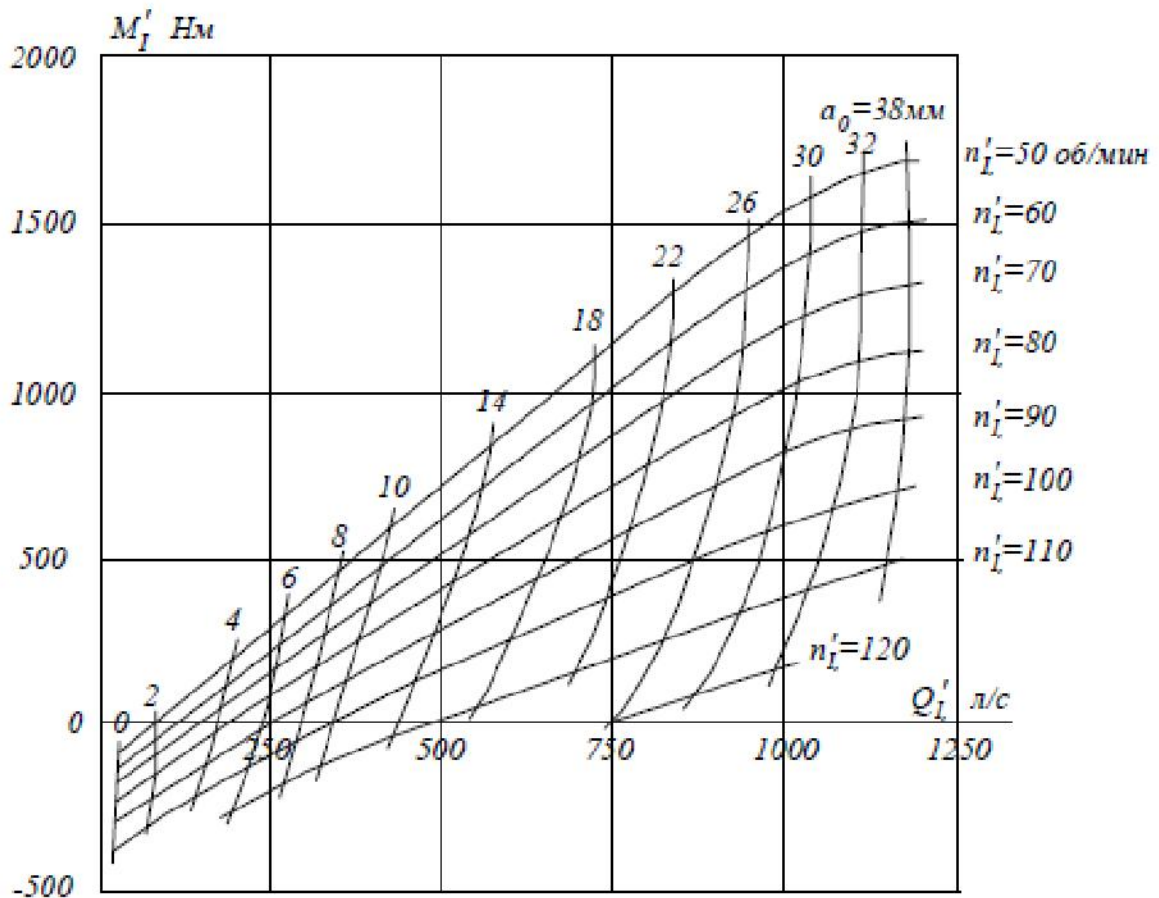


Рисунок 1.16 - Повна статична моментно-видаткова характеристика РВ гідротурбіни

Для звичайних гідротурбін існує три режими: турбінний, розгінний і режим гідравлічного гальмування. При побудові СХ турбін використовується інше правило знаків – за позитивні приймаються турбінні параметри: по напрямку руху рідини, у напрямку обертання валу і знаку моменту.

На форму характеристики великий вплив робить тип гідротурбіни. На рис.1.16, показана СХ радіально-осьової гідротурбіни.

Перш за все, варто відзначити відмінності в характері ліній постійних відкриттів НА: у РВ гідротурбін з низьким коефіцієнтом швидкохідності з підвищенням частоти обертання витрата води зменшується, що пояснюється, ефектом «гідравлічного замикання каналу», а у осьових турбін, навпаки,

підвищення частоти обертання супроводжується зростанням витрати, обумовленим «насосним ефектом».

Побудова статичних характеристик гідротурбіни проектного ГА ведеться наступним чином. Нехай потрібно побудувати характеристику для величини відкриття НА, відповідного a_M в моделі. Спочатку необхідно визначити відкриття a НА проектного ГА, яке відповідає відкриттю a_M (a_M – визначається з універсальної характеристики фізичної моделі гідротурбіни), по формулі

$$a = a_M \frac{Dz}{D_M z_M}, \quad (1.19)$$

де D_M – діаметр робочого колеса моделі; z і z_M число лопаток направляючого апарату відповідно гідротурбіни і моделі; a_M – відкриття НА моделі.

Вид універсальної характеристики моделі радіально-осьової гідротурбіни показаний на рис.1.17.

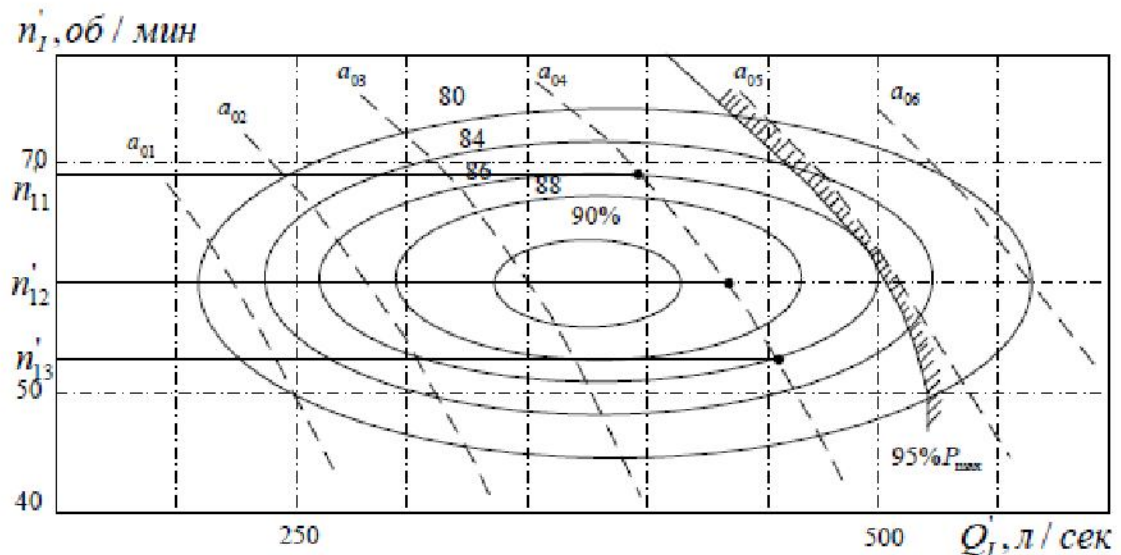


Рисунок 1.17 – Вид універсальної характеристики радіально-осьової гідротурбіни

Потім проводиться ряд ліній постійних значень наведеної швидкості n'_{11} , n'_{12} , n'_{13} і т.д. і за виразом (1.18.б) для кожного значення n'_1 визначається

швидкість обертання реальної гідротурбіни. У точках перетину цих ліній з кривою $a_M = \text{const}$ визначаються значення наведеної витрати Q'_1 і ККД моделі η_T . Далі, для кожного з розглянутих значень n'_1 підраховується момент гідротурбіни за формулою [16]

$$M_T = \frac{30}{\pi} \gamma D_1^3 H \frac{Q'_1}{n_1} \eta_T, \quad (1.20)$$

ККД гідротурбіни в виразі (1.20) в першому наближенні можна прийняти рівним ККД моделі η_M . Однак для більш точного визначення моменту гідротурбіни доцільно користуватися емпіричною залежністю,

$$\eta_T = 1 - (1 - \eta_M) \sqrt[5]{\frac{D_M}{D_1}}. \quad (1.21)$$

Точно таким же шляхом будуються статичні характеристики і для інших відкриттів регулюючого органу.

Розглянемо приблизний вигляд статичних характеристик радіально-осьової гідротурбіни (рис.1.18) при різних відкриттях направляючого апарату a_1, a_2, a_3 .

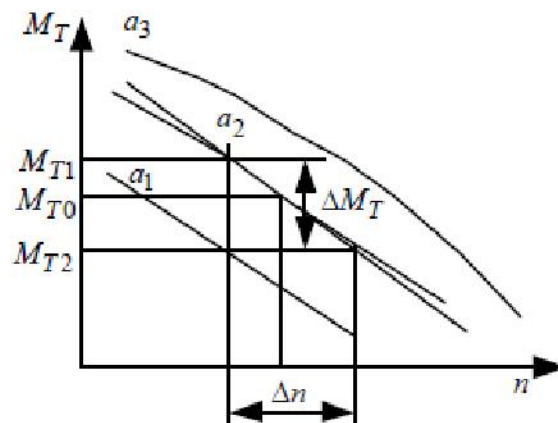


Рисунок 1.18 – Статичні характеристики гідротурбіни

З графіків видно, що зі збільшенням швидкості обертання турбіни її момент зменшується. Цією властивістю володіють всі без винятку типи гідротурбін, і воно називається ефектом саморегулювання. Кількісно ефект

саморегулювання характеризується коефіцієнтом саморегулювання турбіни e_T , який для заданого режиму визначається нахилом дотичної, проведеної до кривої постійного відкриття в даній точці. Зазвичай коефіцієнт e_T виражається через відносні величини і визначається за співвідношенням

$$e_T = \frac{dM_T}{dn} \frac{n_H}{M_{TH}}, \quad (1.22)$$

де M_{TH} і n_{TH} – номінальні (розрахункові) значення моменту і швидкості обертання турбіни.

Згідно рис.1.18, похідна dM_T/dn завжди має знак мінус, т. як. коефіцієнт саморегулювання є величиною від'ємною. Слід зазначити, що зазвичай в технічній літературі з регулювання гідротурбін коефіцієнтом саморегулювання називають величину (1.22), взяту з протилежним знаком. Дане вище визначення коефіцієнта саморегулювання прийнято відповідно до Міжнародного коду з випробувань систем регулювання гідротурбін [8].

На підставі зробленого огляду світового стану розвитку міні-ГЕС автором пропонується функціональна схема управління міні-ГЕС.

Дана схема відрізняється від стандартних схем автоматичного регулювання активної потужності ГЕС з одним ГА, тим, що регулювання активної потужності на ГЕС здійснюється за рахунок зміни частоти обертання ГА. У запропонованій автором системі регулювання активної потужності, НА гідротурбіни не вимагає наявності маслонапірної установки (МНУ).

Регулювання положення НА проводиться вручну, налаштовується на номінальний режим роботи, а регулювання вироблюваної активної потужності здійснюється з боку генератора за рахунок зміни електромагнітного моменту M_E генератора (частоти обертання ГА). Міні-ГЕС на основі МПЖ працює паралельно ЕЕС. Регулювання в запропонованій системі здійснюється за рахунок збільшення або зменшення електромагнітного моменту, що дозволяє акумулювати воду, і дозволяє її використовувати в піки навантаження при наявності водосховища. Управління обладнанням гідроагрегату забезпечує

цифровий пристрій обробки інформації (ЦПОІ), який вживає всіх необхідних сигнали від датчиків, які є джерелами інформації в САУ і за заданим алгоритмом здійснює управління.

Виконавчим пристроєм, що регулює вироблення електроенергії відповідно до завдання потужності, є МПЖ-генератор. Збільшення електромагнітного моменту генератора, призводить до зменшення частоти обертання гідротурбіни, внаслідок чого витрата води збільшується.

Крутний момент на валу гідротурбіни передається за допомогою механічного з'єднання на ротор генератора електроенергії. Це призводить до обертання генератора з певною частотою і вироблення електроенергії.

Отримана електроенергія надходить в комутаційну шафа (ШК), що виконує функцію силового вимикача і передається в ЕЕС.

Пропонована гідроенергетична установка використовує властивість гідротурбіни зменшувати витрату води і потужність при збільшенні швидкості обертання для запасання води у водосховищі під час зниження споживання електроенергії споживачами. Запасена вода використовується гідроенергетичною установкою при дефіциті потужності в енергосистемі.

Висновки по розділу 1

1. Обґрунтовано необхідність добового регулювання рівня води у водосховищі міні-ГЕС для покриття максимуму навантаження електроенергетичної системи. Таке регулювання дозволить знизити вироблення активної потужності інших електростанцій в години максимуму електричного навантаження і поліпшити режим їх роботи.
2. Обґрунтовано доцільність регулювання активної потужності ГА міні-ГЕС на основі МПЖ шляхом зміни частоти обертання валу ГА.
3. Обґрунтовано математичний опис асинхронної машини подвійного живлення з ПЧ в колі ротора як об'єкта управління. Для подальших досліджень прийнята безінерційна модель системи векторного

управління електромагнітним моментом МДП з джерелом струму в колі ротора.

4. Для цілей регулювання активної потужності зміною числа обертів найбільш підходить радіально-осьова гідротурбіна з низьким коефіцієнтом швидкохідності.
5. Регулювання кутової швидкості МПЖ-генератора в складі ГА буде потрібно робити в діапазоні не ширше, ніж 1:2, внаслідок наростаючого зниження ККД гідротурбіни при відхиленні її частоти обертання від основної.
6. Постійна часу СВУ МПЖ по електромагнітному моменту, а відповідно і по активній потужності, для сучасних СВУ електричними машинами змінного струму великої потужності становить від 0,005 до 0,02 сек.

2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОТУРБИНИ З НАПІРНОГО ВОДОВОДУ

2.1 Динамічні характеристики радіально-осьової гідротурбіни з напірним водоводом

В процесі роботи міні-ГЕС зміна позапланового завдання активної потужності супроводжується гідромеханічним перехідним процесом, який викликаний зміною електромагнітного моменту M_E МПЖ і зміною витрати гідротурбіни.

Для початкової оцінки гідромеханічних перехідних процесів, що виникають в нормальних експлуатаційних режимах, необхідно попередньо розглядати алгебраїчні і диференціальні рівняння, які характеризують режим роботи міні-ГЕС.

Особливу увагу необхідно приділяти гідромеханічним перехідним процесам, так як вони визначають підвищені динамічні навантаження, що виникають в водоводах і проточному тракті гідравлічних машин, і проявляються у формі гідравлічного удару.

При перехідних процесах після скидання навантаження гідротурбіна проходить надзвичайно широку область режимів.

Тому для розрахунків прогнозування цих процесів також необхідні експериментальні повні статичні характеристики турбіни, що охоплюють всі можливі режими роботи.

При проектуванні міні-ГЕС розрахунки перехідних процесів виконуються для поліпшення режимів регулювання, наприклад з метою підвищення надійності, і визначення швидкодії зміни потужності гідроагрегату і вибору найкращих режимів регулювання. Іноді виникає можливість підвищити номінальну потужність гідроагрегату.

Міні-ГЕС не тільки забезпечують часткове покриття графіка навантаження енергосистеми, але виконують функцію високоманевреного

резерву потужності. У зв'язку з цим важливим їх експлуатаційним показником є швидкодія зі зміни активної потужності. Тому перехідні процеси зміни електромагнітного моменту M_E МПЖ міні-ГЕС розглядаються при постійному відкритті НА гідротурбіни. Природно, що в цих умовах з'являються найбільші динамічні дії, які проявляються у формі гідравлічного удару.

При зміні активної потужності $P(t)$ змінюється витрата води, що викликає гідравлічний удар $\Delta H(t)$ в напірних водоводах і проточному тракті ГА, який призводить до тимчасового падіння напору турбіни. Тут важливо зазначити, що гідравлічний удар завжди діє на потужність в напрямку, протилежному дії зміни електромагнітного моменту M_E , що призводить до відставання зміни потужності, тобто до зниження швидкодії регулювання [8].

У дослідженнях, пов'язаних з малими коливаннями частоти обертання гідротурбіни, змінами напору зазвичай нехтують, тобто вважають $H = const$. Однак при різких змінах відкриття напрямних апаратів або зміні частоти обертання ГА, обумовлених, наприклад, дією спеціальної автоматики, таке припущення є грубим, тому що воно не враховує значного збільшення тиску води перед НА, обумовленого зміною кінетичної енергії великих мас, що містяться в трубопроводі (явище, відоме під назвою гідроудару). Для ілюстрації впливу гідроудару на хід зміни частоти обертання на рис.2.1 приведена так звана динамічна характеристика ГА.

З цієї характеристики видно, що виникнення гідроудару різко змінює не тільки швидкість зміни моменту, але і його характер (на початку процесу момент не зменшується, а збільшується).

Гідравлічний удар (ударний тиск) – являє собою динамічне підвищення або пониження тиску, в напірному трубопроводі викликається дією інерційних сил, що виникають при невстановлених режимах, коли $dQ / dt \neq 0$.

При сталому режимі тиск в будь-якому перетині напірного водоводу визначається висотою п'єзометричного рівня, в перерізі С-С (рис.2.2), дорівнює $(p/pg)^C$. В динамічних режимах додається динамічна складова –

гідравлічний удар величиною ΔH^C та висота п'єзометричного рівня стає рівною $(p/pg)^C + \Delta H^C$.

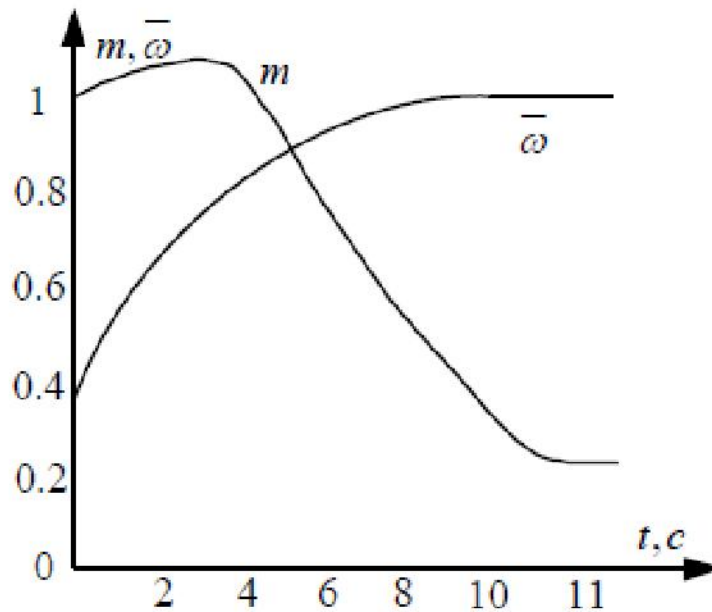


Рисунок 2.1 - Динамічні характеристики гідроагрегату

Визначимо гідравлічний удар, прийнявши допущення, що щільність рідини і розмір перетину водоводу не залежить від тиску («жорсткі»).

Використовуємо теорему кількості руху [8]

$$\frac{d(WV)_x}{dt} = \Sigma X, \quad (2.1)$$

де W, V – маса і швидкість рідини в водоводі; ΣX - сума проекцій на вісь x зовнішніх сил, що діють на дану масу рідини в момент часу t .

Розглянемо масу рідини в водоводі на ділянці, розташованій між водосховищем і гідротурбіною (рис.2.2)

$$W = \rho SL,$$

де ρ - щільність рідини, S - площа перетину водоводу, L - довжина водоводу між перетинами $A - A$ і $B - B$. Ось x збігається з віссю трубопроводу і спрямована від A до B .

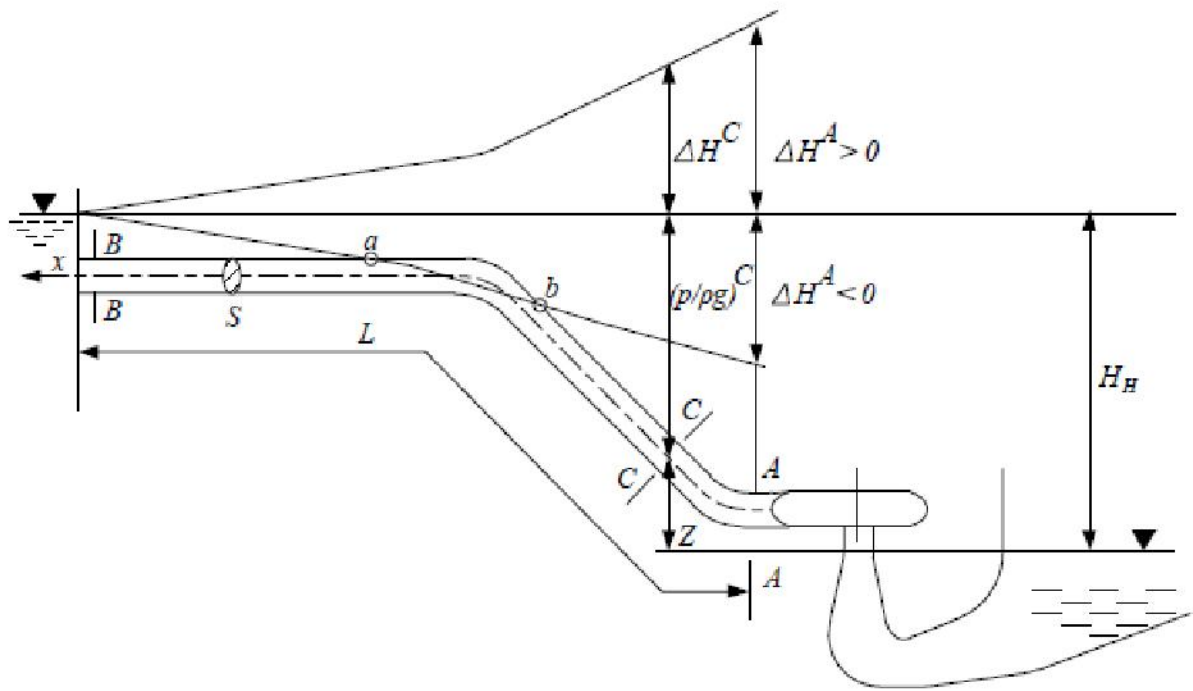


Рисунок 2.2 – Схема гідродару в напірному трубопроводі

Замість висоти п'єзометричного рівня використовуємо вираз для потенційного напору:

$$H = \frac{p}{\rho g} + z, \quad (2.2)$$

який зручний тим, що напір не залежить від поздовжнього профілю трубопроводу, якщо не враховувати гідравлічні втрати. При цьому діюче на масу W зусилля вздовж осі x дорівнюватиме [8]

$$\sum X = \rho g S \Delta H \quad (2.3)$$

Якщо не брати до уваги пружні деформації рідини і водоводу, що викликаються зміною тиску, тобто вважати, що щільність рідини ρ і площа перетину S не залежать від тиску (рідина і водовід жорсткі), то на підставі (2.1) і (2.3) отримуємо:

$$-\rho S L \frac{dV}{dt} = S \rho g \Delta H,$$

(Знак мінус показує, що підвищення ударного тиску викликається зменшенням швидкості $dV/dt = 0$). Звідси

$$\Delta H = -\frac{L}{g} \frac{dV}{dt}. \quad (2.4)$$

при $dV/dt = (dQ/dt)/S$,

$$\Delta H = -\frac{L}{gS} \frac{dQ}{dt}. \quad (2.5)$$

При відомому законі зміни витрати води через гідротурбину, підвищення тиску може бути знайдено шляхом диференціювання функції $V_x = V_x(t)$. Однак, сам закон зміни швидкості визначається значеннями розподілених тисків, прикладених до рідини.

Для визначення функції $V_x = V_x(t)$ використовується поняття про рівноважні і нерівноважні режими і, відповідно, про статичні і динамічні параметри. При постійному напорі H_H і різних значеннях μ - параметра, що характеризує стан (відкриття) регулюючого органу або зміну частоти обертання гідроагрегату, забезпечуються рівноважні (усталені) режими, при яких можуть визначатися експериментально значення швидкості в проточній частині. Отримані значення швидкості будуть статичними.

Коли при перехідному процесі відбувається зміна частоти обертання ГА, значення швидкості води в проточній частині не відповідає залежності, отриманої при рівноважних режимах. Розподілення тиску призводять до виникнення додаткових перепадів тисків на НА, що створює інші умови протікання через регулюючий орган.

Виникає невідповідність між положенням μ регулюючого органу, частотою обертання ГА і значенням швидкості води в проточній частині. Крива зміни швидкості при наявності розподілених тисків не збігається зі статичною характеристикою швидкості, що свідчить про існування нерівноважних режимів. Нові значення швидкості називають динамічними, а зміна швидкості визначатиме залежність

$$V_{x_дин} = V_{x_дин}(\mu, \omega, t).$$

У разі збільшення частоти обертання ГА (рис.2.2), перед НА виникає додатковий тиск Δp , і витікання рідини відбувається вже не під напором H_H , як це було при відповідному рівноважному режимі, а під напором $H_H + \Delta p / \gamma$. Різка зміна частоти обертання або різка зміна відкриття НА призводять до динамічних процесів в водоводі, що призводить до появи гідродару. У кожен момент часу зв'язок між динамічними і статичними значеннями швидкостей виражається залежністю

$$V_{x_дин} = V_{x_ст} \sqrt{\frac{H_H + \frac{\Delta p}{\gamma}}{H_H}} = V_{x_ст} \sqrt{1 + \frac{\Delta p}{\gamma H_H}}. \quad (2.6)$$

При зменшенні частоти обертання ГА витікання рідини відбувається під напором і зв'язок між динамічними і статичними значеннями швидкостей визначається залежністю

$$V_{x_дин} = V_{x_ст} \sqrt{\frac{H_H - \frac{\Delta p}{\gamma}}{H_H}} = V_{x_ст} \sqrt{1 - \frac{\Delta p}{\gamma H_H}}. \quad (2.7)$$

З розглянутих виразів (2.6) і (2.7) видно, що різниця в величинах зростає зі збільшенням інтенсивності перехідного процесу. При повільних змінах частоти обертання ГА можна використовувати безпосередньо статичні значення швидкостей без будь-яких поправок.

Додатковий, в порівнянні зі сталим режимом, перепад тисків у регулюючого органу врівноважує сили інерції, будучи в той же час причиною, що обумовлює різницю в значеннях швидкостей при рівноважних і нерівноважних режимах.

Інерційний напір, в залежності від значення частоти обертання ГА, дає в його області ефект зміни дійсного напору H_H . У зв'язку з цим відношення інерційного напору до дійсного називають відносною зміною напору:

$$h = \frac{H - H_H}{H_H} = \frac{\Delta H}{H_H}, \quad (2.8)$$

$$h = \frac{\Delta H}{H_H} = -\frac{L}{gH_H} \frac{dV_{\text{дин}}}{dt}. \quad (2.9)$$

Використовуючи поняття про інерційному напорі, отримаємо замість (2.6) і (2.8):

$$V_{\text{дин}} = V_{\text{ст}} \sqrt{\frac{H_H + \Delta H}{H_H}} = V_{\text{ст}} \sqrt{1 + h}. \quad (2.10)$$

При збільшенні частоти обертання ΓA $h > 0$, при зменшенні $h < 0$.

Так як при перехідному процесі поле швидкостей в проточній частині в кожен момент часу збігається з полем швидкостей сталого режиму при попередній зміні частоти обертання, можна говорити про ефект запізнювання в перестроюванні поля швидкостей, пов'язуючи запізнення з інертністю рідини. Дійсно, що виникає ефект запізнювання сильніше проявляється при значних змінах кінетичної енергії рідини за малі проміжки часу.

Таким чином, розгляд одновимірного несталого руху рідини показує, що різниця в нерівноважних і рівноважних режимах пояснюється інерційністю рідини. Знання функції відносного зміни напору $h = h(t)$ дозволяє визначати при розрахунку перехідних процесів вплив інертності рідини.

Перейдемо у формулі (2.9) до безрозмірного значенням швидкості

$$v_{\text{дин}} = \frac{V_{\text{дин}}}{V_H},$$

де V_H - швидкість в проточній частині гідротурбіни при номінальному режимі. Тоді отримаємо

$$h = -\frac{LV_H}{gH_H} \frac{dv_{\text{дин}}}{dt} = -T_w \frac{dv_{\text{дин}}}{dt}. \quad (2.11)$$

Постійний для даного процесу параметр називають постійною інерції або постійною часу напірного водоводу. Він характеризує час розгону мас

води – час, потрібний для повідомлення рідини, що знаходиться в стані спокою, швидкості V_H під впливом напору H_H .

З огляду на те, що в безрозмірній формі для одного і того ж режиму значення швидкості і витрати рівні, використовуючи залежність (2.11), отримаємо

$$v_{\text{дин}} = v_{\text{ст}} \sqrt{1+h} = q_{\text{ст}} \sqrt{1+h}. \quad (2.12)$$

У більшості випадків міні-ГЕС мають циліндричний напірний водовід (рис.2.2) площею перетину S (діаметр D_{TP}), довжиною L , в кінці трубопроводу розташована турбіна з НА, який регулює витрату води.

Положення перетинів визначається координатою x , що збігається з віссю водоводу в напрямку від перетину 1-1. Напрями витрати Q і швидкості $V=Q/F$ приймаються позитивними, тому вода рухається від водосховища до гідротурбіни.

В результаті переходу до безрозмірних параметрах отримаємо (2.11) у вигляді

$$h = -T_W \frac{dq}{dt}, \quad (2.13)$$

де

$$T_W = \frac{Q_H}{gH_H} \sum \frac{L_i}{S_i}, \quad (2.14)$$

Коефіцієнт T_W , називається постійною інерції (або постійною часу) напірних водоводів і являє собою комплексний показник інерційності напірної системи.

Залежно від значення T_W напірна система вважається:

малоінерційною при $T_W < 1,5$ сек;

середньоінерційною при $1,5 < T_W < 3$ сек;

високоінерційною при $T_W > 3$ сек.

Чим вище інерційність, тим більше значення має облік динамічних дій при проектуванні і експлуатації гідроагрегатів і напірних водоводів ГЕС [8].

2.2 Математичний опис гідротурбіни в абсолютних величинах

Для розробки алгоритму управління міні-ГЕС необхідна математична модель гідротурбіни, де можна промоделювати всі її режими роботи. Автором пропонується математична модель РВ гідротурбіни з наступними припущеннями:

- ККД системи для всього діапазону регулювання прийнята $\eta = const$;
- стінки водоводу абсолютно жорсткі;
- вода нестислива.

На підставі загальноприйнятих формул в теорії гідроелектростанцій, які наводяться нижче, була побудована математична модель РВ гідротурбіни. У виразі (1.12) наведена основна формула, яка є базовою для моделі гідротурбіни,

$$P_T = 9,81HQ\eta_T.$$

Як видно з виразу (1.12), потужність гідротурбіни залежить від напору H і витрати Q .

Напір ГА складається з наступних складових:

$$H = H_H + \Delta H - h_{nom}, \quad (2.15)$$

де $H_H = const$ - номінальний напір міні-ГЕС,

h_{nom} - втрати напору в водогоні [5,20],

$$\Delta H = -\frac{L}{gS} \frac{dQ}{dt},$$

$$h_{nom} = A \cdot K_1 \cdot L \cdot Q^2, \quad (2.16)$$

де A - питомий опір для сталевих труб, K_1 - поправочний коефіцієнт до значень A для сталевих труб.

Витрата води через гідротурбіну залежить від відкриття направляючого апарату. Відносно гідравлічний опір гідротурбіни визначається виразом вигляду,

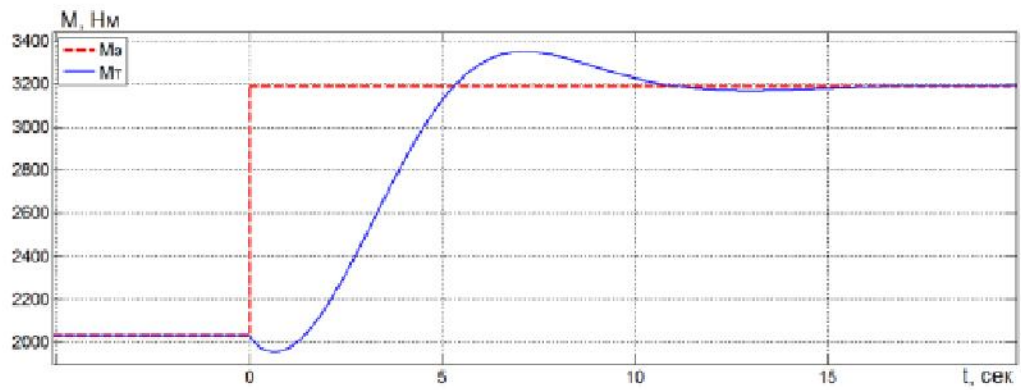


Рисунок 2.4 - Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ

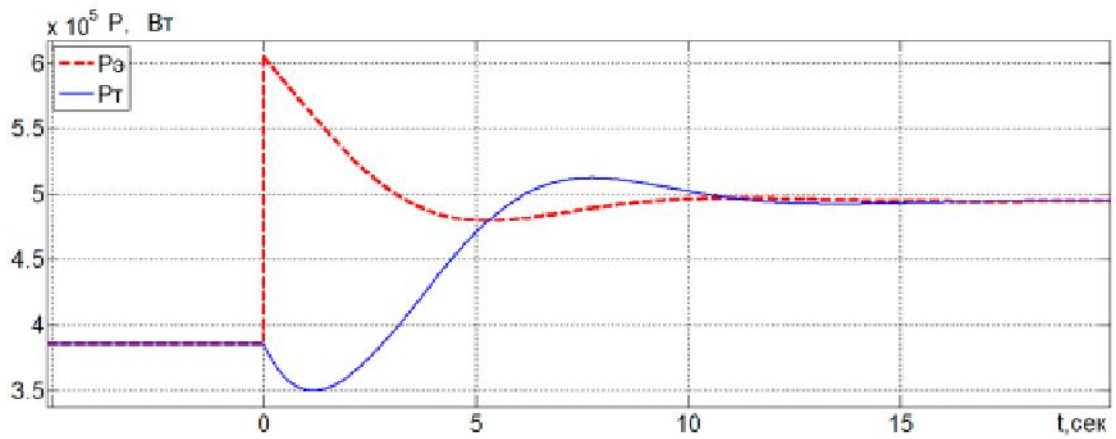


Рисунок 2.5 - Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ

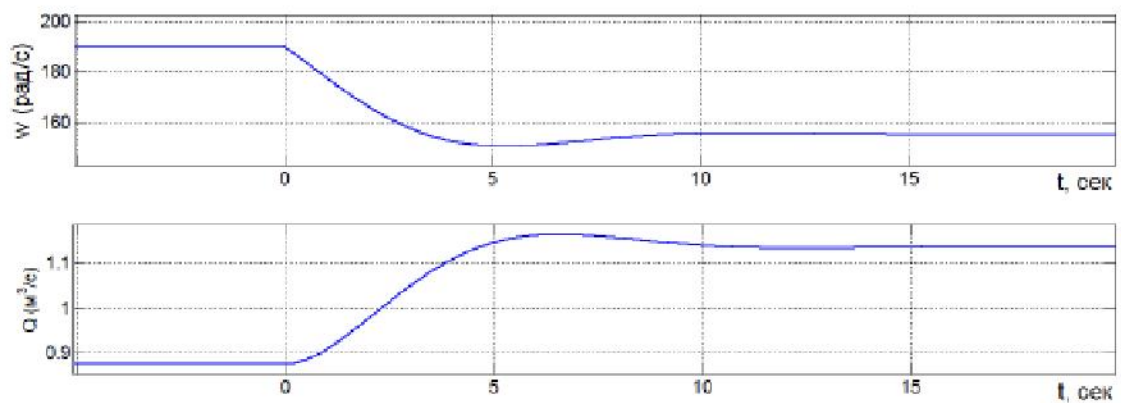


Рисунок 2.6 - Перехідні процеси по кутовий швидкості валу і витраті води ГА

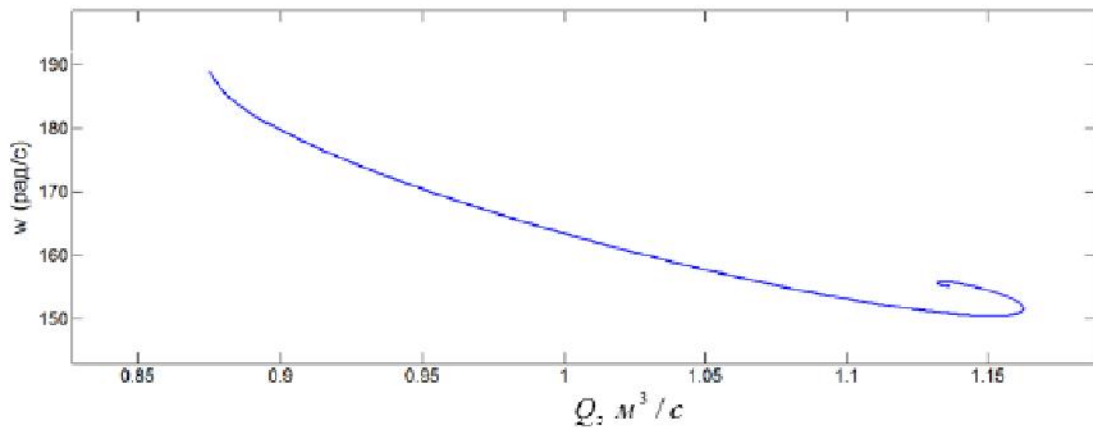


Рисунок 2.7 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості валу ГА

Результати цифрового моделювання наведені на рис.2.4 - 2.7. Як видно з рис.2.4 - 2.7 при збільшенні електромагнітного моменту M_E МПЖ в перший період часу потужність гідротурбіни зменшується і, потім, поступово наростає до сталого значення. Цей ефект пояснюється наступним чином: при збільшенні електромагнітного моменту МПЖ динамічний момент ГА зменшується, це призводить до гальмування ГА, частота обертання зменшується. При цьому відцентрова сила зменшується, не перешкоджаючи проходженню води через НА, що призводить до зниження тиску перед НА (гідроудар). Зниження тиску далі призводить до зменшення потужності гідротурбіни до тих пір поки витрата води не починає збільшуватися. Після того як витрата води почала збільшуватися, і частота обертання зменшуватися – потужність гідротурбіни починає збільшуватися за рахунок збільшення витрати води, до сталого значення.

2.3 Математичний опис радіально-осьової гідротурбіни в відносних величинах

Гідромеханічні перехідні процеси можна представляти у формі траєкторій миттєвих режимів, показаних на універсальній характеристиці

турбінного гідроагрегату (рис.2.8). Положення кожної точки траєкторії, що відповідає даному моменту часу, визначається двома координатами: відкриттям направляючого апарату a й наведеної частоти обертання n_1' . Зміни $a(t)$, що задаються в залежності від часу, представляють режим регулювання ГА. Координата n_1' залежить від динамічного напору $H=H_H+\Delta H$ з урахуванням гідравлічного удару і від частоти обертання n . Обидва ці показники визначаються в результаті розрахунків перехідних процесів, і задати їх заздалегідь неможливо.

Роздільний розрахунок удару $H(t)$ і зміни частоти обертання $n(t)$. Спочатку приймають деякі значення n_1' і за заданим режимом регулювання ГА знаходять динамічний напір; далі по ньому визначають зміни частоти обертання; потім з урахуванням результатів першого розрахунку будують лінію миттєвих режимів.

Розрахункові співвідношення для визначення гідравлічного удару були приведені вище. Тут розглянемо залежності, що дозволяють визначати зміну частоти обертання.

Гідроенергетиками [10] було проведено дослідження динамічних режимів енергосистем, всі гідротурбіни розглядають, як турбіни з одним регулюючим органом.

Зміна потужності гідротурбіни здійснюється напрямним апаратом, що змінює витрату води через турбіну.

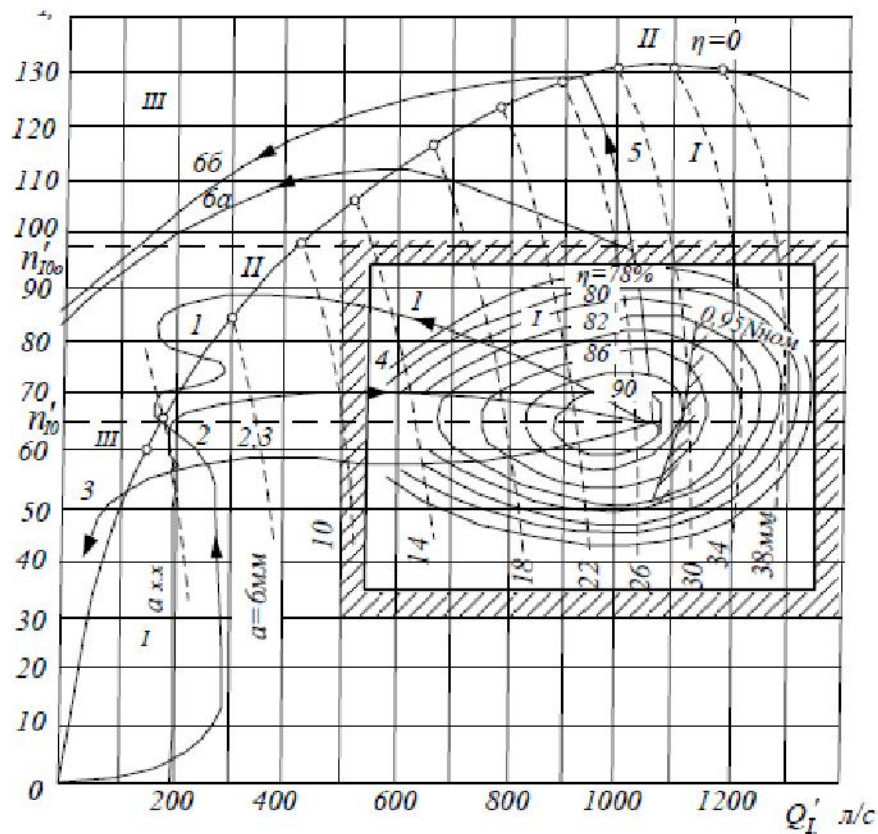


Рисунок 2.8 – Траєкторії миттєвих режимів гідроагрегату з радіально-осьовою турбіною. Режими: I - турбінний; II - розгінний; III - гальмівний. Процеси: 1 - скидання навантаження; 2 - зменшення навантаження; 3 - зупинка агрегату; 4 - збільшення навантаження; 5 - вихід в розгін при $a = const$; 6 - виведення з розгону (а - з розгінної частоти; б - з проміжної частоти обертання); 7 - пуск агрегату

Для математичного опису гідротурбіни з одним регулюючим органом застосовували модель [10], розроблену для вирішення завдань динаміки регулювання активної потужності гідроагрегатів (стійкість регулювання при паралельній роботі в енергосистемі на холостому ході і під навантаженням, при автономній роботі на ізольоване навантаження). Ця модель враховує перехідні процеси в водоводі і явище гідравлічного удару. У початковій стадії переміщення направляючого апарату призводить до коливань тиску в водогоні при збільшенні витрати води. Потужність гідротурбіни спочатку падає, потім

починає збільшуватися. І, навпаки, при зменшенні витрати води потужність гідротурбіни спочатку зростає, а потім починає знижуватися. Поведінку гідротурбіни в динаміці описує наступна система рівнянь:

$$q = \mu(1 + 0,5h), \quad (2.20)$$

$$h = -W(p)q, \quad (2.21)$$

$$m_T = q(1 + h). \quad (2.22)$$

Вплив інерції потоку води і коливань тиску в водогоні на динамічні властивості гідротурбіни враховується рівнянням жорсткого гідравлічного удару

$$W(p) = T_w p. \quad (2.23)$$

Параметри пружного гідрудару зазвичай невідомі, для їх визначення потрібні спеціальні дослідження. У цих умовах в практичних розрахунках використовують вираз (2.21) для жорсткого гідрудару, в якому фігурує єдиний параметр TW , який або відомий, або його можна розрахувати, маючи параметри водоводу.

На підставі виразів (2.20 - 2.23) для ГА на основі СГ в літературних джерелах пропонується математичний опис гідротурбін при $\omega = \text{const}$. Передавальна функція гідротурбін, розглянута відносно керуючого впливу μ , формованого шляхом зміни кута відкриття НА, при $\omega = \text{const}$,

$$W_T(p) = \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \mu(p)} = M_T \frac{-T_w p + 1}{\frac{T_w}{2} p + 1}. \quad (2.24)$$

При регулюванні потужності ГА шляхом впливу на НА гідротурбіни, передавальна функція об'єкта управління являє собою немінімально-фазову ланку. Замкнуту систему на підставі немінімально-фазової ланки неможливо зробити швидкою, тому що неможливо компенсувати праві нулі в передавальній функції об'єкта управління (2.24).

Для розробки нової математичної моделі скористаємося виразами (2.20÷2.23). Дані вирази отримані для гідротурбіни при $\omega = \text{const}$. Тому в (2.20 - 2.23) не враховано зміну частоти обертання ГА, що видно з виразу (2.20).

Для міні-ГЕС на основі МПЖ даний тип математичного опису гідротурбіни не підходить, тому що частота обертання ГА $\omega = \text{var}$. Автором пропонується записати математичну модель гідротурбіни з урахуванням зміни частоти обертання. Тоді математичний опис РВ гідротурбіни набуде вигляду:

μ_{HA} - керуючий вплив, що представляє собою гідравлічний опір турбіни,

$$P_T = q(1 + h) \quad (2.25)$$

$$q = \mu \left(1 + \frac{h}{2} \right);$$

$$\mu = \mu_{\text{HA}} + \mu_{\omega} \quad (2.26)$$

$$h = -T_w \frac{dq}{dt};$$

де:

$$P_T = \frac{P_T}{P_H}. \quad (2.27)$$

яке змінюється за допомогою НА (номінальному відкриттю НА відповідає значення $\mu_{\text{HA}} = 1$); μ_{ω} - змінна, що враховує дію відцентрової сили, що перешкоджає проходженню води через направляючий апарат.

Змінна, що враховує дію відцентрової сили, визначається виразом вигляду

$$\mu_{\omega} = -k_{\mu}^{\omega} (\omega - \omega_H) = -k_{\mu}^{\omega} \Delta\omega, \quad (2.28)$$

$$k_{\mu}^{\omega} = \frac{\overline{k_{\mu}^{\omega}}}{\omega_H}, \quad (2.29)$$

де коефіцієнт k_{μ}^{ω} - тангенс кута нахилу дотичної до характеристики $\alpha = \text{const}$ РВ гідротурбіни (рис. 1.5) в точці лінеаризації,

$$\overline{k_{\mu}^{\omega}} = \frac{\Delta q}{\Delta \overline{\omega}}$$

За отриманими виразами складена структура моделі РВ гідротурбіни, представлена на рис 2.9 і проведено моделювання при ступінчастій зміні керуючого впливу M_E .

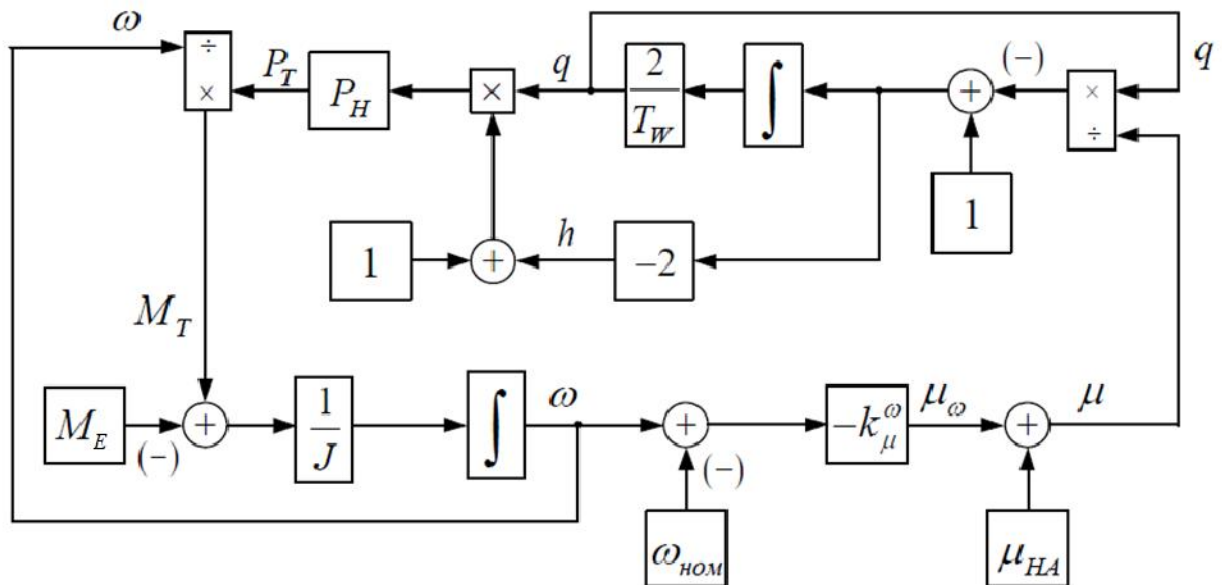


Рисунок 2.9 – Математична модель РВ гідротурбіни з урахуванням кінетичної енергії води в водогоні

Дана математична модель необхідна для перевірки параметрів, отриманих розрахунковим шляхом, або уточнення і коригування параметрів для необхідного алгоритму управління.

Запропонована математична модель має кілька припущень:

- стінки водоводу жорсткі;
- гідротурбіна працює в зоні швидкостей, де ККД практично не змінюється;
- математична модель не розглядає пуск і гальмування ГА.

Результати цифрового моделювання наведені на рис. 2.10 - 2.12. ГА відпрацьовує збільшення завдання активної потужності.

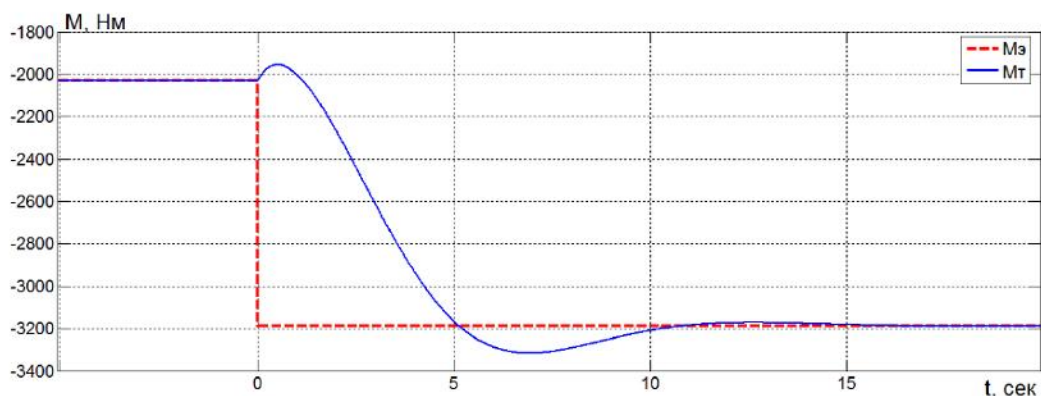


Рисунок 2.10 - Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ

Як видно з рис.2.10 - 2.12. при збільшенні електромагнітного моменту M_E МПЖ в перший період часу потужність гідротурбіни зменшується і, потім, поступово наростає до сталого значення. Цей ефект пояснюється наступним чином. При збільшенні електромагнітного моменту МПЖ динамічний момент ГА зменшується. Це призводить до гальмування ГА. При цьому відцентрова сила зменшується, не перешкоджаючи проходженню води через НА, що призводить до зниження тиску перед НА (гідроудар). Зниження тиску далі призводить до зменшення потужності гідротурбіни до тих пір поки витрата води не починає збільшуватися.

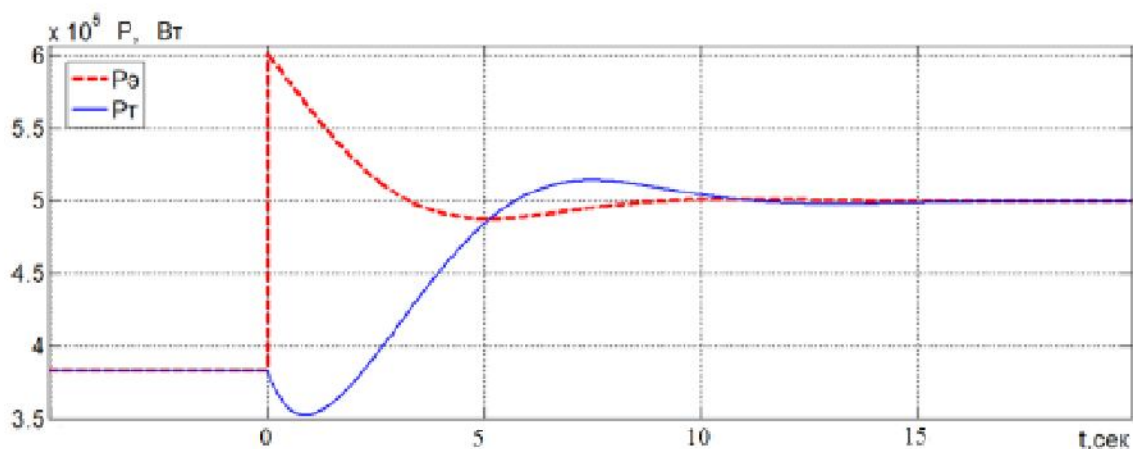


Рисунок 2.11 - Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ

Після того, як витрата води почала збільшуватися, а частота обертання зменшуватися, потужність гідротурбіни починає збільшуватися за рахунок збільшення витрати води до сталого значення.

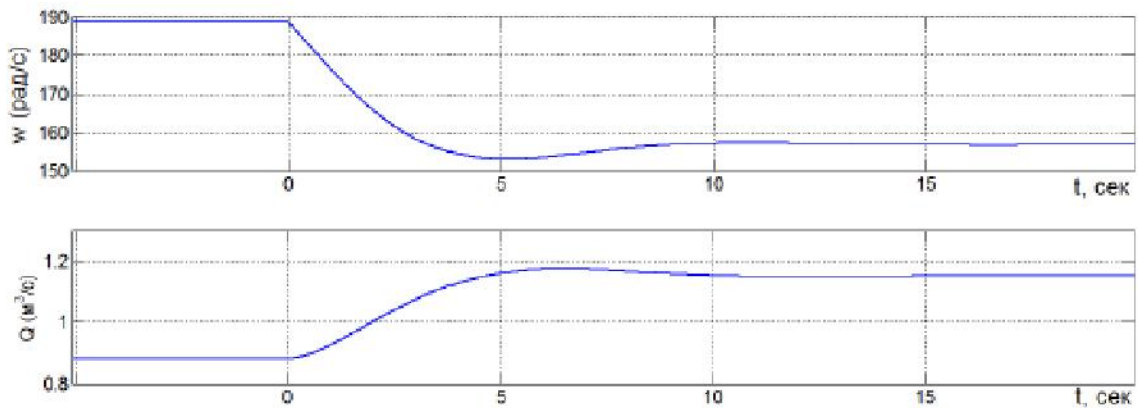


Рисунок 2.12 - Перехідні процеси по кутовий швидкості вала і витраті води ГА

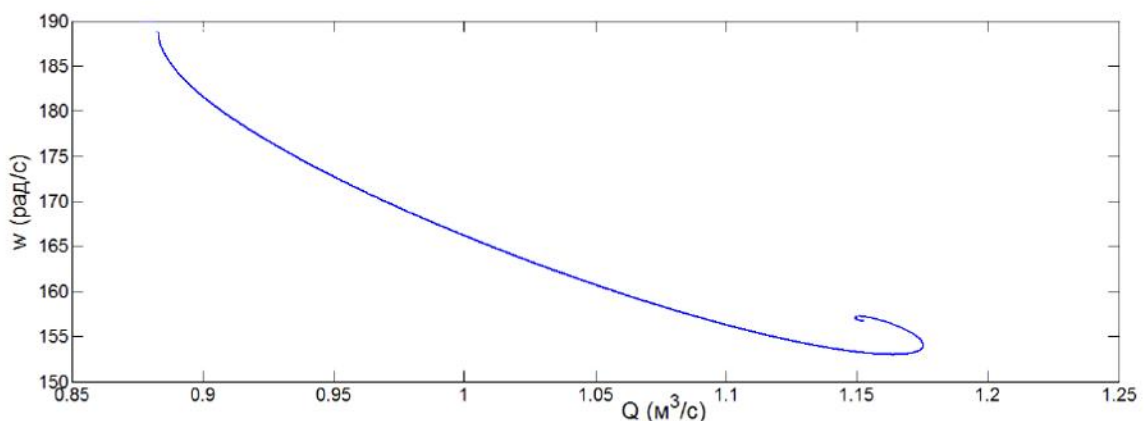


Рисунок 2.13 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

Висновки по розділу 2

1. На підставі аналізу фізичних процесів в гідросистемі ГА розроблена нова математична модель РВ гідротурбіни (рис. 2.3). Адекватність даної моделі підтверджують результати цифрового моделювання.
1. У традиційних ГА на основі синхронного генератора частота обертання ГА визначена постійним значенням частоти мережі, а активна потужність, що генерується, дорівнює потужності на валу турбіни (за

вирахуванням втрат в генераторі). Управління потужністю на валу турбіни ускладнюється необхідністю змінювати витрату води через турбіну, значення якого визначає кінетичну енергію мас води в напірному водоводі. Застосування генератора з регульованою частотою обертання валу дає можливість перетворювати зміну кінетичної енергії мас води в напірному водоводі в зміну кінетичної енергії обертових мас ГА. В результаті з'являється можливість працювати з різними значеннями активної потужності, що генерується, і потужності на валу турбіни в динамічних режимах. Це дозволяє швидко змінювати активну потужність генератора, керуючи його електромагнітним моментом.

3. ПОБУДОВА І АНАЛІЗ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

3.1 Передавальні функції гідроагрегату, керованого по частоті обертання валу

Для розробки методики синтезу контурів регулювання, частоти обертання і активної потужності, що генерується, ГА, необхідно отримати відповідні передавальні функції ГА. Вихідним матеріалом для цього послужить обґрунтована в розділі 2 система рівнянь (2.8, 2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27) при $\omega = \text{var}$. Так як ГА є нелінійним об'єктом управління, розглянемо найбільш поширену для такого випадку форму опису властивостей систем.

Для отримання передавальних функції необхідно лінеаризувати систему рівнянь (2.8, 2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27). Розглянемо роботу ГА поблизу деякої робочої точки P_0, Q_0 . Використовуємо рівняння, наведені в розділі 2 (2.8, 2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27).

$$P_T = q(1 + h),$$

$$q = \left(\mu_{HA} + \mu_{\omega} \right) \left(1 + \frac{h}{2} \right),$$

$$h = -T_W \frac{dq}{dt},$$

де:

$$T_W = \frac{Q_H}{gH_H} \sum_i^n \frac{L_i}{S_i};$$

$$h = \frac{H - H_H}{H_H} = \frac{\Delta H}{H_H};$$

$$P_T = \frac{P_T}{P_H}$$

$$q = \frac{Q}{Q_H}; \quad m_T = \frac{M_T}{M_H}.$$

Перейдемо до рівнянь у відхиленнях. Тоді вирази (1.17 г), (2.8), (2.27) приймуть вигляд:

$$q = \frac{Q}{Q_H} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H}, \quad (3.1)$$

$$p_T = \frac{P_T}{P_H} = \frac{P_T^0 + \Delta P_T}{P_H}, \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta H}{H_H} = -\frac{T_w}{Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt}. \quad (3.3)$$

Проведемо підстановку вище приведених виразів (3.1), (3.2), (3.3) у вирази (2.25), (2.20):

$$\frac{P_T^0 + \Delta P_T}{P_H} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H} \left(1 + \frac{\Delta H}{H_H} \right); \quad (3.4)$$

$$\frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H} = (\mu_0 - k_\mu^\omega \Delta \omega) \left(1 + \frac{\Delta H}{2H_H} \right). \quad (3.5)$$

Перетворимо вираз (3.4) і підставимо в нього (3.3)

$$\frac{\Delta P_T}{P_H} = \frac{\Delta Q}{Q_H} - \frac{Q_0}{Q_H} \frac{T_w}{Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt}. \quad (3.6)$$

Рівняння (3.6) представимо в операторній формі, замінивши символ диференціювання оператором p ,

$$\frac{d}{dt} = p,$$

$$\frac{\Delta P_T(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{P_H}{Q_H} \left(1 - \frac{Q_0}{Q_H} T_w p \right). \quad (3.7)$$

Використовуючи (3.5) перетворимо вираз (3.3)

$$\frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H} = \mu_0 - \frac{\mu_0 T_W}{2Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt} - k_\mu^\omega \Delta \omega + k_\mu^\omega \Delta \omega \frac{T_W}{2Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt}.$$

При $\frac{Q_0}{Q_H} = \mu_0$

$$\frac{\Delta Q}{Q_H} = -\frac{\mu_0 T_W}{2Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt} - k_\mu^\omega \Delta \omega. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.8) представимо в операторній формі, замінивши символ диференціювання оператором p , тоді

$$\frac{d}{dt} = p,$$

$$\frac{\Delta Q(p)}{\Delta \omega(p)} = -\frac{k_\mu^\omega Q_H}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p}. \quad (3.9)$$

Перемножимо вирази (3.7), (3.9) і отримаємо передавальну функцію гідротурбіни

$$\frac{\Delta P_T(p)}{\Delta \omega(p)} = \frac{\Delta P_T}{\Delta Q} \frac{\Delta Q}{\Delta \omega} = -\frac{P_H}{Q_H} \left(1 - \frac{Q_0}{Q_H} T_W p \right) \frac{Q_H k_\mu^\omega}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p}.$$

$$\frac{\Delta P_T(p)}{\Delta \omega(p)} = -P_H k_\mu^\omega \frac{1 - \mu_0 T_W p}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p}. \quad (3.10)$$

Отримавши передавальну функцію по потужності гідротурбіни, знайдемо передавальну функцію по моменту гідротурбіни, $\frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)}$.

Для цього скористаємося виразом

$$\Delta P_T = \Delta M_T \omega_0 + \Delta \omega M_T^0 + \Delta M_T \Delta \omega, \quad (3.11)$$

де M_T^0 - значення моменту турбіни в точці лінеаризації

Складовою другого порядку в виразі (3.11) нехтуємо.

Вирішимо (3.10) спільно з (3.11). В результаті маємо:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} &= -\frac{P_H k_\mu^\omega}{\omega_0} \frac{1 - \mu_0 T_W p}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p} - \frac{M_T^0}{\omega_0}, \\ \frac{\Delta M_T(p) \omega_0 + \Delta \omega(p) M_T^0}{\Delta \omega(p)} &= -P_H k_\mu^\omega \frac{(1 - \mu_0 T_W p)}{\left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}, \\ \frac{\Delta M_T(p) \omega_0}{\Delta \omega} &= -P_H k_\mu^\omega \frac{(1 - \mu_0 T_W p)}{\left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)} - M_T^0, \\ \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} &= -\frac{P_H k_\mu^\omega (1 - \mu_0 T_W p) - M_T^0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}{\omega_0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}, \\ \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} &= \frac{-(P_H k_\mu^\omega + M_T^0) - T_W p \left(\frac{\mu_0 M_T^0}{2} - P_T^0 k_\mu^\omega\right)}{\omega_0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Перетворимо отриману передавальну функцію (3.12) до більш зручного виду,

$$W_T(p) = \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} = - \frac{(P_H k_\mu^\omega + M_T^0) T_W \frac{\mu_0 \frac{M_T^0}{2} - P_T^0 k_\mu^\omega}{(P_H k_\mu^\omega + M_T^0)} p + 1}{\omega_0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)} \quad (3.13)$$

Вираз (3.13) являє собою передавальний функцію гідротурбіни у вигляді відношення зображення по Лапласу моменту гідротурбіни до зображення по Лапласу кутової швидкості робочого колеса. Продемоделюємо ГА міні-ГЕС. Математична модель гідротурбіни представлена на рис. 3.1.

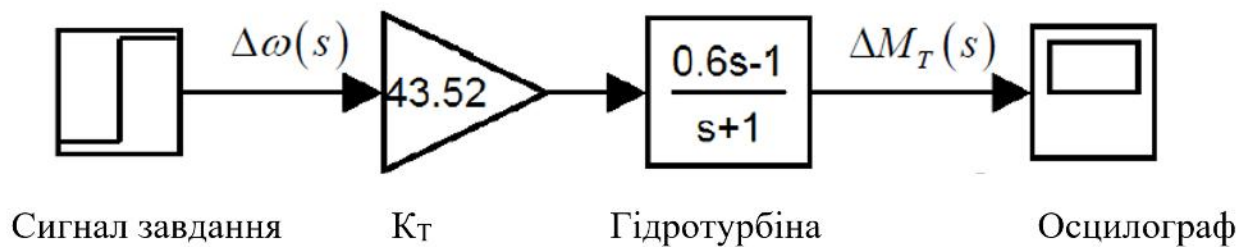


Рисунок 3.1 – Математична модель гідротурбіни.

s - оператор Лапласа

Проаналізуємо реакцію гідротурбіни на ступінчастий сигнал. З рис. 3.2. видно, що перехідна функція має аперіодический вид. Гідротурбіна входить в 5% зону усталеного режиму за 5 секунд.

Розглянемо структурну схему ГА, наведену на рис. 3.3. Для радіально-осьових гідротурбін низьким коефіцієнтом швидкохідності є можливість оперативно змінювати вироблення активної потужності шляхом зміни частоти обертання гідроагрегату. Тому можна організувати повноцінне функціонування такого ГА автоматичному режимі, маючи звичайне для міні-ГЕС гідромеханічне обладнання з ручним приводом, тобто без використання гідроприводів НА і маслостанції.

Управління електромагнітним моментом МПЖ (M_E) виробляють в системах автоматичного регулювання МПЖ з орієнтуванням по вектору потокозчеплення статора (Ψ_s). Максимальний M_E , який може створювати МПЖ, дорівнює добутку модуля Ψ_s , на гранично допустиме значення струму ротора. Значення практично повністю визначається співвідношенням амплітуди і частоти напруги мережі. Тому при просадках напруги мережі будуть відбуватися раптове зменшення Ψ_s і зниження M_E .

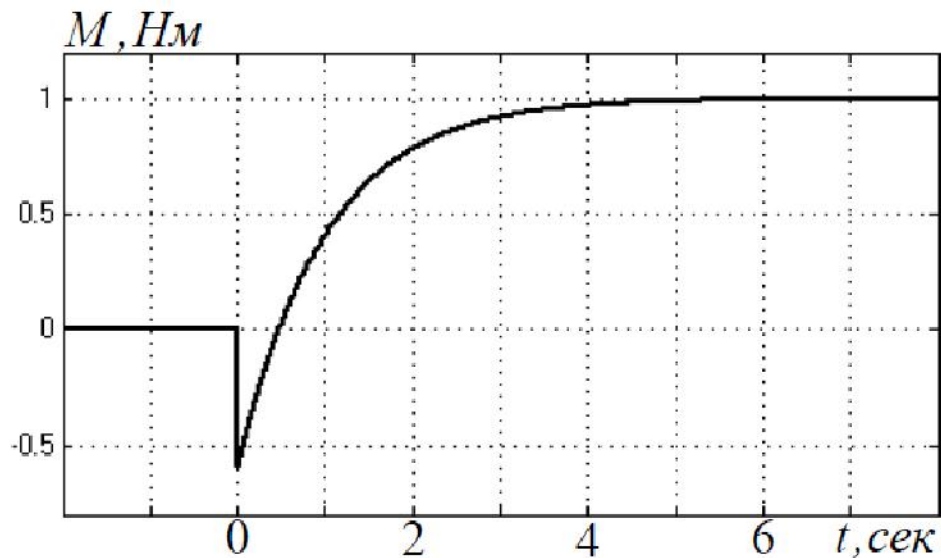


Рисунок 3.2 - Перехідна функція гідротурбіни при миттєвому зміні кута відкриття НА

У режимах обмеження гальмуючого електромагнітного моменту M_E МПЖ, при досягненні стельового значення $M_E = M_E$, перехідні процеси за швидкістю вала ГА будуть обумовлені власними динамічними властивостями ГА. У такому режимі МПЖ-генератор має абсолютно м'яку механічну характеристику, тобто розвиває один і той же гальмуючий момент у всьому діапазоні швидкостей обертання вала.

Вкрай небажаним є коливальний характер процесів $\omega(t)$, оскільки в водоводах міні-ГЕС є умови для поширення поздовжніх хвиль витрати і тиску. В результаті накладення хвиль, відбитих від неоднорідностей трубопроводу, і

хвиль, створюваних гідромашин, може виникати руйнування гідромеханічного обладнання. Дане явище носить назву гідроудару.

З метою вивчення впливу основних параметрів ГА на коливальність перехідних процесів за швидкістю обертання, (t), поставлена задача дослідження динамічних властивостей ГА.

Структурна схема об'єкта управління приведена на рис. 3.3.

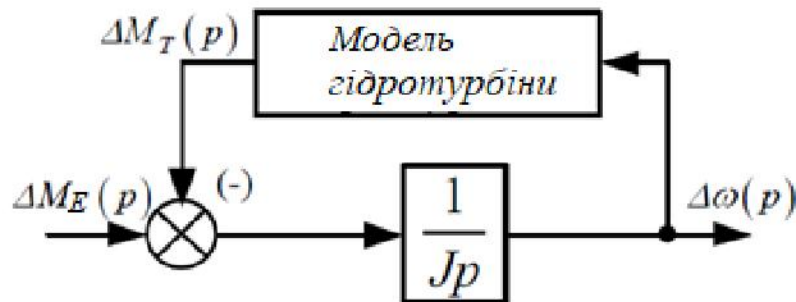


Рисунок 3.3 - Структурна схема динамічної моделі ГА

На підставі структурної схеми (рисунок 3.3) передавальну функцію ГА запишемо у вигляді

$$W_{ГА}(p) = \frac{\omega_0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0 \left[\frac{J \omega_0 \frac{\mu_0 T_W}{2} p^2}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J \omega_0 - P_T^0 k_\mu^\omega T_W + M_T^0 \frac{\mu_0 T_W}{2} \right) p + 1 \right]}, \quad (3.14)$$

$$W_{ГА}(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta M_\omega(p)} = \frac{\omega_0}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \frac{1 + \mu_0 \frac{T_W}{2} p}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$

$$\text{где } T^2 = \frac{J \omega_0 \frac{\mu_0 T_W}{2}}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0}, \quad 2\xi T = \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J \omega_0 - P_T^0 k_\mu^\omega T_W + M_T^0 \frac{\mu_0 T_W}{2} \right),$$

ξ - коефіцієнт демпфірування; M_T - значення моменту турбіни в точці лінеаризації.

Знайдемо передавальну функцію ГА по електричній потужності ГА. Знаючи, що $P_E = M_E \omega_0$ використовуємо вираз (3.14) і запишемо передаточну функцію ГА по електричній потужності щодо кутової швидкості цей вираз буде:

$$W_{ГАМ}(p) = \frac{\Delta P_{\Xi}(p)}{\Delta \omega(p)} = \omega_0 \frac{\Delta M_{\Xi}(p)}{\Delta \omega(p)}.$$

$$W_{ГАМ}(p) = \frac{(M_T^0 + k_{\mu} P_H) \left(\frac{J \omega_0 \mu_0 \frac{T_W}{2} p^2}{P_H k_{\mu}^{\omega} + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_{\mu}^{\omega} + M_T^0} \left(J \omega_0 - T_W P_T^0 k_{\mu}^{\omega} + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2} \right) \cdot p + 1 \right)}{\left(\mu_0 \frac{T_W}{2} p + 1 \right)}. \quad (3.15)$$

Отримана передаточна функція необхідна для синтезу контуру регулювання генерованої активної потужності.

3.2 Аналіз динамічних властивостей об'єкта управління

Умова стійкості ГА (рис. 3.3). Оскільки стійкість системи визначається корнями знаменника передавальної функції (3.14). Умовою стійкості $2\xi T > 0$ відповідає нерівність,

$$\omega_0 J > T_W k_{\mu}^{\omega} P_T^0 - \mu_0 T_W \frac{M_T^0}{2}. \quad (3.16)$$

Умова (3.16) забезпечується зменшенням співвідношення T_W/J .

Умова аперіодичного характеру процесів ГА більш сувора, ніж (3.16) – умова відсутності вільних коливань, $\xi \geq 1$. Виконання нерівності, $\xi \geq 1$ повинно забезпечити демпфірування коливань швидкості вала ГА, небезпечно з точки зору виникнення гідроудару. Дана умова має вигляд

$$\left(\omega_0 J + \mu_0 \frac{T_W}{2} M_T^0 - T_W k_{\mu}^{\omega} P_T^0 \right)^2 \geq 2 T_W \omega_0 J \mu_0 (M_T^0 + k_{\mu}^{\omega} P_H). \quad (3.17)$$

$$\frac{P_T^0}{P_H} = \frac{Q_0}{Q_H} = \mu_0,$$

З урахуванням співвідношень нерівність (3.17) може бути представлено у вигляді:

$$(\omega_0 J)^2 + \left(\mu_0 \frac{T_W}{2} M_T^0 \right)^2 + (T_W k_\mu^\omega P_T^0)^2 \geq T_W \omega_0 \mu_0 \left(J M_T^0 + T_W k_\mu^\omega (M_T^0)^2 + 4 J k_\mu^\omega P_H \right). \quad (3.18)$$

Покажемо, що виконання умови (3.18) забезпечується зменшенням співвідношення T_W/J для чого розділимо праву і ліву частини на J^2

$$\omega_0^2 + \left(\mu_0 \frac{T_W}{2J} M_T^0 \right)^2 + \left(k_\mu^\omega \frac{T_W}{J} P_T^0 \right)^2 \geq \frac{T_W}{J} \omega_0 \mu_0 \left(M_T^0 + \frac{T_W}{J} k_\mu^\omega (M_T^0)^2 + 4 k_\mu^\omega P_H \right). \quad (3.19)$$

Потім, спрямувавши в (3.19) до нуля, отримуємо нерівність $\omega_0^2 \geq 0$, справедливості якого очевидна.

Отже, виконання умов (3.16, 3.17) забезпечується шляхом збільшення J і зменшення T_W . Зміна інших коефіцієнтів (3.16, 3.17) означає або зміну режиму гідротурбіни шляхом впливу на НА, або зміну конструктивних параметрів гідротурбіни.

Зменшення постійної часу водоводу, T_W , на початковій стадії проектування міні-ГЕС можливо за рахунок вибору гідроспороди з найменшою довжиною водоводу. На наступних стадіях створення міні-ГЕС для зменшення $T W$ можна збільшувати S і - площі поперечного перерізу окремих ділянок проточного тракту ГА.

ГА міні-ГЕС, як правило, має водовід у вигляді металевого трубопроводу постійного перерізу S довжини L . Внесок проточної частини турбіни в величину $T W$ для розглянутих міні-ГЕС незначний у порівнянні з водоводом.

Згідно (2.14), практично прямо пропорційна співвідношенню. У той же час, і кінетична енергія, запасені водою в водоводі - $E K$, прямо пропорційна співвідношенню. Таким чином, можна вважати, що $E K$, прямо пропорційна $T W$.

Додаткове збільшення моменту інерції, ГА здійснюють установкою маховика. Кінетична енергія, що запасється обертовими масами ГА (Е К), збільшується прямо пропорційно J,

Зменшення для виконання умови демпфірування коливань (3.17) означає зменшення співвідношення кінетичних енергій, що запасуються водою в водоводі і обертовими масами на валу ГА,

Промодельюємо отриману передавальну функцію ГА (рисунок 3.3) і структурну модель ГА (рисунок 2.9) в програмі Matlab / Simulink.

При моделюванні математичної моделі міні-ГЕС отримана реакція системи на ступінчастий сигнал, Рисунок 3.5.

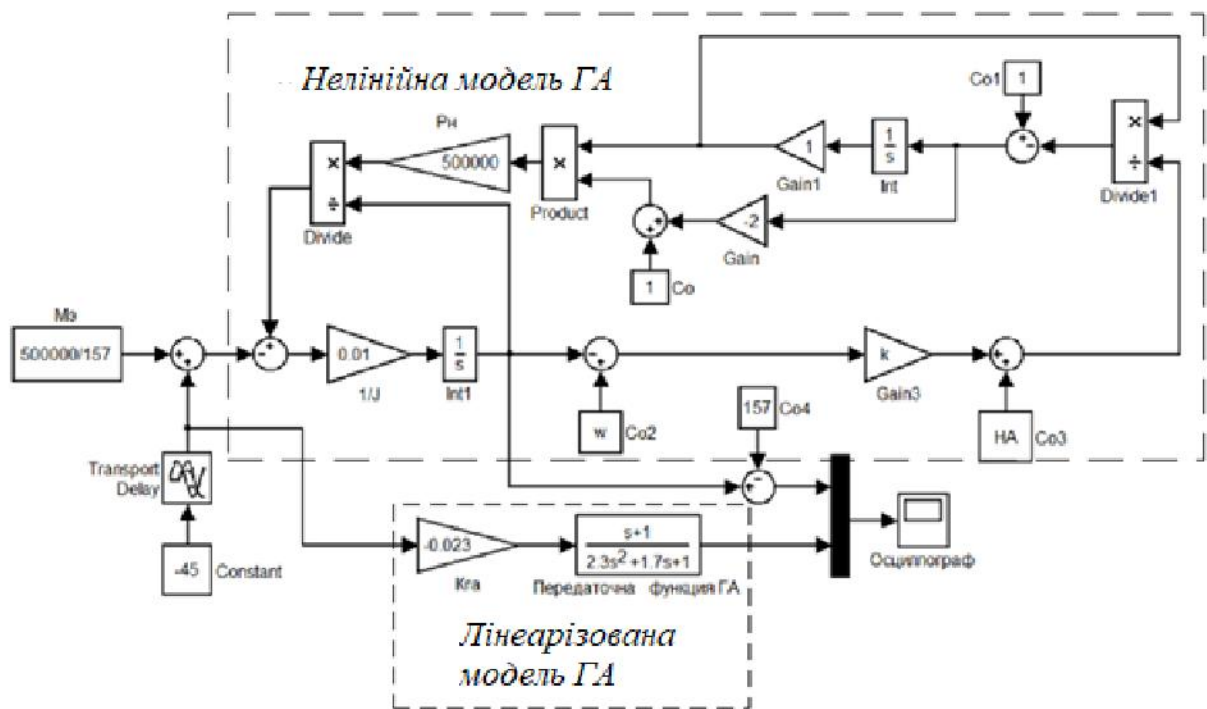


Рисунок 3.4 - Структурна модель ГА і передавальна функція ГА

З рис. 3.5 видно, що реакції моделей на ступінчастий сигнал завдання практично ідентичні

Перехідна функція, розрахована за W ГА (p) (3.14):

- час досягнення максимальної точки на 5,5 секунді;
- час досягнення 5% зони стійкості на 8 секунді;

- перерегулювання становить $\sigma = 15,7\%$
- перехідний процес структурної моделі ГА (рисунок 2.10.)
- час досягнення максимальної точки на 5 секунд;
- час досягнення 5% зони стійкості на 8,8 секунд;
- перерегулювання становить $\sigma = 12,8\%$.

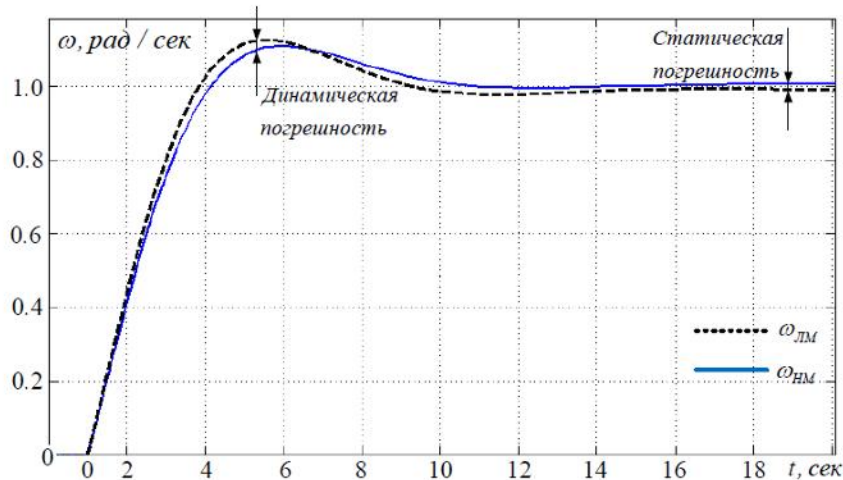


Рисунок 3.5 - Перехідні функції ГА. $\omega_{ЛМ}(t)$ - перехідна функція розрахована по лінеаризованній моделі ГА, $\omega_{НМ}(t)$ - перехідна функція по нелінеаризованній моделі ГА

Промодельовати і порівнявши результати лінійної і нелінійної моделі ГА по ступінчастому впливу електромагнітного моменту бачимо, що лінеаризація дає статичну похибка 1,14%, максимальна динамічна похибка склала 2,5%.

Висновки по розділу 3

1. Зроблено висновок передавальних функцій ГА на основі МПЖ як об'єкта управління з кутової швидкості вала (3.14) і по генерується активної потужності (3.15). В якості керуючого впливу розглядається електромагнітний момент МПЖ-генератора, задане значення якого практично безінерційний відтворюється сучасними системами векторного управління МПЖ.

2. При просадках напруги мережі система автоматичного управління МПЖ-генератором може переводити його в режим роботи з абсолютно м'якою механічною характеристикою внаслідок автоматичного обмеження струмів перетворювача частоти по ланцюгах ротора. Виникнення режимів ГА, при яких генератор має абсолютно м'яку механічну характеристику, небажано, оскільки така електрогідромеханіческая система може бути коливальною і навіть нестійкою.
3. На підставі аналізу полінома знаменника передавальної функції лінеаризованної моделі керованого по кутовий швидкості ГА отримані умови стійкості (3.16) і аперіодического характеру перехідних процесів по кутовий швидкості вала ГА (3.17) в режимі обмеження електромагнітного моменту. Дані умови дозволяють виробляти вибір значень сумарного моменту інерції і перетину напірного водоводу ГА.
4. Підвищення запасів стійкості і демпфірування коливань швидкості вала ГА в режимі обмеження електромагнітного моменту МПЖ-генератора забезпечується збільшенням сумарного моменту інерції на валу ГА і зменшенням постійної часу водоводу T_W . Практично зменшення реалізується збільшенням площі поперечного перерізу водоводу S_W . Величина T_W обернено пропорційна S_W .

4. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА МЕТОДИКИ СИНТЕЗУ РЕГУЛЯТОРОВ ГІДРОАГРЕГАТИВ МІНІ-ГЕС НА ОСНОВІ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

Як вже було показано в першому розділі, міні-ГЕС працюють з незмінним відкриттям напрямних апаратів турбін. При цьому значна частина води проходить по обвідному руслу, минаючи гідротурбіну. Ситуація коли природний приплив води в верхній б'єф менше, ніж витрата води через ГА неприпустима, тому що вона буде приводити до зниження рівня води у водосховищі нижче допустимого і до подальшого руйнування гідротурбіни.

Пропонований в магістерській роботі спосіб підвищення ефективного використання міні-ГЕС дозволить:

- виробляти електроенергію відповідно до потреб споживача;
- автоматично здійснювати позапланове вироблення електроенергії відповідно до сигналу завдання, що приходять від диспетчера;
- використовувати акумулюючу здатність водосховища;
- обмежувати мінімальне значення рівня води у водосховищі.

Для здійснення розглянутих можливостей, запропоновано алгоритм управління витратою води шляхом зміни частоти обертання ГА на основі системи підпорядкованого регулювання кутової швидкості і активної потужності ГА міні-ГЕС.

Для реалізації даного алгоритму необхідно застосування ГА зі змінною частотою обертання валу на основі радіально-осьової гідротурбіни з низьким коефіцієнтом швидкохідності і генераторного комплексу за схемою машина подвійного живлення.

Застосування на міні-ГЕС РВ гідротурбіни з ГК на основі МПЖ дозволить нам досягти раціонального використання, як електроенергії, так і гідроресурсів.

Міні-ГЕС з ГА на основі МПЖ підключена статором МПЖ до мережі нескінченної потужності, а ротор через ПЧ до мережі нескінченної

потужності. Це дозволяє віддавати електроенергію в мережу нескінченної потужності, як з боку статора, так і ротора. При зміні завдання потужності P_E^Z , повинно змінюватися вироблення активної потужності P_E МПЖ-генератора, що реалізується за рахунок регулювання електромагнітного моменту M_E МПЖ.

Зменшення вироблюваної активної потужності МПЖ буде супроводжуватися збільшенням швидкості гідроагрегату. При цьому витрата води ГА буде падати за рахунок відцентрового ефекту РВ гідротурбіни. З універсальної характеристики РВ гідротурбіни (рис.1.10) видно, що збільшення частоти обертання турбіни, яка працює з номінально відкритим напрямним апаратом, призводить до зменшення витрати води.

За рахунок води, яка запасається в водосховище, ГА буде здатний відпрацювати сигнал позапланового навантаження, що приходить з ОДУ.

Крім того, з'являється можливість короткочасно збільшувати вироблення активної потужності міні-ГЕС, витрачаючи запасену в водосховище воду.

4.1 Розробка структури системи управління гідроагрегату міні-ГЕС

Завдяки сучасному розвитку електроніки, створюються електроприводи з високими динамічними характеристиками. В системі управління електроприводами найбільшого поширення набули структури з підпорядкованим регулюванням координат (СПР).

Систему управління міні-ГЕС на основі МПЖ доцільно будувати у вигляді багатоконтурної системи підпорядкованого регулювання координат.

Для побудови СПР необхідно:

1. Провести вибір регульованих змінних і законів їх взаємозалежного управління.

2. Здійснити компенсацію основних внутрішніх перехресних зв'язків між каналами об'єкта регулювання шляхом введення компенсуючих сигналів в САР.
3. Здійснити компенсацію статичних нелінійностей об'єкта регулювання за допомогою включення САР нелінійних елементів, що відтворюють функціональні залежності, зворотні відповідним залежностям між регульованими змінними.
4. Визначити передавальні функції регуляторів відповідно до принципу підпорядкованого регулювання послідовної корекції параметрів.

Система підпорядкованого регулювання координат характеризується послідовним включенням регуляторів, число яких відповідає кількості регульованих координат. Для управління ГА міні-ГЕС доцільно прийняти триконтурну систему регулювання координат: внутрішній контур швидкості ГА, контур активної потужності ГА і зовнішній контур регулювання рівня води у водосховищі міні-ГЕС.

Запропонована функціональна схема, побудована за вказаним принципом, представлена на рис. 4.1. На вході регулятора кожного з контурів порівнюються сигнали, пропорційні заданому і дійсному значенням вихідної координати даного контуру, а вихідний сигнал регулятора служить задаючим сигналом для подальшого контуру. Важливою перевагою цієї структури є також можливість простими засобами здійснювати обмеження будь-якої з регульованих координат системи. Залежно від конкретних умов межі обмеження можуть змінюватися за заданим законом.

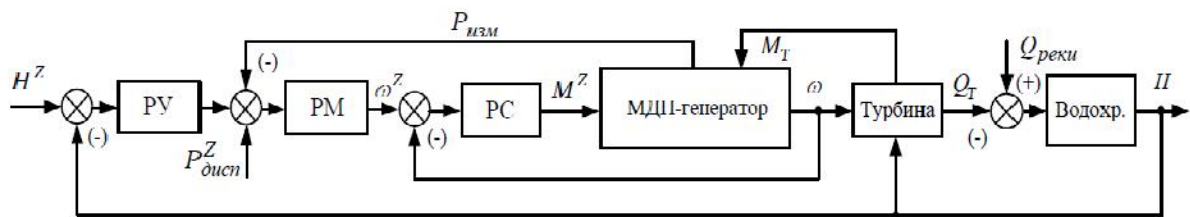


Рисунок 4.1 – Функціональна схема САУ міні-ГЕС з підпорядкованим регулюванням координат

На рис.4.1 наведені такі елементи: РУ, РМ, РС - регулятори рівня води, активної потужності і кутової швидкості вала, відповідно; H^Z , ω^Z , M^Z – сигнали завдання рівня води, кутової швидкості та електромагнітного моменту, відповідно; $P^Z_{\text{внєп.}}$ – сигнал завдання позапланової активної потужності з ОДУ.

Внутрішній контур швидкості підпорядкований контуру потужності, який є другим (зовнішнім) контуром по відношенню до першого (внутрішнього) контуру.

Контур потужності підпорядкований контуру рівню води у водосховищі, якою є третім зовнішнім контуром, по відношенню до другого – контуру потужності.

Внутрішній контур швидкості включає в себе регулятор швидкості (РС), систему векторного керування електромагнітним моментом МПЖ-генератора, гідротурбіну ГА і тахогенератор. На вході регулятора швидкості порівнюються сигнал завдання швидкості з сигналом зворотного зв'язку по швидкості. Контур потужності включає в себе регулятор активної потужності (РМ), оптимізований контур швидкості і датчик активної потужності. На вході регулятора РМ порівнюються сигнал завдання активної потужності і сигнал зворотного зв'язку по потужності. Вихідний сигнал РМ є сигналом завдання швидкості для підпорядкованого внутрішнього контуру швидкості. Зовнішній контур рівня води у верхньому б'єфі водосховища включає в себе регулятор рівня води (РУ), оптимізований контур потужності, датчик рівня води у верхньому б'єфі водосховища. Сума вихідного сигналу РУ з $P^Z_{\text{дисп.}}$ є сигналом завдання потужності для підпорядкованого внутрішнього контуру потужності.

Оптимізація запропонованої системи методом послідовної корекції справедлива при дотриманні наступних умов: змінні САУ ГА повинні змінюватися в малих межах; регулятори не повинні входити в режим обмеження.

4.2 Методика синтезу контуру регулювання швидкості гідроагрегату на основі МПЖ

Міні-ГЕС на основі МПЖ є нелінійним об'єктом управління, що характеризується сукупністю лінійних підоб'єктів, пов'язаних між собою нелінійної функціональної залежністю. Можлива реалізація регуляторів у вигляді лінійних активних фільтрів, виходячи з оптимальної передавальної функції замкнених контурів регулювання.

Систему регулювання ГА міні-ГЕС на основі МПЖ потрібно синтезувати таким чином, щоб система забезпечувала в сталих режимах підтримку частоти обертання. В динаміці САР повинна забезпечувати швидкий вихід швидкості $\omega(t)$ на рівень завдання. У динамічних режимах САР швидкості повинна забезпечувати обмеження ковзання ротора асинхронної машини на заданому рівні, виходячи з умови обмеження напруги перетворювача частоти з боку кіл ротора.

Ці вимоги досягаються при синтезі САР за рахунок максимального уточнення динамічних властивостей ГА міні-ГЕС.

Розглянемо функціональну схему САР ГА міні-ГЕС, наведену вище (рис.4.1), по контурах.

Як було сказано в розділі 4.1, САУ ГА міні-ГЕС система складається з декількох контурів. Розглянемо внутрішній контур - контур регулювання швидкості (КРШ).

На рис.4.2 приведена структурна схема внутрішнього контура швидкості, яка містить лінеаризовану модель об'єкта управління в малих відхиленнях.

Досліджуваний об'єкт управління сам по собі є нестандартним об'єктом управління для систем керування електроприводами. Для безаварійної роботи ГК необхідно обмежувати частоту обертання ГА, через обмеження напруги ПЧ по колах ротора. Збільшення вироблення електроенергії, в розглянутому ЕП вимагає збільшення електромагнітного моменту, що призводить до

зменшення кутової швидкості ω і, відповідно, до зміни ЕРС в роторній частини електричної машини.

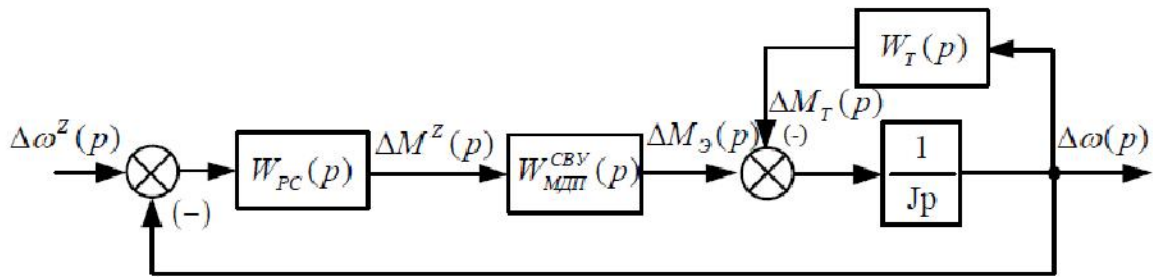


Рисунок 4.2 - Структурна схема КРШ

На етапі синтезу КРШ прийнято допущення про безінерційність СВУ управління МПЖ-генератора по моменту. Структурна схема синтезованого КРШ при зазначеному допущенні приведена на рис. 4.3.

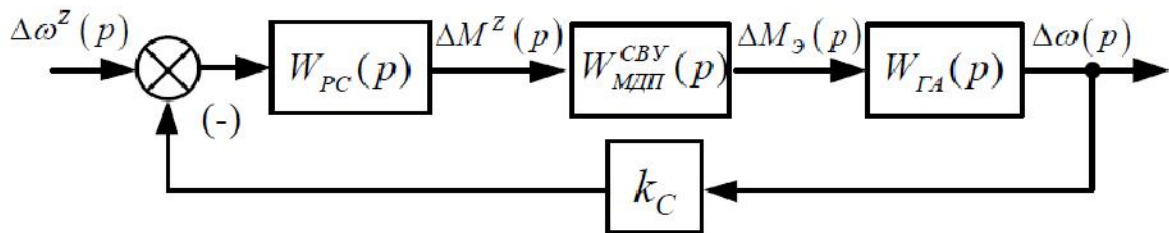


Рисунок 4.3 - Структурна схема контуру регулювання швидкості

На рис. 4.3 $W_{PC}(p)$ - передатна функція регулятора швидкості; $W_{МПЖ}(p)$ - передатна функція МПЖ з СВУ; $\Delta M_E(p)$ - електромагнітний момент МПЖ; $W_{ГА}(p)$ - передатна функція ГА; k_C - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

Для створення методики синтезу контуру регулювання швидкості, скористаємося методом послідовної корекції.

У структуру регулятора введемо ланку, передавальна функція якої обернена по відношенню до передавальної функції компенсуємої ланки,

$$W_{РСП}(p) = [W_{ГА}(p)]^{-1} \quad (4.1)$$

Для забезпечення астатизму КРШ в структуру регулятора послідовно введемо інтегруючу ланку,

$$W_{РСИ}(p) = \frac{1}{T_1 p}. \quad (4.2)$$

Наведемо передавальну функцію регулятора швидкості до виду,

$$W_{РС}(p) = [W_{ГАС}(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_1 p}. \quad (4.3)$$

Параметри компенсуючої частини регулятора повністю визначаються параметрами гідроагрегату. Єдиним варійованим параметром регулятора буде постійна часу його інтегруючої ланки T_1 .

Некомпенсована постійна часу $T_\mu = \Sigma T_c = T_{ЕМ}$ дорівнює сумі некомпенсованих постійних часу системи. З огляду на сказане в першому розділі, величину T_μ приймемо рівною 0,01 секунди.

В результаті, передавальна функція регулятора швидкості набуде вигляду,

$$W_{РС}(p) = \frac{P_H k_\mu^\omega + M_T}{\omega_0} \cdot \frac{J\omega_0 \frac{\mu_0 T_W}{2} p^2}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J\omega_0 - P_H k_\mu^\omega \mu_0 T_W + M_T^0 \frac{\mu_0 T_W}{2} \right) p + 1.$$

$$k_\omega k_c \left(\mu_0 \frac{T_W}{2} p + 1 \right) 2T_\mu p$$

Для синтезу подальшого регулятора – регулятора активної потужності, необхідно визначити передавальну функцію замкнутого КРШ. Спочатку визначимо передавальну функцію розімкнутої системи.

Для отримання передавальної функції розімкнутої системи розмикаємо головний зворотній зв'язок і точку розриву вважаємо входом і виходом системи рис. 4.3. Потім перетворимо структурну схему САУ. За правилом визначення передавальної функції декількох послідовно з'єднаних ланок знайдемо результуючу передавальної функції.

Визначимо передавальну функцію розімкнутого КРШ. Отримаємо вираз:

$$W_{раз}(p) = W_{PC}(p) \cdot W_{МПП}(p) \cdot W_{ГА}(p) \cdot W_{OC}(p), \quad (4.4)$$

де $W_{МПП}^{СВУ}(p) = \frac{k_{\mathcal{E}}}{T_{\mathcal{EM}}p + 1}$ - передавальна функція по електромагнітному моменту СВУ МПЖ;

$W_{OC}(p) = k_C$ - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

При синтезі регулятора швидкості передавальну функцію замкнутого контуру швидкості з достатнім ступенем точності можна прийняти у вигляді,

$$W_{KPC}(p) = \frac{1/k_C}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1}. \quad (4.5)$$

При $a=2$ (4.5) відповідає коливальній ланці з коефіцієнтом демпфірування $\xi = 1/\sqrt{2} = 0.707$.

Отримуємо передавальну функцію регулятора швидкості регулятора швидкості,

$$W_{PC}(p) = W_{ПИИД}(p) \cdot W_{\Phi}(p),$$

$\frac{J\omega_0 - T_W P_H \mu_0 k_{\mu}^{\omega} + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2}}{\omega_0 k_{\mathcal{E}} k_C 2T_{\mu}}$ - коефіцієнт посилення пропорційної частини

$\frac{M_T^0 + k_{\mu}^{\omega} P_H}{k_{\mathcal{E}} k_C \omega_0 2T_{\mu}}$ - коефіцієнт посилення інтегральної частини регулятора швидкості,

$\frac{J\mu_0 T_w}{k_{\Sigma} k_c 4T_{\mu}}$ - коефіцієнт посилення диференціальної частини регулятора швидкості,

$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{\mu_0 \frac{T_w}{2} p + 1}$ - передавальна функція, яка компенсує інерційність води в водогоні.

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості визначається зі співвідношення

$$k_{OC} = \frac{U_{PM \max}}{\omega_H},$$

де $U_{PM \max} = 10 \div 15 B$ - максимальне значення задаючого сигналу напруги на виході РМ.

Промодельємо синтезований контур регулювання швидкості в середовищі Simulink. На рис.4.4 приведена математична модель КРШ ГА міні-ГЕС на основі МПЖ з СВУ, що складається з блоку сигналу завдання з ОДУ, регулятора швидкості, МПЖ з СВУ і передавальної функції ГА.

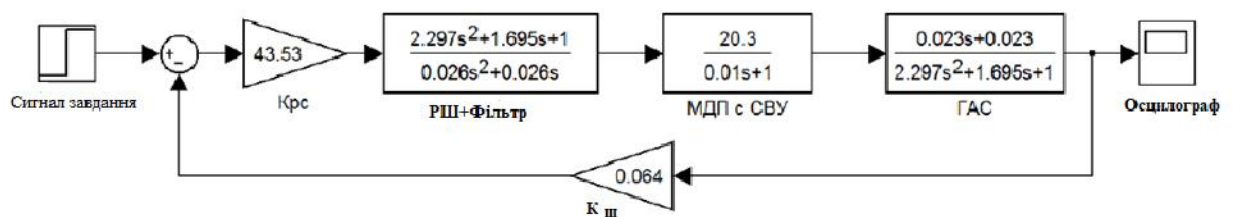


Рисунок 4.4 - Математична модель КРШ ГА на основі МПЖ

На вхід системи подається одиничний ступінчастий сигнал завдання швидкості і КРШ відпрацьовує заданий сигнал. Перехідна характеристика КРШ приведена на рис. 4.5.

Перехідний процес (рис.4.5) має незначне перерегулювання.

Прямі показники якості синтезованої САР КРШ, отримані з графіка перехідного процесу:

- час входження 5% зону - 0,041сек.;
- перерегулювання - 4,3%;
- час досягнення максимальної точки - 0,0624 сек.

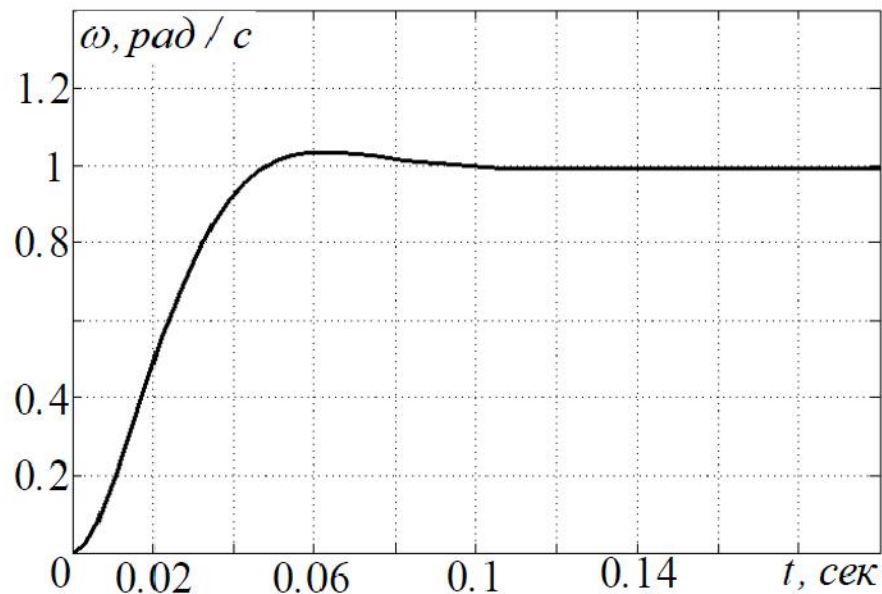


Рисунок 4.5 - Перехідна функція КРШ ГА на основі МПЖ

Для точного обмеження ковзання асинхронної машини в динамічних режимах доцільно застосування КРШ в системі автоматичного регулювання активної потужності. Крім того, КРШ дозволить уникнути хвильових процесів зміни тиску в водогоні, які можуть негативно впливати на ГА.

4.3 Методика синтезу контуру регулювання активної потужності гідроагрегату на основі МПЖ

Зробимо синтез другого контуру СПР - контуру регулювання потужності (рис.4.6). Контур потужності є зовнішнім по відношенню до внутрішнього контуру регулювання швидкості.

Розрахункова схема контуру регулювання потужності міні-ГЕС на основі МПЖ містить в собі регулятор потужності з функцією передачі $W_{PM}(p)$, оптимізований контур швидкості з функцією передачі $W_{KPC}(p)$ і об'єкт управління з функцією передачі $W_{ГAM}(p)$. Вихідний сигнал регулятора потужності слід обмежити через обмежену здатність силового перетворювача по напрузі, так як напруга перетворювача по колах ротора залежить від діапазону регулювання ковзання. Через технічні і економічні показники рекомендований діапазон регулювання швидкості 1: 2. В даному контурі регульованою величиною є активна потужність МПЖ-генератора.

Як було показано вище, структура КРМ складається з передавальної функції регулятора потужності, оптимізованого КРШ і регульованою по потужності гідротурбіни. Скористаємося передавальною функцією (3.19) по активній потужності МПЖ-генератора, наведеної в розділі 3, $W_{ГAM}(p)$.

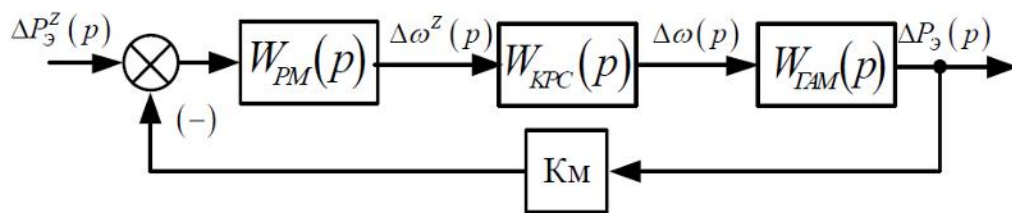


Рисунок 4.6 - Структурна схема контуру регулювання активної потужності

Запишемо передавальну функцію регулятора потужності

$$W_{PM}(p) = [W_{ГAM}(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_2 p}$$

Як і раніше було розглянуто, єдиним варійованим параметром регулятора є величина постійної часу T_2 його інтегруючої ланки.

Налаштуємо систему на модульний оптимум за умовою

$$T_2 = 2T_1 = 4T_u$$

Розглянемо передавальну функцію контуру регулювання потужності (КРП) при налаштуванні на модульний оптимум.

При синтезі регулятора потужності передавальна функція замкнутого контуру швидкості достатнім ступенем точності (через малість некомпенсовані постійної часу T) апроксимується виразом

$$W_{KPC}(p) = \frac{1/k_C}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} = \frac{1/k_C}{2T_\mu p + 1}. \quad (4.6)$$

Тоді некомпенсованою постійною часу в контурі потужності є величина $T_{\mu M} = 2 T_\mu$.

Запишемо передавальну функцію для САР потужності в розімкненому стані,

$$\begin{aligned} W_{PAZ.KPM}(p) &= W_{PM}(p) \cdot W_{KPC}(p) \cdot W_{GAM}(p) = \\ &= [W_{GAM}(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_{\mu M} p} \cdot \frac{1/k_C}{2T_\mu p + 1} \cdot W_{GAM}(p). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Знайдемо передавальну функцію замкненої системи, яка налаштована на модульний оптимум

$$W_{KPM}(p) = \frac{1/k_{OM}}{8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p + 1}. \quad (4.8)$$

У підсумку отримуємо регулятор потужності з передавальною функцією виду,

$$W_{PM}(p) = \frac{\mu_0 k_C \frac{T_W}{2} p + k_C}{(M_T^0 + k_\mu^\omega P_H) \left(\frac{J \omega_0 \mu_0 \frac{T_W}{2} p^2}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J \omega_0 - T_W \mu_0 P_H k_\mu^\omega + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2} \right) p + 1 \right) 4T_\mu k_{OM} p}$$

де $\frac{\mu_0 k_C \frac{T_W}{2}}{4T_\mu k_{OM}}$ - коефіцієнт посилення пропорційної частини регулятора потужності;

$\frac{k_C}{4T_\mu k_{OM}}$ - коефіцієнт посилення інтегральної частини регулятора потужності;

$$W_{\phi_{ГА}}(p) = \frac{1}{(M_T^0 + k_\mu^\omega P_H) \left(\frac{J\omega_0 \mu_0 \frac{T_W}{2} p^2}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J\omega_0 - T_W \mu_0 P_H k_\mu^\omega + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2} \right) p + 1 \right)}$$

передавальна функція фільтра, який компенсує власні динамічні властивості ГА.

Розрахункове значення коефіцієнта зворотного зв'язку по потужності визначається з виразу,

$$k_{OM} = \frac{U_{\max}^2}{P_H},$$

де $U_{\max}^2 = 10 \div 15 B$ максимальне значення напруги завдання активної потужності; P_H - номінальне значення активної потужності ГА міні-ГЕС.

Для перевірки розрахункових параметрів і визначення працездатності синтезованого КРМ, синтезована САР була промодельована в середовищі Matlab / Simulink (рис.4.7).

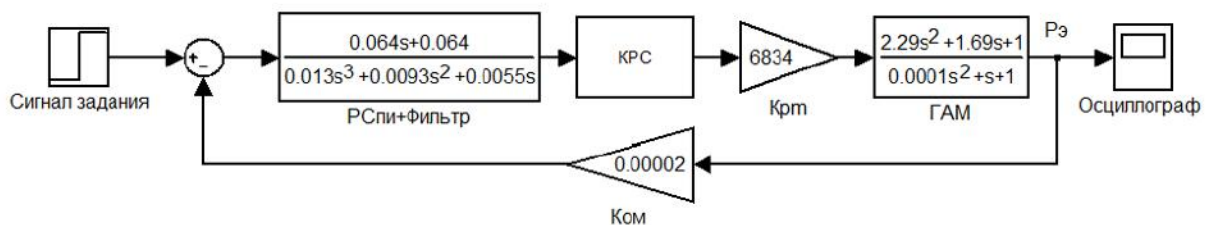


Рисунок 4.7 - Математична модель КРМ ГА на основі МПЖ

Модель складається з джерела сигналу завдання, регулятора потужності (РМ), контуру регулювання швидкості, передавальної функції РВ гідротурбіни.

Сигнал завдання потужності КРМ складається з двох сигналів, місцевий сигнал і зовнішній, що надходить з ОДУ. Місцевий сигнал завдання потужності встановлюється безпосередньо на міні-ГЕС, а зовнішній сигнал завдання приходить з ОДУ.

На вхід системи подається одиничний ступінчастий сигнал завдання потужності, і система відпрацьовує заданий сигнал. Перехідний процес досліджуваної системи наведено на рис. 4.8.

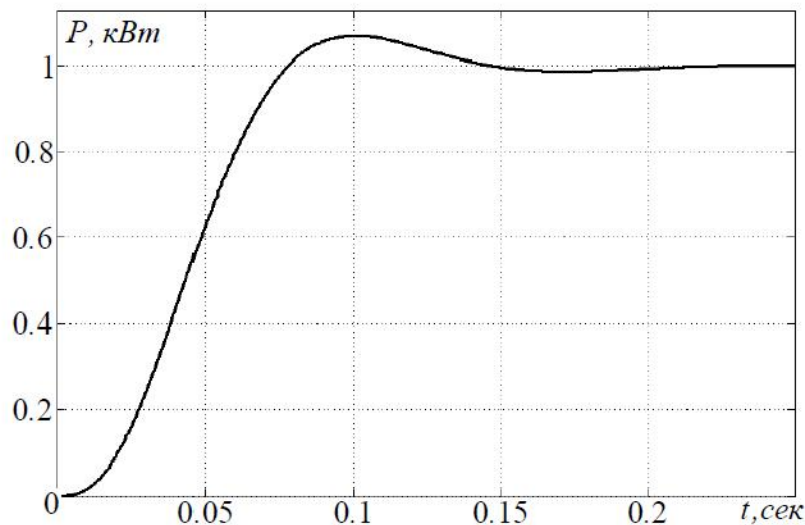


Рисунок 4.8 - Перехідна функція КРМ ГА міні-ГЕС на основі МПЖ

На рис.4.8 представлений перехідний процес по потужності ГА на основі МПЖ-генератора. Перехідний процес має незначне перерегулювання. Прямі показники якості синтезованої САР КРМ, отримані з графіка перехідного процесу:

- час входження в 5% зону - 0,1 с;
- перерегулювання 6. 8%.

За отриманими результатами моделювання можна з упевненістю говорити про доцільність застосування запропонованої САР для оперативної зміни вироблюваної активної потужності в динамічних режимах роботи електроенергетичної системи.

Створення міні-ГЕС на основі запропонованого алгоритму управління дозволить:

- підвищити ефективність використання гідроенергоресурсів без застосування приводів для впливу на напрямні апарати турбін;
- зменшити час відновлення балансу між споживаною і генерованою активними потужностями при раптових змінах режимів роботи енергосистеми.

4.4 Моделювання динамічних режимів роботи двоконтурної САР активної потужності гідроагрегату на основі МПЖ

У даному розділі представлені результати цифрового моделювання САР активної потужності ГА міні-ГЕС на основі МПЖ номінальною потужністю. Для підтвердження отриманих результатів був промодельований запропонований алгоритм управління на основі СПР для ГА міні-ГЕС з запропонованим методом вирішення постановленої задачі в програмі MATLAB/Simulink. Надалі модель ГА на основі МПЖ розглядалася в динаміці при ступінчастій зміні сигналу завдання по потужності. Пуск ГА є окремим питанням і в даній роботі не розглядається. У даній роботі розглядається тільки відпрацювання зміни завдання потужності від ОДУ.

Сучасний рівень розвитку цифрової техніки дозволяє моделювати складні процеси на ЕОМ для адекватної оцінки проектованої системи. В даному розділі використовується математична модель ГА при $\omega = \text{var}$ з урахуванням маси води в напірному водоводі, отримана в розділі 2.

Даний розділ присвячений дослідженню нової методики розрахунку регуляторів міні-ГЕС на основі МПЖ з використанням розробленої в розділі 2 математичної моделі гідротурбіни.

На рис.4.9 представлена структурна модель ГА на основі МПЖ з СВУ із застосуванням алгоритму керування на основі принципу підлеглого регулювання координат.

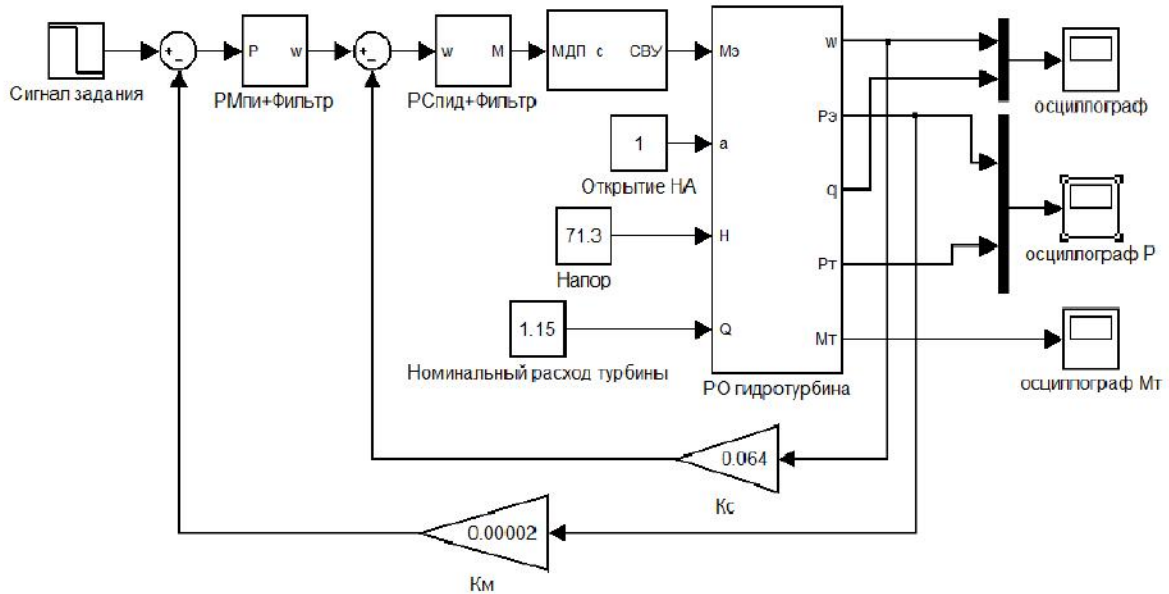


Рисунок 4.9 - Структура моделі ГА на основі МПЖ з СВУ

На запропонованій моделі були промодельовані всі можливі режими роботи ГА. Дана модель дозволяє візуально побачити вплив зміни будь-якого з параметрів системи, що дозволяє краще налаштувати систему і дозволить скоротити час налагодження гідроагрегатів.

Для підтвердження (або перевірки) ефективності запропонованої методики синтезу САР ГА міні - ГЕС на основі МПЖ розглянемо двоконтурну систему підлеглого реагування координат для ГА міні - ГЕС без обмеження регульованих координат: швидкості і моменту.

Результати цифрового моделювання наведені на рис.4.10 - 4.13. Як видно з рис.4.10 - 4.13, при збільшенні сигналу завдання потужності збільшується електромагнітний момент M_E МПЖ-генератора. У початковий період часу потужність гідротурбіни зменшується, а потім, поступово наростає до сталого значення. Цей ефект пояснюється наступним чином. При збільшенні електромагнітного моменту МПЖ динамічний момент ГА зменшується. Це призводить до гальмування ГА. Кутлова швидкість вала починає зменшуватися (рис.4.12). При цьому відцентрова сила перешкоджає проходженню води через НА, зменшується, що призводить до зниження тиску

перед НА. Зниження тиску, далі, призводить до зменшення потужності гідротурбіни до тих пір, поки витрата води не збільшиться (рис.4.12). Після того як витрата води збільшується, потужність гідротурбіни починає збільшуватися за рахунок збільшення витрати води до нового сталого значення. З динамічної характеристики рис.4.13 можна бачити залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА.

З перехідних характеристик (рис.4.10) видно, що система практично миттєво відпрацьовує сигнал завдання по активній потужності, що також ілюструє рис.4.11 (за 0.1 секунди система відпрацьовує сигнал завдання по активній потужності).

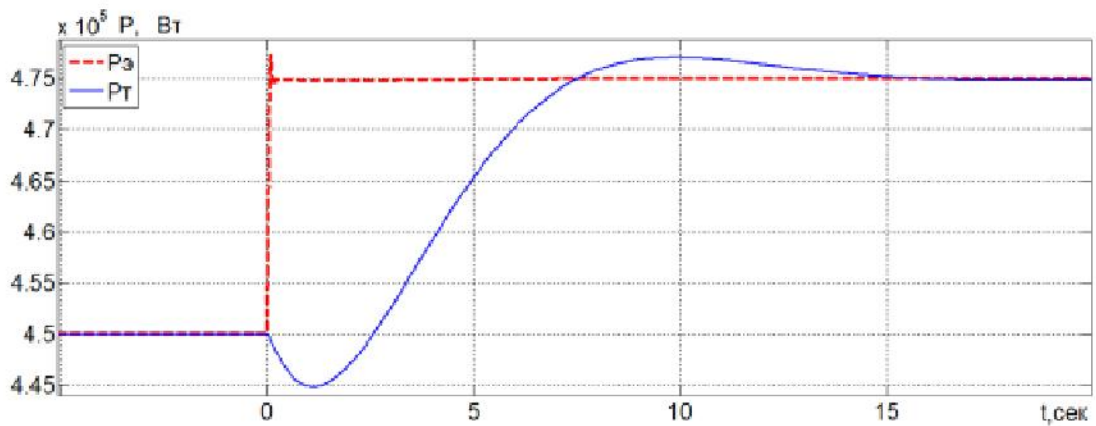


Рисунок 4.10 - Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ

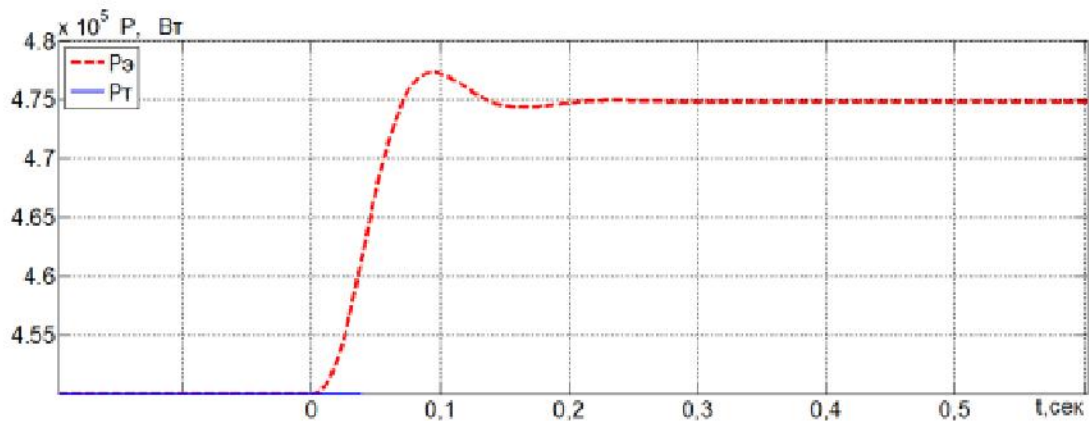


Рисунок 4.11 - Початкова ділянка перехідного процесу

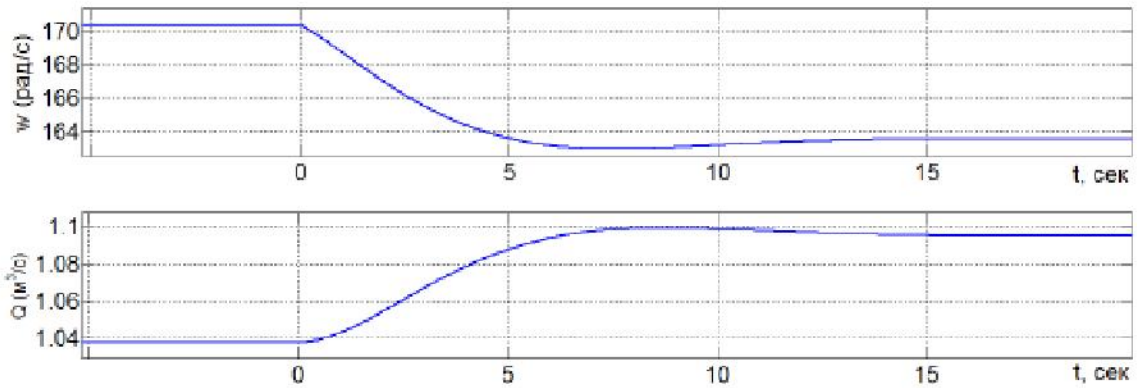


Рисунок 4.12 - Перехідні процеси ГА по кутовий швидкості вала і витраті ВОДИ

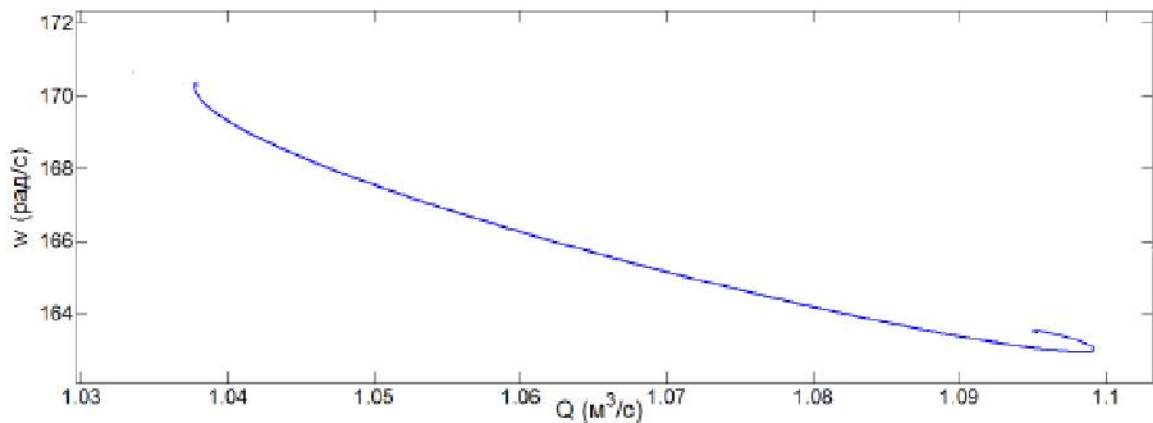


Рисунок 4.13 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

На рис.4.14-4.16 наведені перехідні характеристики при зменшенні сигналу завдання по потужності (швидко відпрацьовується сигнал завдання по потужності).

Як видно з рис.4.14 - 4.16, при зменшенні сигналу завдання по активній потужності зменшується електромагнітний момент M_E МПЖ. У початковий період часу потужність гідротурбіни збільшується, а потім, поступово знижується до нового сталого значення. Цей ефект пояснюється наступним чином. При зменшенні електромагнітного моменту МПЖ динамічний момент ГА збільшується. Це призводить до прискорення ГА, кутова швидкість вала збільшується (рис.4.15). При цьому відцентрова сила, що перешкоджає проходженню води через НА, збільшується, що призводить до підвищення

тиску перед НА. Підвищення тиску, далі, призводить до збільшення потужності гідротурбіни до тих пір, поки витрата води не зменшиться (рис.4.14).

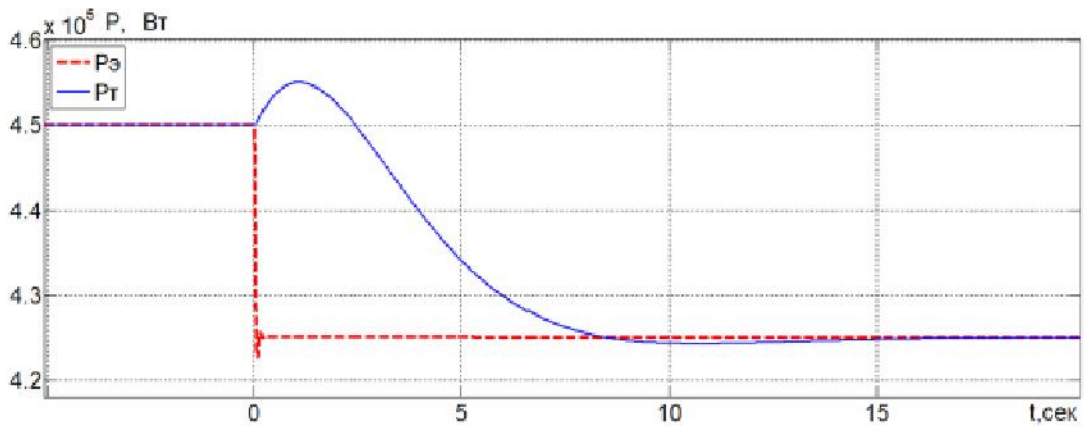


Рисунок 4.14 - Перехідні процеси ГА на основі МПЖ по активній потужності

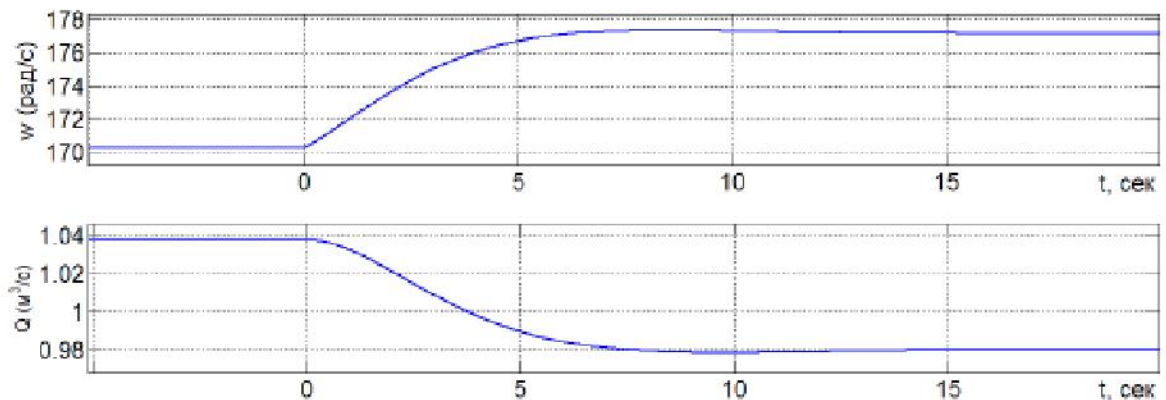


Рисунок 4.15 - Перехідні процеси ГА по кутовій швидкості вала і витраті води

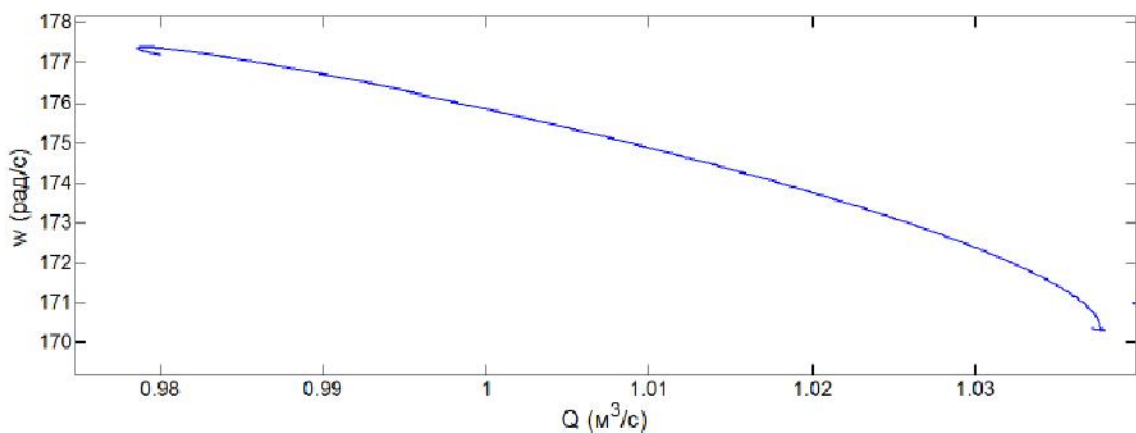


Рисунок 4.16 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

Після того як витрата води почала зменшуватися, потужність гідротурбіни починає знижуватися за рахунок зменшення витрати води до нового сталого значення. З динамічної характеристики (рис.4.16) можна бачити залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА.

Відпрацювання сигналу завдання моменту

Розглянемо роботу ГА при відсутності замкнутих контурів регулювання. На вхід МПЖ з СВУ подається ступінчастий сигнал завдання по моменту. СВУ МПЖ безінерційно відпрацьовує даний сигнал.

Реакція основних змінних (координат) системи на ступінчастий сигнал завдання показана на рис.4.18 - 4.25.

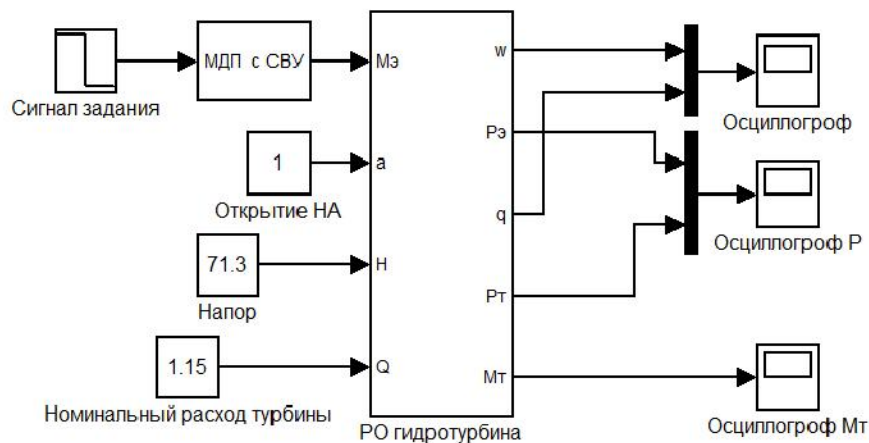


Рисунок 4.17 - Структура моделі ГА на основі МПЖ з СВУ без обмеження по моменту

З перехідного процесу по моменту (рис.4.18) видно, що система миттєво відпрацьовує сигнал завдання по електромагнітному моменту. При цьому відсутнє перерегулювання. Момент гідротурбіни досягає сталого значення приблизно через 10 секунд (рис.4.18).

З перехідних процесів за потужністю (рисунок 4.19) видно, що електрична потужність ГА змінюється миттєво, тому що цьому не перешкоджають будь-які інерційності. Максимальне значення по електричній потужності досягається в перший момент початку перехідного процесу, а

потім, за рахунок зменшення кутової швидкості вала ГА, електрична потужність спадає до сталого значення.

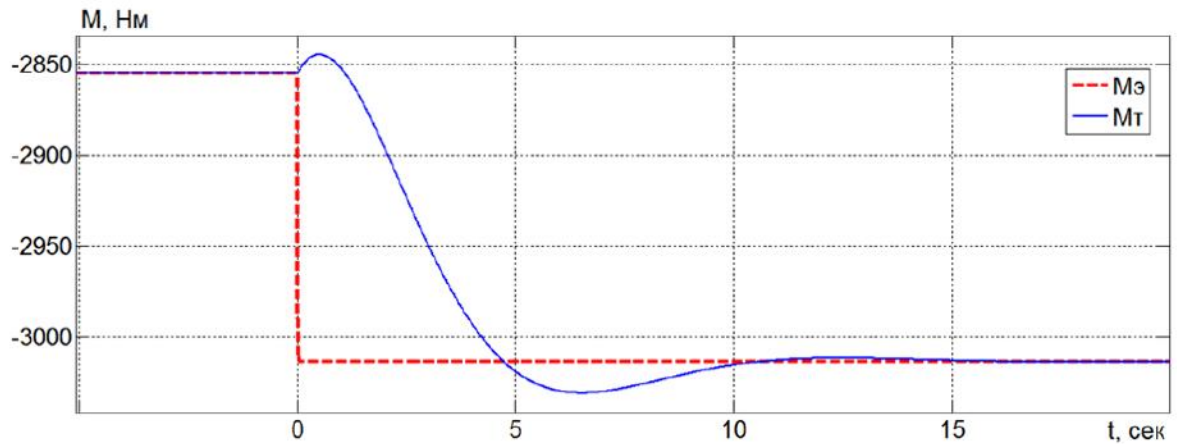


Рисунок 4.18 - Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ

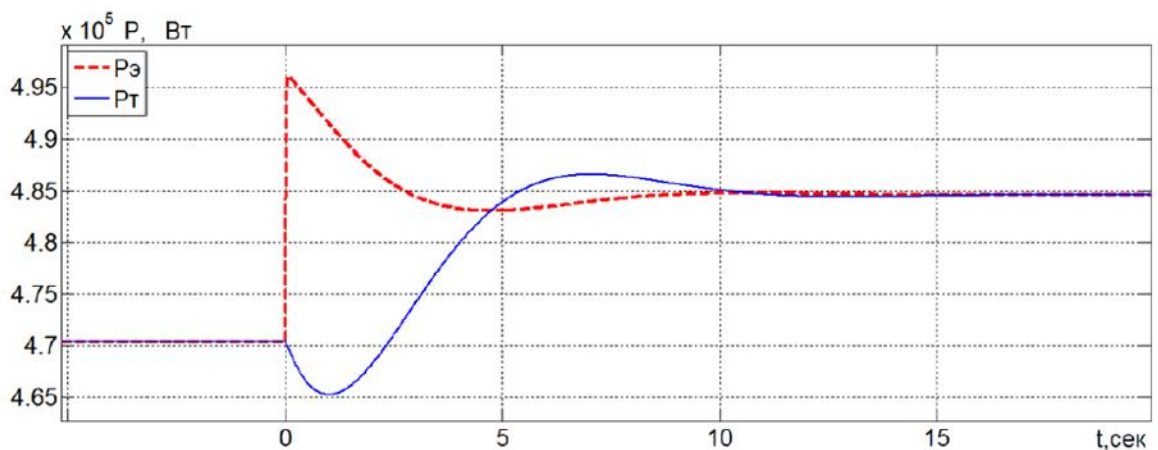


Рисунок 4.19 - Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ

На рис. 4.20 представлені перехідні процеси по кутовий швидкості і витраті води. При збільшенні електромагнітного моменту гідротурбіна починає гальмуватися. При цьому зменшується відцентрова сила, що перешкоджає проходженню води через НА. При збільшенні витрати води підвищується момент гідротурбіни, що призводить до зростання потужності ГА.

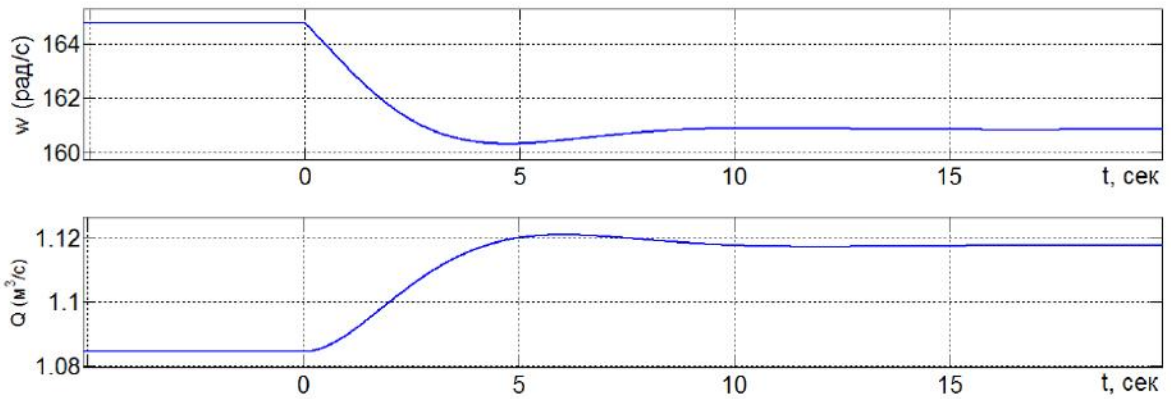


Рисунок 4.20 - Перехідні процеси ГА по кутовий швидкості вала і витраті

ВОДИ

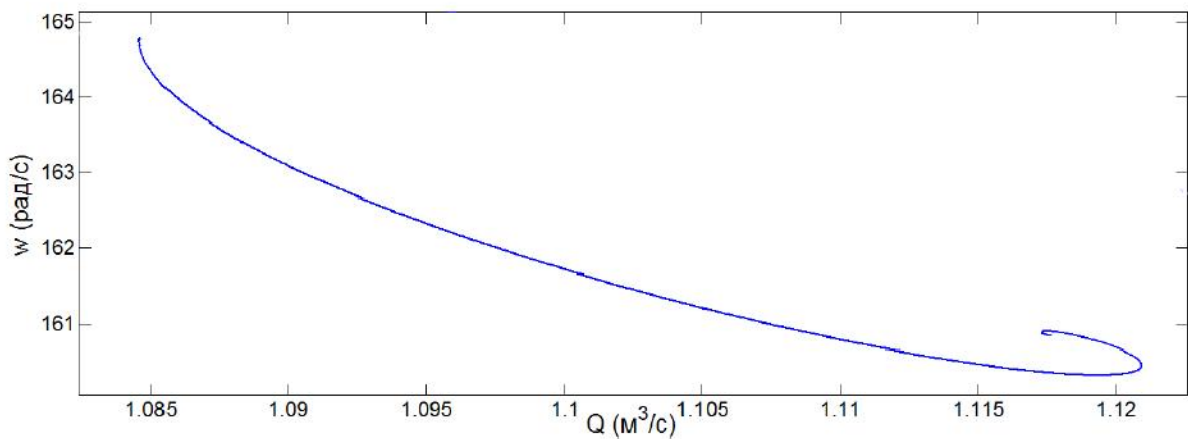


Рисунок 4.21 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

На рис.4.22 - 4.25 представлені перехідні процеси при зменшенні сигналу завдання по моменту. На тимчасових діаграмах можна бачити процеси, аналогічні тим, що і при збільшенні сигналу завдання по моменту.

Розглянемо перехідні процеси основних змінних (координат), отримані при моделюванні роботи розімкнутої по швидкості і активної потужності САР ГА міні - ГЕС на основі МПЖ.

Як видно з рис.4.22 - 4.25, при зменшенні електромагнітного моменту M_E МПЖ, електрична активна потужність миттєво падає до мінімального значення, а потужність гідротурбіни в початковий період часу збільшується а, потім, поступово знижується до нового сталого значення. У той же час, до

сталого значення зростає електрична активна потужність. З динамічної характеристики (рис.4.25) можна побачити залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА.

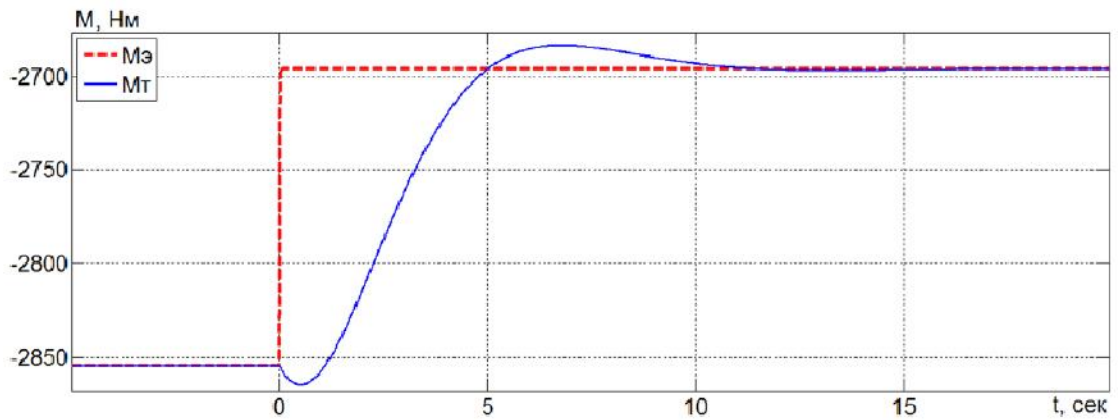


Рисунок 4.22 - Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ

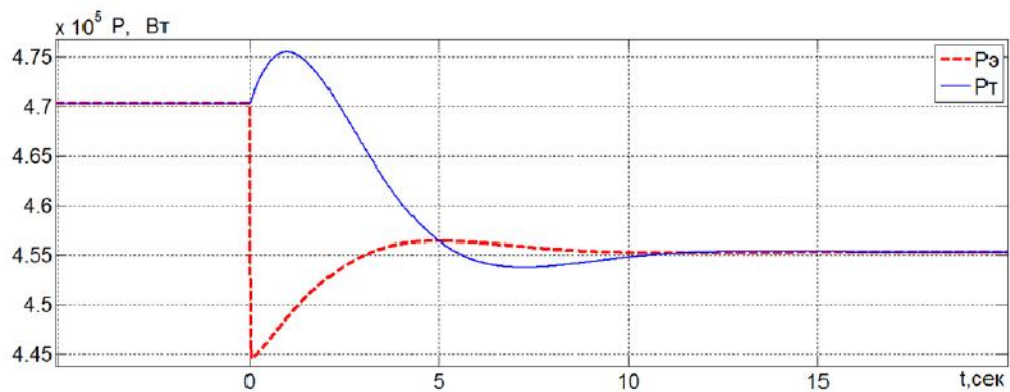


Рисунок 4.23 - Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ

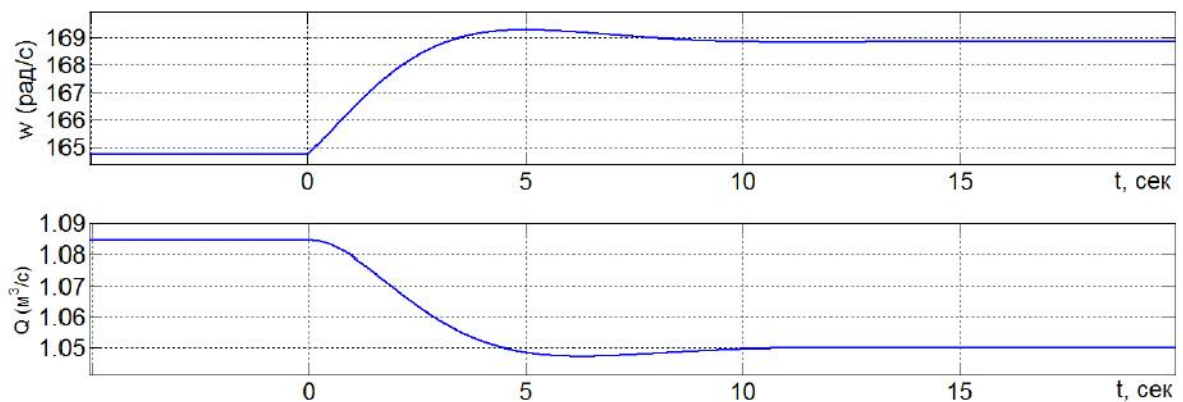


Рисунок 4.24 - Перехідні процеси ГА по кутовій швидкості вала і витраті води

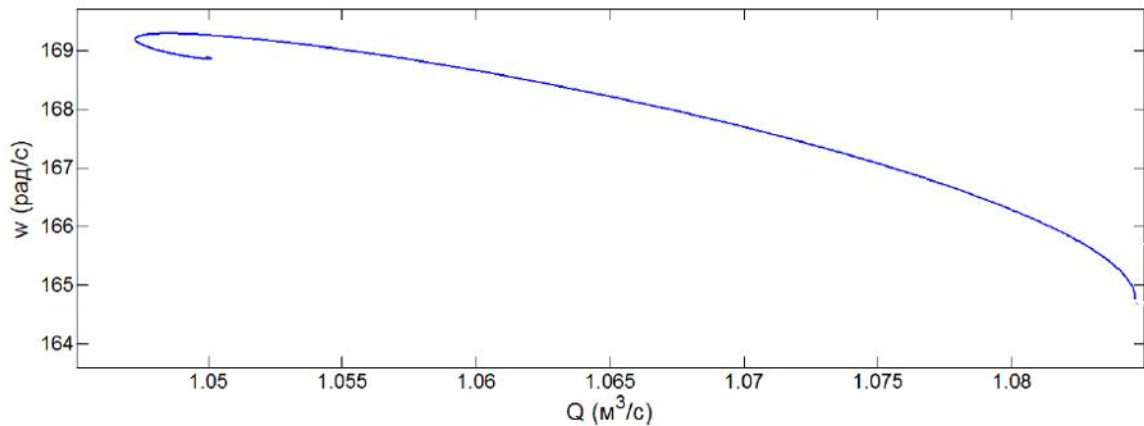


Рисунок 4.25 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

Відпрацювання сигналу завдання по швидкості вала ГА.

Розглянемо роботу контуру регулювання швидкості. САР швидкості вала ГА складається з ПІД - регулятора швидкості, МПЖ з СВУ, математичної моделі гідротурбіни з урахуванням водоводу і зворотного зв'язку по швидкості. Як вже було показано вище, КРШ необхідний для обмеження кутової швидкості ГА на основі МПЖ з СВУ, щоб обмежувати напругу перетворювача частоти по колах ротора.

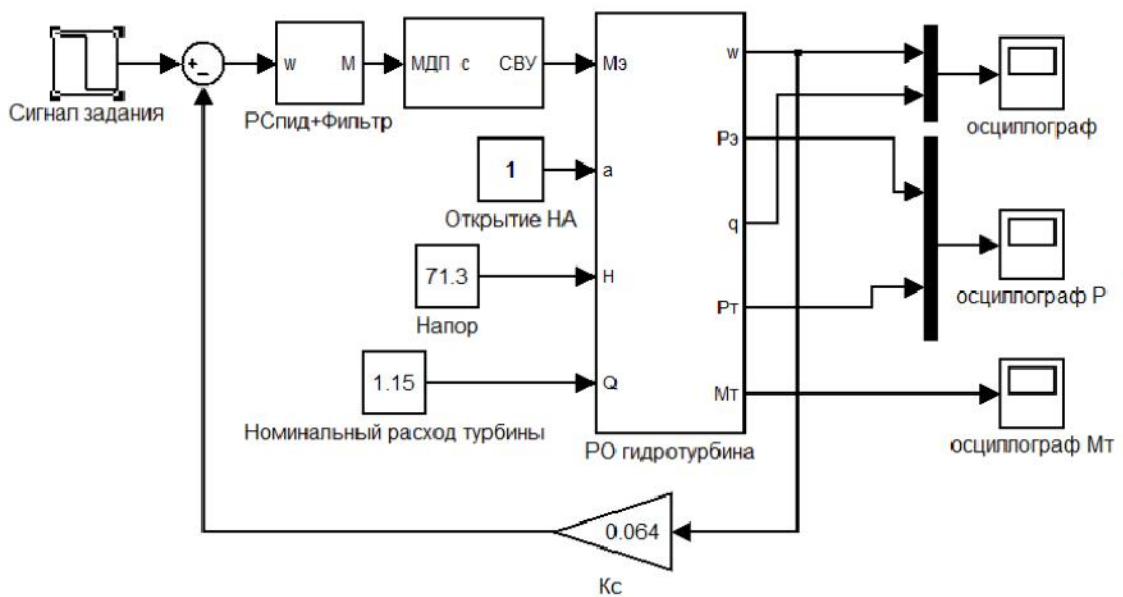


Рисунок 4.26 - Структура моделі ГА на основі МПЖ з СВУ зі зворотним зв'язком за швидкістю

ГА міні-ГЕС працює на кутовий швидкості $\omega = 157 \text{ рад/с}$ (рис.4.27). Ступінчасто зменшуємо сигнал завдання по кутовий швидкості вала ГА і САР ГА відпрацьовує даний сигнал з великою швидкодією за швидкістю, як видно з рис.4.28.

На рис. 4.27 наведені перехідні процеси по кутовий швидкості вала ГА і витраті води. З перехідного процесу по кутовий швидкості видно, що у контуру швидкості висока швидкодія. Максимальна точка досягається за 0,063 секунди, як видно з рис.4.28.

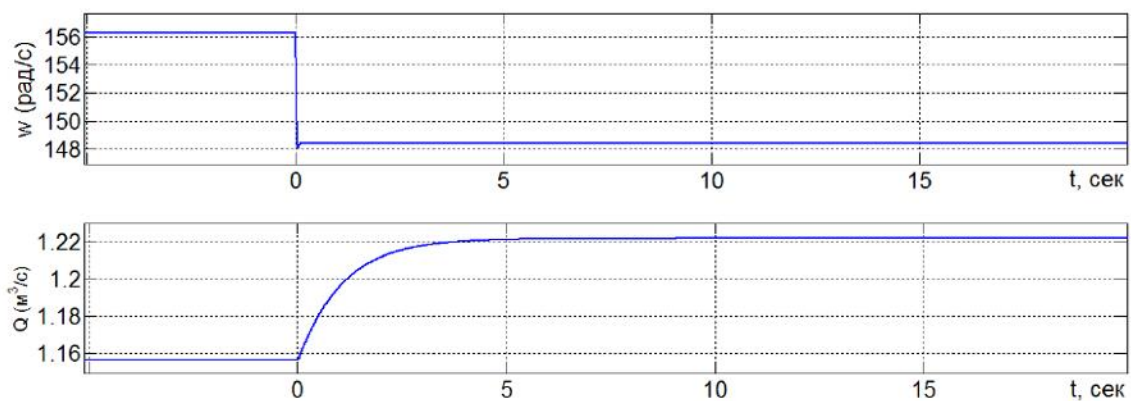


Рисунок 4.27 - Перехідні процеси ГА по кутовий швидкості вала і витраті ВОДИ

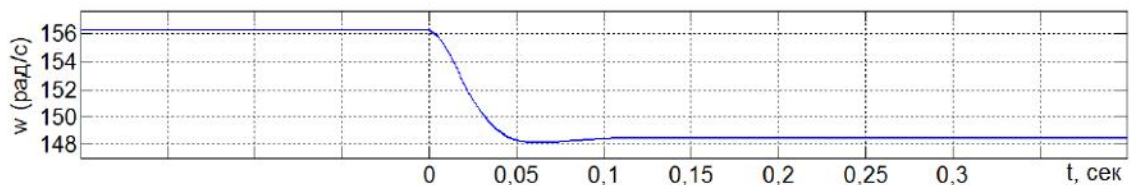


Рисунок 4.28 - Початкова ділянка перехідного процесу по кутовий швидкості вала ГА

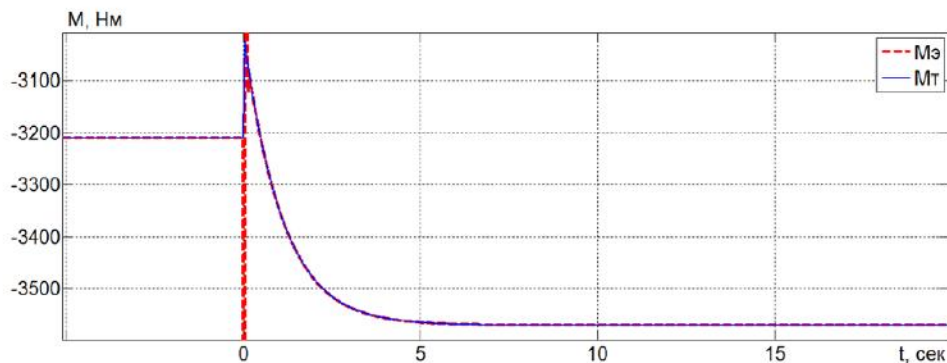


Рисунок 4.29 - Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ

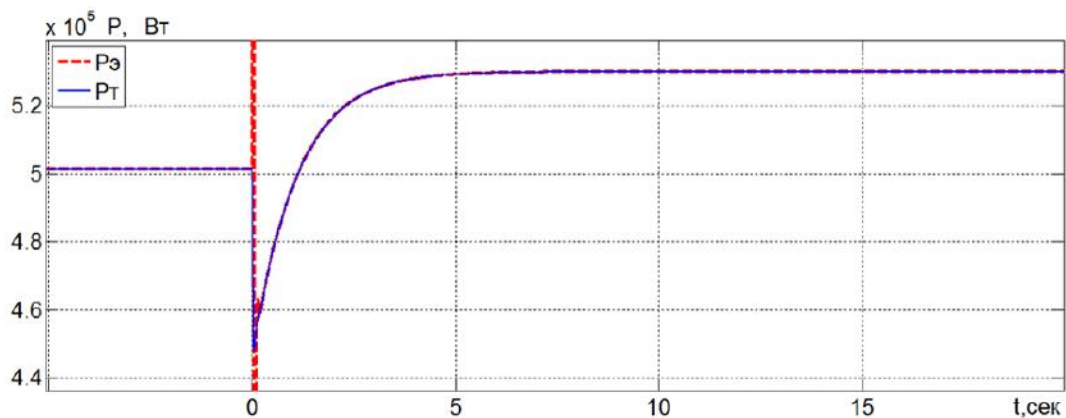


Рисунок 4.30 - Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ

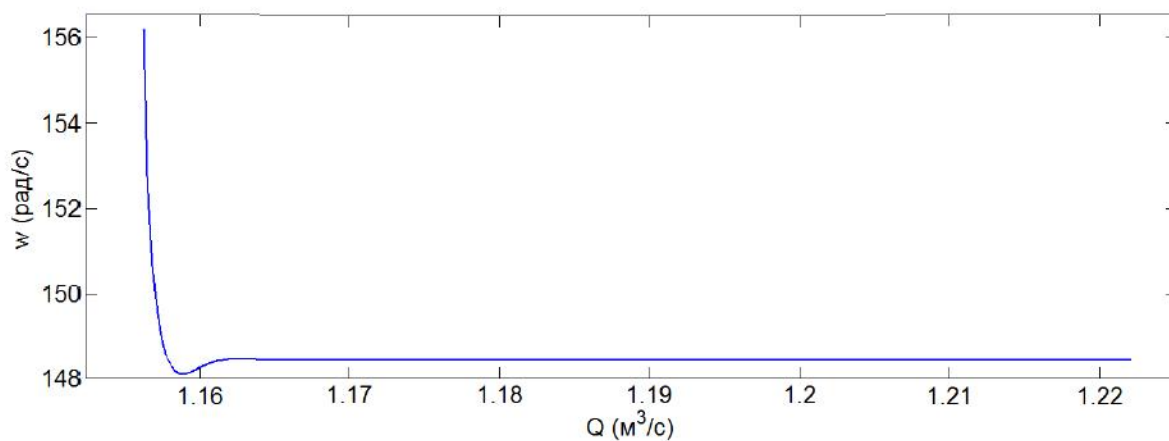


Рисунок 4.31 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

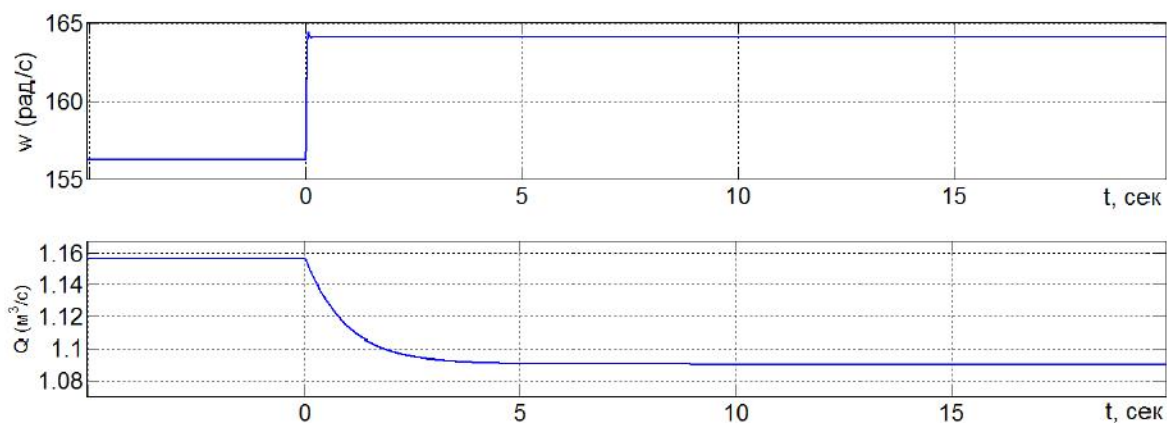


Рисунок 4.32 - Перехідні процеси ГА по кутовій швидкості вала і витраті ВОДИ

ГА міні-ГЕС працює на кутовій швидкості $\omega=157, \text{ рад/с}$ (рис.4.32). Ступінчасто збільшуємо сигнал завдання по кутовій швидкості ГА і САР ГА відпрацьовує даний сигнал з високою швидкодією за швидкістю, як видно з рис.4.33. При цьому з мережі для забезпечення швидкодії за швидкістю споживається електрична енергія (рис.4.35).

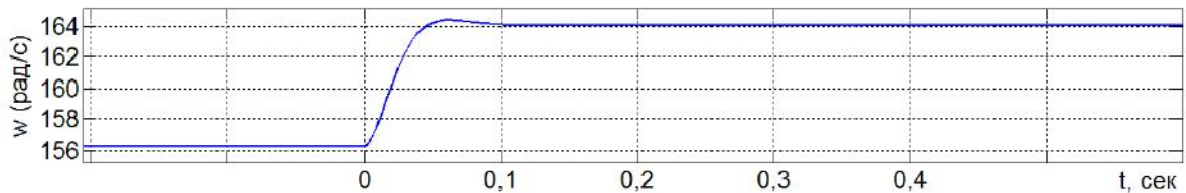


Рисунок 4.33 - Початкова ділянка перехідного процесу по кутовій швидкості вала ГА

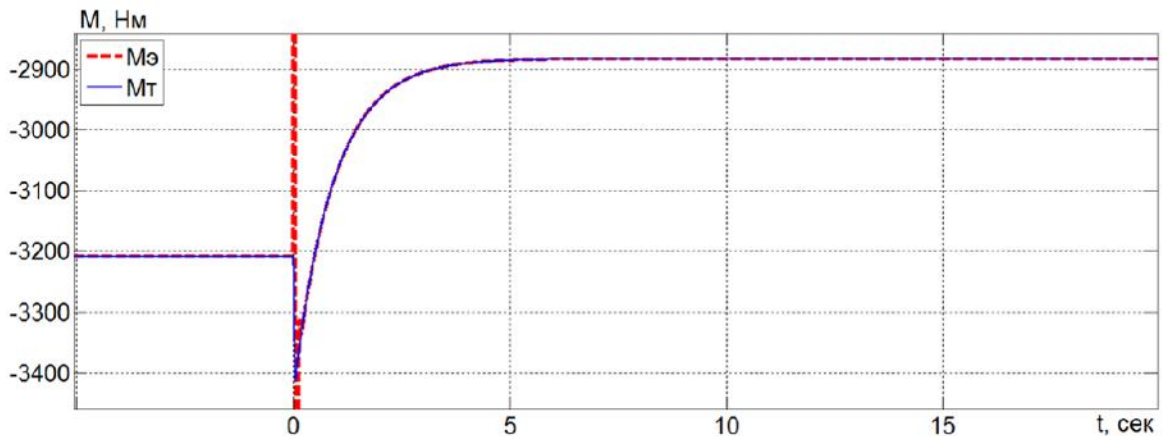


Рисунок 4.34 - Перехідні процеси по потужності ГА на основі МПЖ

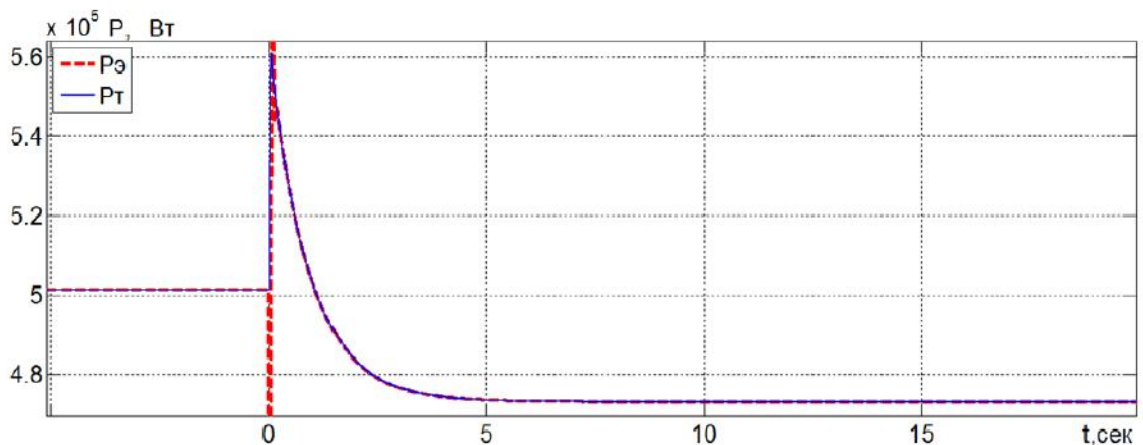


Рисунок 4.35 - Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ

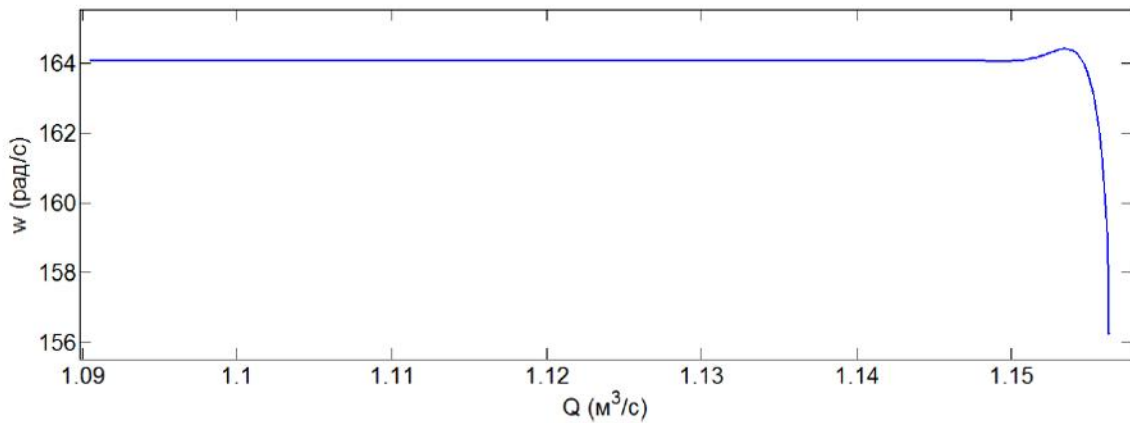


Рисунок 4.36 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

Відпрацювання сигналу завдання по активній потужності з обмеженням по частоті обертання по валу ГА

Переконавшись шляхом цифрового моделювання в працездатності пропонованої методики синтезу регуляторів швидкості та активної потужності, розглянемо тепер цю САУ МПЖ в режимах обмеження по частоті обертання вала ГА.

Внаслідок обмеження напруги ПЧ по колах ротора, обумовлених технічними і екологічними причинами, було введено обмеження по кутовій швидкості.

Розглянемо роботу пропонованої САУ ГА міні-ГЕС. На вхід системи подається сигнал завдання по активній потужності $U_p = 10 \text{ В}$, що відповідає номінальному значенню активної потужності ГА міні – ГЕС $P_H = 5 \cdot 10^5 \text{ Вт}$.

З ОДУ приходить ступінчастий сигнал завдання на збільшення активної потужності. Система починає відпрацьовувати даний сигнал завдання до тих пір, поки кутова швидкість не увійде в обмеження (рис.4.39). Контур потужності розмикається, і в системі триває діяти тільки один контур – контур швидкості. Значення активної потужності на 4,3 секунді стає рівним значенню потужності гідротурбіни і продовжує збільшуватися разом з потужністю

гідротурбіни (рис.4.38). САУ так і не виходить з обмеження по швидкості. З рис.4.39 - 4.40 видно, як система входить в режим обмеження по швидкості.

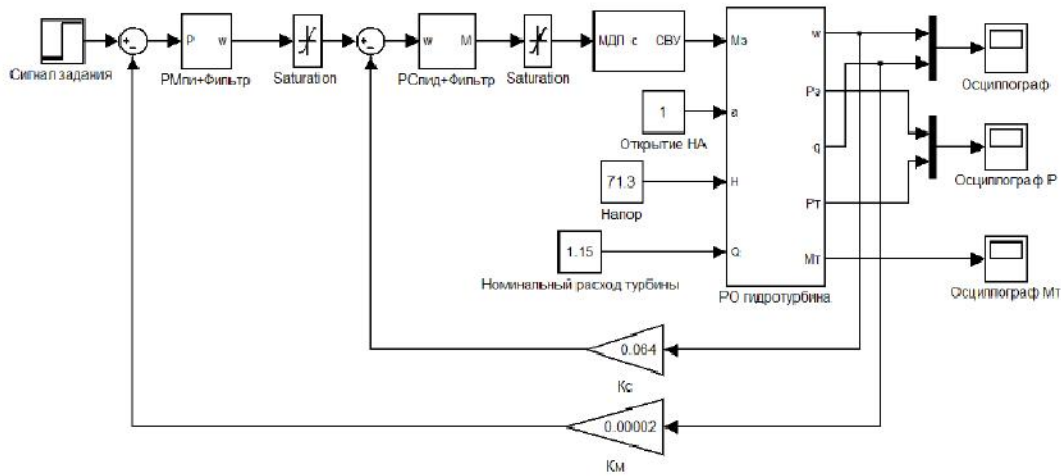


Рисунок 4.37 - Структура моделі ГА зі зворотним зв'язком по потужності і швидкості з обмеженням моменту і швидкості вала ГА

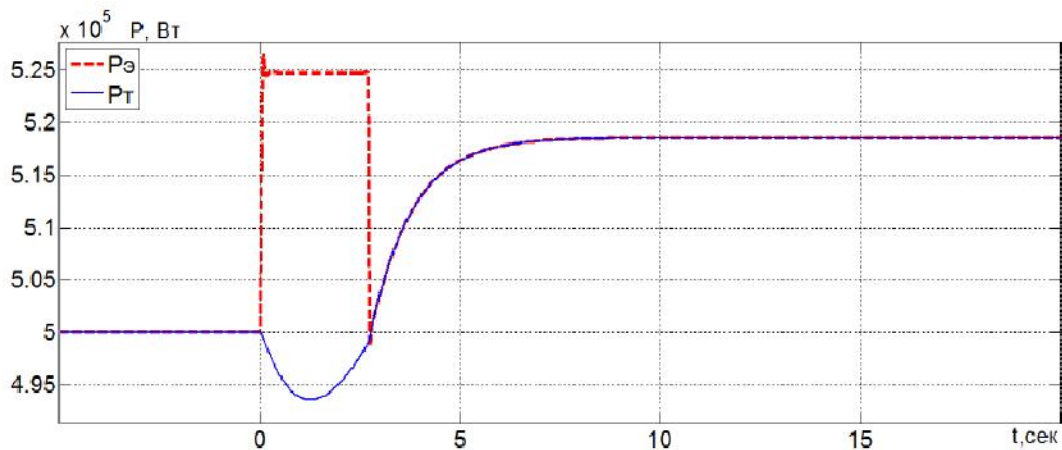


Рисунок 4.38 - Перехідні процеси по потужності ГА на основі МПЖ

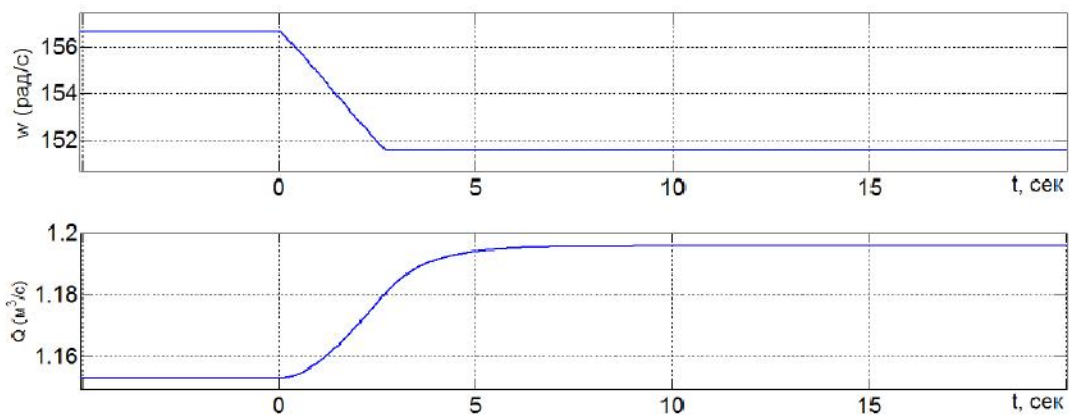


Рисунок 4.39 - Перехідні процеси ГА по кутовій швидкості вала і витраті

ВОДИ

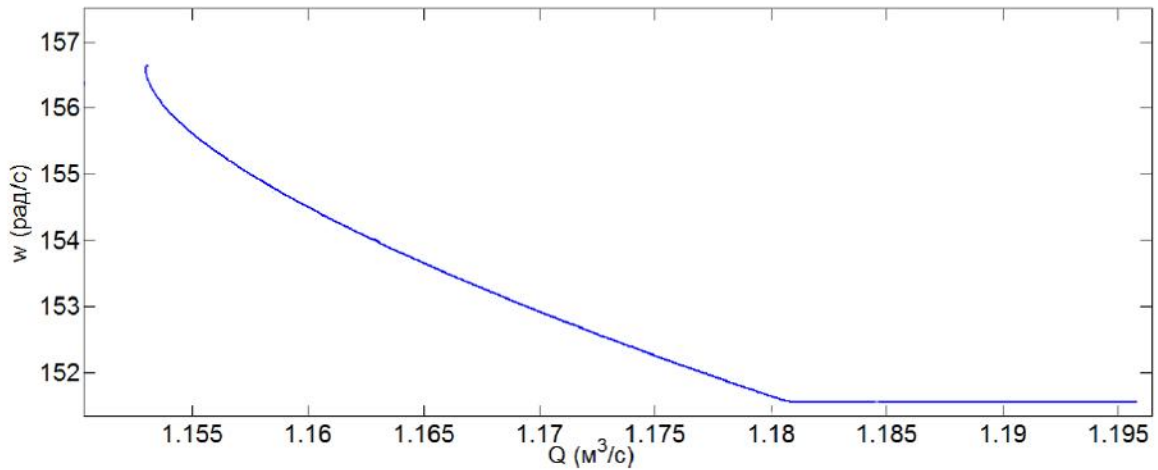


Рисунок 4.40 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

Розглянемо роботу запропонованої САР ГА міні-ГЕС. На вхід системи подається сигнал завдання по активній потужності $U_p = 10$ В, що відповідає номінальному значенню активної потужності ГА. З ОДУ приходиться ступінчастий сигнал завдання на зменшення активної потужності.

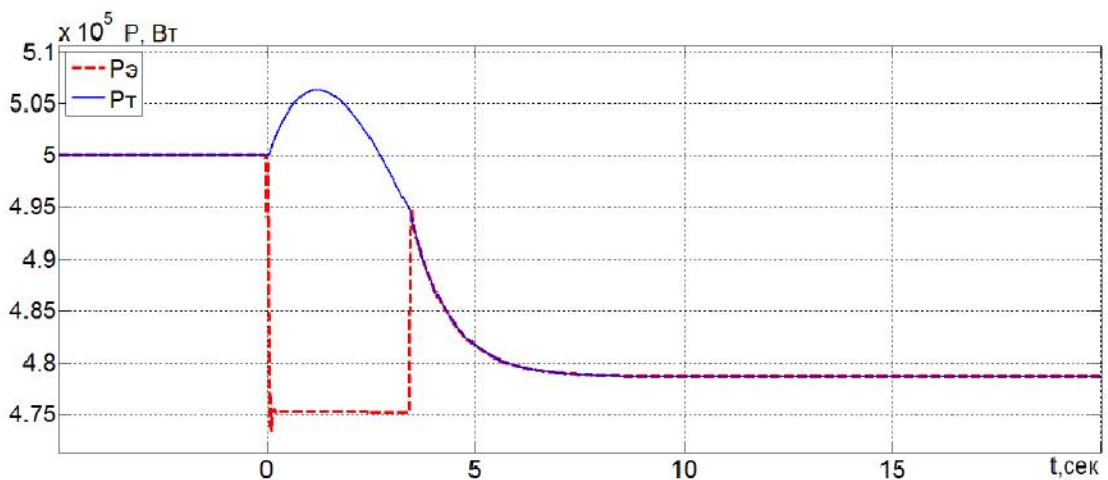


Рисунок 4.41 - Перехідні процеси по потужності ГА на основі МПЖ

Система починає відпрацьовувати даний сигнал завдання до тих пір, поки кутова швидкість не увійде в обмеження (рис.4.42). Тоді контур потужності розмикається, і в системі продовжує діяти тільки один контур - контур швидкості вала ГА. Значення активної потужності миттєво

підвищується на 4,3 секунді до значення потужності гідротурбіни і продовжує зменшуватися разом з потужністю гідротурбіни (рис.4.41). Система не виходить з режиму обмеження по швидкості вала ГА. З рис.4.42 - 4.43 видно, як система увійшла в режим обмеження по швидкості вала ГА.

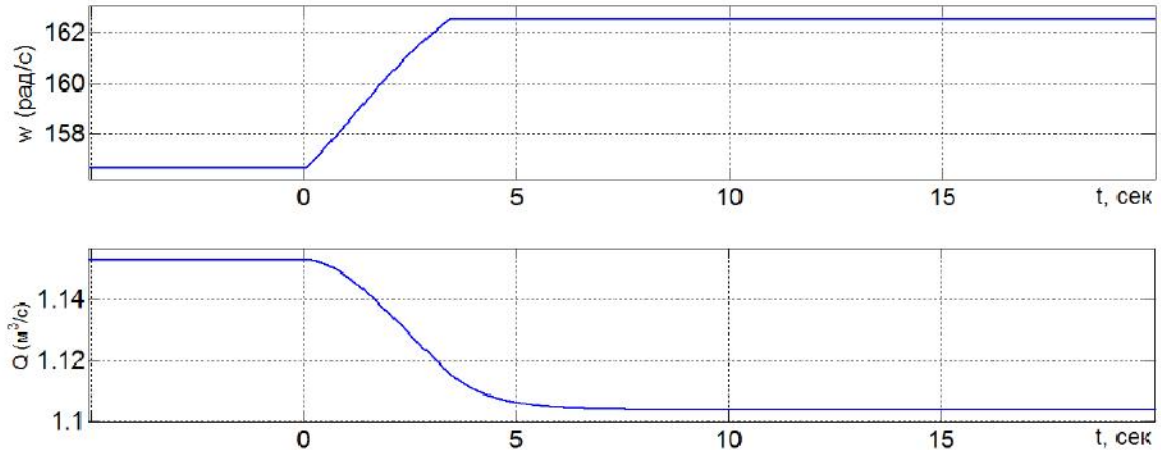


Рисунок 4.42 - Перехідні процеси ГА по кутовій швидкості вала і витраті води

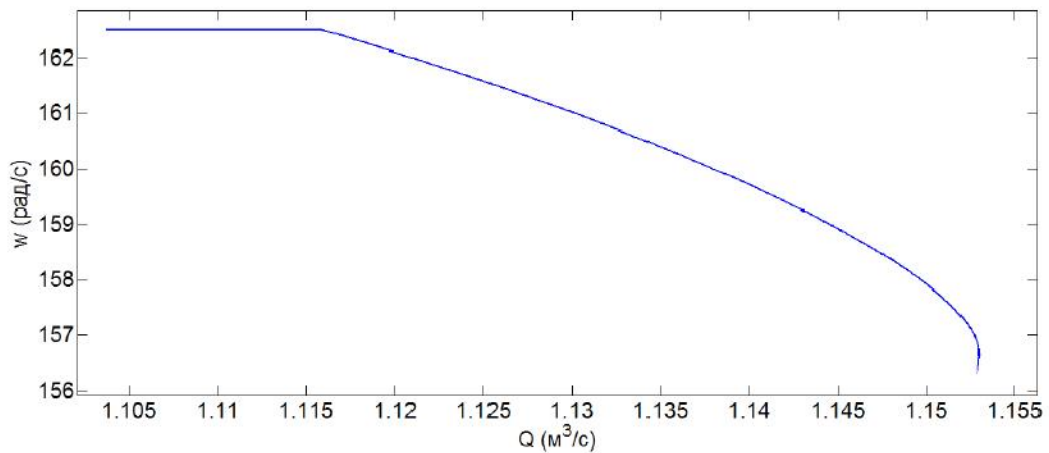


Рисунок 4.43 - Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

Промоделювати САР активної потужності ГА міні-ГЕС в різних режимах роботи, і отримавши при цьому осцилограми для різних режимів, на підставі отриманих результатів можна з упевненістю сказати, що пропонована САР активної потужності ГА міні-ГЕС з поставленими перед нею завданнями справляється, як видно з малюнків 4.10 - 4.43.

Отримані перехідні процеси повністю узгоджуються з положеннями теорії гідроелектростанцій [3,8] підтверджують працездатність запропонованої інженерної методики побудови САР активної потужності ГА на основі МПЖ.

Висновки по розділу 4

1. Запропоновано алгоритм управління гідроагрегатом міні-ГЕС на основі МПЖ. Пропонований алгоритм заснований на принципі підлеглого регулювання координат. Зовнішнім по відношенню до контуру регулювання активної потужності повинен бути контур регулювання рівня води у водосховищі. Внутрішнім по відношенню до контуру регулювання активної потужності повинен бути контур регулювання кутової швидкості вала ГА.
2. Розроблено інженерну методику синтезу регуляторів швидкості та генеруємої активної потужності. Дана методика враховує статичні і динамічні властивості гідротурбіни і інерцію мас води в напірному водоводі. Швидкодія САР по активній потужності обмежена сумою некомпенсованих постійних часу в контурі регулювання швидкості ГА.
3. Проведено дослідження запропонованої інженерної методики синтезу регуляторів методом цифрового моделювання. Дані дослідження підтвердили працездатність запропонованої методики, в тому числі і при виході САР в режими обмеження ковзання асинхронної машини.
4. Постійна часу напірного водоводу, T_w , момент інерції ГА, J , і значення коефіцієнта лінеаризації головної універсальної характеристики гідротурбіни в робочій точці, k_μ , є основними вихідними даними для розробленої методики синтезу регуляторів швидкості вала і активної потужності ГА.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що застосування в ГА радіально-осьовій гідротурбіні з низьким коефіцієнтом швидкохідності дозволяє виробляти регулювання генеруємої активної потужності шляхом зміни кутової швидкості вала генератора при значеннях ККД гідротурбіни, несуттєво менших номінального.
2. Збільшенню частоти обертання гідротурбіни відповідає збільшення її гідравлічного опору внаслідок дії відцентрової сили в спіральній камері і камері робочого колеса. Тому є можливість змінювати витрату води через турбіну і потужність на валу шляхом зміни числа обертів, внаслідок чого можна використовувати акумулюючу здатність водосховища не змінюючи положення направляючого апарату гідротурбіни.
3. На підставі застосовуваної моделі радіально-осьової гідротурбіни, що працює на одному валу з синхронним генератором при постійному значенні частоти мережі, отримано математичний опис радіально-осьової гідротурбіни під час зміни частоти обертання вала ГА.
4. Недоцільно проводити регулювання кутової швидкості ГА в діапазоні ширше, ніж 1:2, внаслідок наростаючого зниження ККД радіально-осьової гідротурбіни при відхиленні її кутової швидкості від основної. Маючи такий діапазон регулювання кутової швидкості вала ГА значення генеруємої активної потужності можна змінювати в діапазоні від нуля до номінального як в динамічних, так і в сталих режимах роботи.
5. Сучасному рівню розвитку техніки відповідає застосування в ГА міні-ГЕС генератора на основі МПЖ з системою векторного управління електромагнітним моментом генератора.
6. У традиційних ГА на основі синхронного генератора частота обертання вала ГА визначена постійним значенням частоти мережі, а генеруєма

активна потужність дорівнює потужності на валу турбіни (за вирахуванням втрат в генераторі). Управління потужністю на валу турбіни ускладнюється необхідністю змінювати витрату води через турбіну, значення якої визначає кінетичну енергію мас води в напірному водоводі.

7. Показано, що застосування генератора з регульованою частотою обертання валу дає можливість перетворювати зміну кінетичної енергії мас води в напірному водоводі в зміну кінетичної енергії обертових мас ГА. В результаті з'являється можливість працювати з різними значеннями генеруємої активної потужності і потужності на валу турбіни в динамічних режимах. Це дозволяє швидко змінювати активну потужність генератора, керуючи його електромагнітним моментом.
8. Система управління МПЖ-генератором може переводити його в режим роботи абсолютно м'якою механічною характеристикою внаслідок обмеження струмів ротора. В даних режимах роботи стійкість, а також і апериодичний характер гідромеханічних перехідних процесів ГА забезпечуються установкою додаткових махових мас на вал ГА або збільшенням перетину напірного водоводу.
9. На підставі аналізу полінома знаменника передавальної функції лінеаризованої моделі керованого по кутовий швидкості вала ГА отримані умови стійкості і апериодичного характеру перехідних процесів по кутовий швидкості вала ГА в режимі обмеження електромагнітного моменту. Дані умови дозволяють виробляти вибір значень сумарного моменту інерції і перетину напірного водоводу ГА.

ЛІТЕРАТУРА

1. Цогла М.В. Мала електроенергетика на прикладі мікрогес. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей X міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24–25 листоп. 2021.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2021. Т. 2. – 48.
2. Australian Renewable Energy Website. Commonwealth of Australia, Australian Greenhouse Office,. – [Електронний ресурс]. – 1999. – Режим доступу до ресурсу: <http://acre.murdoch.edu.au/ago/hydro/hydro.html>
3. BuildingTECH. [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://building-tech.org/kompaktnaya-mini-ges-rotor-smozhet-obespechit-elektroenergiej-nebolshoe-selo/>
4. Тарасенко М.Г., Зінь М.М. Шляхи прискорення темпів розвитку малої гідроенергетики України. Вісник КпНУ імені Михайла Остроградського. 2014. Вип. 4(87). С. 56–61.
5. Зінь М.М., Підгайний Ю.Б. Сучасні тенденції розвитку малих ГЕС в Україні / Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій— до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, м. Тернопіль, В-во ТНТУ, 2020, С. 203
6. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасенчко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10.
7. Коваль В.П. Зарядка електричних транспортних засобів на основі 66 безпроводної передачі енергії / П.П. Левчук // Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій—, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 2. — С. 117.

8. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.
9. Стеблюк М.І. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / М.І. Стеблюк.– К., 2010. – 487 с.
10. Вовчак, В., Тесленко, О., Самченко, О. (2018). Мала гідроенергетика України. Аналітичний огляд. Том I. URL: <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES1.pdf>
11. European Small Hydropower Association (2004). Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant. Part 2. URL: https://energypedia.info/images/4/4a/Part_2_guide_on_how_to_develop_a_small_hydropower_plant-_final-21.pdf
12. Manish Kumar Saini. (03-Aug-2022). Difference between Impulse Turbine and Reaction Turbine. TutorialsPoint. URL: <https://www.tutorialspoint.com/difference-between-impulse-turbine-and-reaction-turbine>
13. Baoling Guo, Bacha Seddik. Mazen Alamir, Amgad Tarek Mohamed. Variable speed micro-hydro power generation system: Review and Experimental results. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2018), 3-5 JUILLET 2018, NANCY, FRANCE. URL: <https://hal.science/hal-01907850/>
14. В.І. Будицький, П.Ф. Василько, С.Т. Пазич. Гідроенергетика: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: /КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 13,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2023. – 205 с.
15. Hildinger T., Ködding L. (October 2013). Modern Design for Variable Speed Motor-Generators - Asynchronous (DFIM) and Synchronous (SMFI) Electric Machinery - Options for Pumped Storage Power Plants. Hydro 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/307919334_Modern_Design_for_

- Variable_Speed_Motor-Generators_-
 _Asynchronous_DFIM_and_Synchronous_SMFI_Electric_Machinery_-
 _Options_for_Pumped_Storage_Power_Plants
16. Creager W., Justin J. Hydroelectric Handbook. Second Editor. – USA, 2015. – 1151 с.
 17. Gulliver J., Arndt R. Hydropower Engineering Handbook. – McGRAW-HILL, INC. – 1991. – 667с
 18. Ramos H. Small Hydropower Plants. – WREAN and DED. – Belfast, North Ireland. – 2000. – 206 с.
 19. Якість електричної енергії. Дата оновлення 21.02.2022. GOV.UA. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>
 20. GRE2H3R200K00N0000 баластний резистор. Сайт виробника Vishay. URL: <https://www.vishay.com/docs/31833/gre1gre2.pdf>.
 21. Тиристорний регулятор змінної напруги РЕНАП-3Т-250. Сайт виробника Tems. URL: https://www.tems.com.ua/components/com_jshopping/files/demo_products/RENAP3T.pdf
 22. Тиристорний регулятор напруги РЕНАП-3В-200. Сайт виробника Tems. URL: https://www.tems.com.ua/components/com_jshopping/files/demo_products/RENAP3V.pdf
 23. Трансформатор ТЗСІ-6.3 380/36. Сайт постачальника eNasos. URL: <https://enasos.com.ua/ru/products/transformator-ponizhayuschij-tszi-63-kvt-38036-trehfaznyj-v-korpuse-suhoj>
 24. Датчик напруги HV4117. Сайт постачальника YNDS. URL: <https://cdn.shopifycdn.net/s/files/1/2723/6858/files/HV4117.pdf?v=1669009027>
 25. Датчик частоти Datacom-DF-1010. Сайт постачальник Electro. URL: <https://ecshop.com.ua/files/DATAKOM-DF0101-manual.pdf>

26. ПІ-регулятор REX-C100-D401-88-N. Сайт постачальника Rcscomponents. URL: https://www.rcscomponents.-kiev.ua/datasheets/REX_C-100_RUS_ALARM.pdf
27. Теплове реле ПРОМФАКТОР РТ 2-200. Сайт постачальника 220volt. URL: <https://220volt.com.ua/rele-teplove-promfaktor-rt-2-200-125-200a/>
28. Автоматичний вимикач EATON BZMB2-A200 116971. Сайт постачальника Електроконтроль. URL: <https://electrocontrol.com.ua/ua/avtomaticheskie-vyklyuchateli/avtomaticheskii-vykluchatel-200anominalnoe-napryazhenie-400-415-v-as-3-polusa-otkl-sposobnost-25ka-eaton-bzmb2-a200-116971>
29. Krause C., Wasynczuk O., Sudhoff S. Analysis of electric machinery and driver systems. 2 Edition. The Institute of Electronics Engineers. – USA-2002 – 613 с

Додатки

1. GROUNDING OF THE POWER SCHEME OF THE GENERATING SET

1.1 The role of mini-hydroelectric power plants in the power system

The master's thesis considers a mini-hydroelectric power plant with a daily regulation reservoir connected to an electric network of infinite capacity. This type of hydroelectric power plant is an integral part of a unified electric power system (UES).

Power stations working together on a common electrical network, transmission lines, raising and lowering substations, make up the UES. High-voltage power transmission lines, connecting individual systems, allow you to create combined power systems. To assign the mode and operational control of the operation of hydroelectric power plants and networks, combined dispatching departments (ODU) and system dispatching departments are organized.

Mini-hydroelectric power plants can be used in the power system:

3. for generating electrical energy;
4. to cover small peaks in the electrical load of the UE.

This paper considers only the daily fluctuations in the electrical load of the power system (because the mini-hydroelectric power plant reservoir is small), which are determined by the uneven mode of electricity consumption by the population. These load fluctuations occur with a simultaneous increase in electricity consumption, which occurs due to the connection of new consumers.

Fig. 1.1 shows a daily schedule of the electrical utility load. The daily schedule of the electrical load is characterized by the change in the load P load during the day.

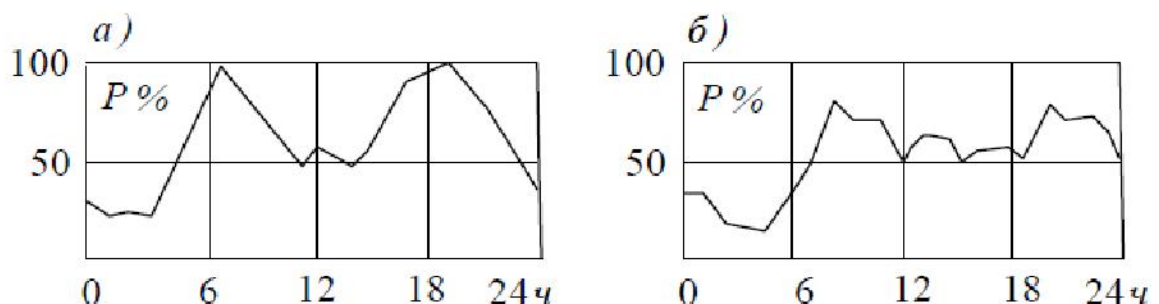


Figure 1.1 - Daily load schedule of the power system. Utility and household load; a - winter day, b - summer day

These graphs (Fig. 1.1) are given for winter and summer time. The graphs show that the peak load falls on the morning and evening hours. In winter, electricity consumption is greater than in the summer season. At the same time, in winter the water flow is several times less than in summer. Autumn - winter water flow of one of the rivers, which characterizes the water flow in Fig. 1.2.

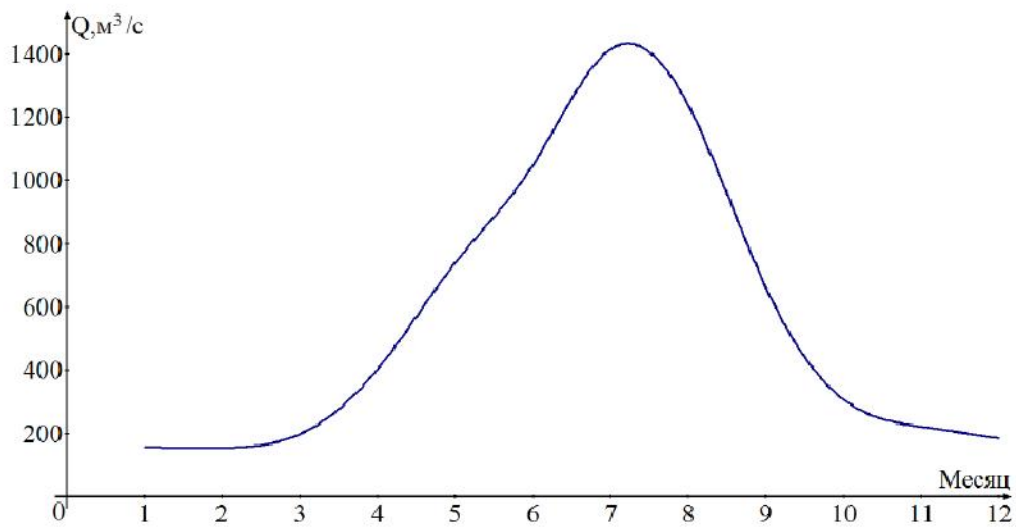


Figure 1.2 - Average annual river flow of the Vorskla River per year

The Vorskla is one of the largest left tributaries of the Dnieper. The river valley is trapezoidal, 10–12 km wide. Almost along its entire length, the right bank is high and steep, the left bank is low and in some places marshy. The width of the river in the middle and lower reaches is about 40 meters, sometimes exceeding 100 meters. The average depth is 1.5 m, the maximum is 10–12 m. [The river slope](#) is 0.3 m/km.

[The water supply](#) is mixed. It freezes in early [December](#), thaws in [March](#). The highest annual water levels are in March- [April](#), the lowest in [July](#) - [October](#). The average annual water flow near Kobelyaki is 33.4 m³/s. The mineralization of the water is: spring flood - 672 mg/dm³; summer-autumn low water level - 766 mg/dm³; winter low water level - 775 mg/dm³.

From Fig. 1.2 it is seen that the main water flow of the Vorskla River occurs in the period from May to September and is 76.0% of the annual flow [4]. It follows that in the winter period the water flow of the rivers decreases, and the need for electricity increases (Fig. 1.1), and when designing mini-hydroelectric power plants, the winter water flow is taken for calculations, which underestimates the installed capacity of the mini-hydroelectric power plant.

In order to be able to quickly increase the generated active power and cover the daily schedule of the electrical load of the power system, it is necessary to build a mini-hydroelectric power plant with a daily regulation reservoir to cover the peaks of the electrical load of the power system.

Daily regulation allows to increase the participation of mini-hydroelectric power plants in covering the maximum load of the system, to reduce the need for power of other power plants and to improve their operation mode. During the low-water period, with round-the-clock operation at a constant inflow flow, the hydroelectric power plant can develop relatively small power. When operating with daily regulation, a mini-hydroelectric power plant with a daily reservoir develops increased power during peak load hours, and during hours of minimum load it reduces its power and accumulates water in the reservoir.

1.2 Methods of controlling the active power of a mini-hydroelectric power plant hydraulic unit

There are several options for regulating the active power of a mini-hydroelectric power plant. Let's consider all the options in turn.

Ballast resistance regulation. Autonomous mini-hydroelectric power plants install hydroturbines without oil pressure units, the directing device is set to the nominal operating mode of the hydroturbine, which does not allow saving water with low electricity consumption. AC machines are used as generators. Autonomous mini-hydroelectric power plants, as a rule, do not have on-duty personnel. Changing the generated active power (P_e) is performed manually by influencing the directing

devices of the hydroturbines during the current inspection of the mini-hydroelectric power plant equipment. The balance between the generated power and the consumed active power is ensured by "throwing" excess generated electricity to rheostats [41,42,43]. The water level in the upper reaches of the reservoir is limited by an idle spillway. This method of regulating the generated electricity is not energy efficient.

Active power regulation using a directing device (NG). Consider a mini-hydroelectric power plant with one hydraulic unit (HU) based on a synchronous generator (SG) connected to an infinite power network. The SG power is very small compared to an infinite power network. Changing the SG operating mode can practically not affect the voltage U_c or frequency f_c of the power system. When the SG operates in parallel with an infinite power network, the voltage U_c and frequency f_c at the SG terminals are rigidly set by the mode of the entire network and do not depend on the excitation current, load current and power of the SG itself [14].

Therefore, the frequency of rotation of the SG is determined by the frequency of the infinite power network, which follows from the relation

$$\omega = \frac{2\pi f_c}{p_n},$$

where p_n is the number of pairs of SG poles.

Mini-hydroelectric power plants, as a rule, do not have on-duty personnel. When operating a hydropower plant in parallel with an infinite capacity network, two modes are most often implemented:

3. the first mode is characterized by changing (regulating) the active power of the generator with constant excitation;
4. The second mode is characterized by a change in excitation (reactive power regulation) while the active power of the generator remains constant.

When operating a solar power plant in parallel with an infinite power network, the change (increase/decrease) of the generated active power is carried out in two ways:

- 1) manually by influencing the NA of the hydroturbine, during the current inspection of the mini-hydroelectric power plant equipment;
- 2) in automatic mode by influencing the NA using hydraulic actuators.

Regulation of the active power of the GA using the NA does not allow for high performance, which is limited by the hydromechanical inertia of the system.

Synchronous generator with two-link frequency converter (FC). Active power regulation at variable shaft speed can be achieved using a SG with a two-link FC in the stator track. These systems are very fast, but have a significant drawback: the power of the FC in the SG stator is designed to transfer the entire generator power, which increases capital costs and electrical losses.

One of the options for solving this problem is the use of asynchronous generators with a phase rotor (AGFR). The requirements for stabilizing the parameters of electricity generated at a variable frequency of rotation of the GA shaft lead to the option of building a GC with electrical regulators [15]. In our case, the GC can be built on the basis of an AG with a frequency converter in the rotor circuit (a doubly powered machine).

A double-feed machine. Fundamentally new opportunities for rapid changes in the generated active power, P_e , are provided by generator sets based on a double-feed machine. The use of an asynchronous machine HA has long been of interest to researchers working in the field of electricity generation systems.

A new stage in the study of asynchronous GCs is associated with the use of MPG for this purpose. Due to its wide regulatory capabilities, the MPG generator occupies an equal place among alternative GCs, and in some respects has significant advantages. New prospects for the application of the MPG generator have been obtained thanks to the latest achievements in the field of power electronics, the creation of modern frequency converters, which provide an almost sinusoidal shape of the currents in the phases of the electric machine.

Research and implementation of the MPZH generator in wind power and ship-mounted shaft generator installations are also being carried out abroad. For example, in Japan by Hitachi, in Norway by ABB KraftAs and ABB Corporate. Research, in Australia - Rainbow Power Company, in Germany - AKW, Siemens [13]. Significant world experience has been accumulated in the development and research of MPG generators.

In this work, the task of building an automatic control system for the active power of a multi-phase generator for a mini-hydroelectric power plant hydraulic unit is considered in the light of the problem of creating an automatic electric drive operating in generator mode as a basic element of an automated control system for the technological process of electricity generation in the unified electric power system of Ukraine.

A simplified power diagram of a GC based on a MPZh is shown in Fig. 1.3.

The generator is an asynchronous machine with a phase rotor (AM), the stator of which is connected to the network, and the rotor receives power from a semiconductor frequency converter (FC) [4, 9]. The voltage of the FC around the rotor AM is almost directly proportional to the slip frequency. By changing the rotor supply frequency, it is possible to adjust the angular velocity of the generator shaft during synchronous operation of the GC with the adjacent power system. This allows you to adjust the power P_e , which is supplied to the network.

The power scheme of the GC, shown in Fig. 1.3, is used in wind power plants with a control range of approximately 1:2. The IF is built according to a power scheme that allows the transmission of active power in both directions. The installed power of the IF is directly proportional to the maximum permissible slip frequency. This GC allows the regulation of P_e at the rate of electromagnetic transients by changing the electromagnetic moment M_e of the generator. Thus, it becomes possible to reduce the transient time $P_e(t)$ by tens of times compared to currently operated GCs based on synchronous generators operating in parallel with the network.

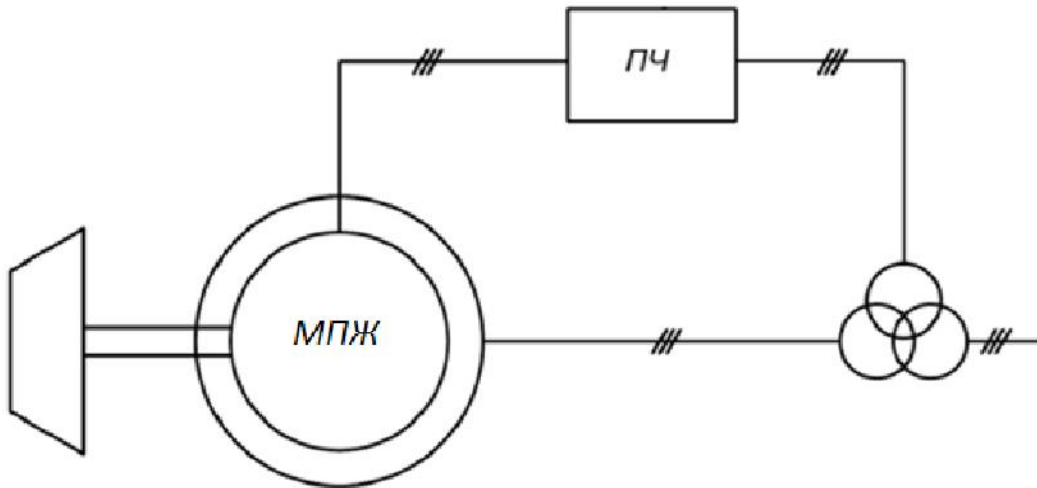


Figure 1.3 – Power scheme of a GC based on a MPZH

The main advantage of a mini-hydroelectric power plant based on a dual-feed machine is that the generator is controlled by converting not all, as in a SG with a two-link inverter, but only part of the electrical energy from the generator power.

This power scheme is widely used in wind power plants operating on an infinite power grid. The regulation of the generated active power P_E is carried out by changing the speed of the wind turbine .

In [13], two control algorithms are considered: for autonomous mode and for operation on a power grid with a power exceeding the power of the MPZh by 10 times. The algorithms proposed by them are most suitable for internal combustion engines, wind turbines and mini-hydroelectric power plants with active hydroturbines, where the change in M_e does not affect the hydraulic system in any way.

a two-link autonomous current inverter (AIS) was selected as the inverter , which is a disadvantage of this power circuit - low speed in M_e due to the inertia of the choke (Fig. 1.4).

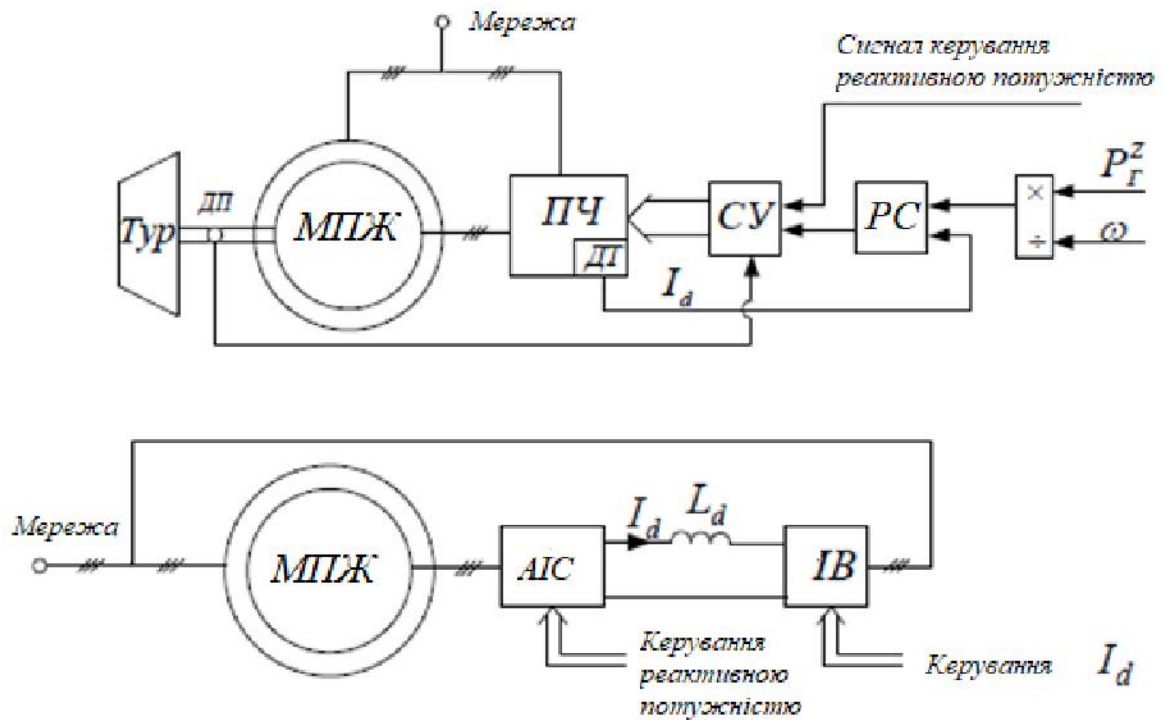


Figure 1.4 – Functional diagram of a GA based on MPZ with AIS

The authors of previous works did not solve the following problems:

- the static characteristics of the hydroturbine have not been studied and taken into account;
- the dynamic properties of the hydroturbine with the water pipe were not taken into account, namely, the kinetic energy of the water in the water pipe was not taken into account;
- the considered MPZ control system does not limit the slip of the induction machine in steady and dynamic modes;
- a methodology for synthesizing speed and active power regulators has not been developed.

It is necessary to continue these works in areas related to the analysis of electromagnetic and electromechanical processes, the synthesis of automatic control systems for the MPZ generator, the influence on the characteristics of a frequency converter-type generator, etc. The interaction of the hydroturbine and MPZ has not been sufficiently studied.

According to the results of the review, it is proposed to use a vector control system (VCS) based on a dual-feed machine in the mini-hydroelectric power plant [7]. Modern CVSs with alternating current electric machines, made on the basis of transistor frequency converters, are characterized by high speed of electromagnetic torque.

The time constant of the MVU MPZH in terms of electromagnetic torque, and accordingly in terms of active power, for modern SVK with high-power alternating current electric machines is from 0.005 to 0.02 sec .

The rotor back-EMF is directly proportional to the absolute slip of the induction machine. Therefore, the output voltage for which the frequency converter must be designed is determined mainly by the maximum slip in the operating speed range. In addition, by controlling the rotor current of the induction machine, it is possible to ensure a minimum of total losses.

Therefore, MPG with SVC are characterized by high efficiency when operating at near-synchronous rotor speeds of an asynchronous machine. Typically, the rotor speed varies from -40% to + 30% of the synchronous speed. These requirements determine the range of power variation of the power converter - within 30 ÷40% of the nominal value of the MPG generator power. The use of a double-feed machine is especially effective where long-term operation at speeds exceeding the synchronous speed of the generator and full, in particular, nominal mechanical load is required [13].

In these modes, the MPZh generates electric energy along the stator and rotor circles. In modes where the MPZh operates below the synchronous speed, the MPZh generates electric energy along the stator circle, and consumes it along the rotor circle. Due to the limited power of modern inverters, the creation of a GC based on the MPZh is promising , primarily for mini-hydroelectric power plants. The author sets the task of investigating the possibilities of regulating the main technological parameters of mini-hydroelectric power plants by changing the speed of rotation of the hydraulic unit.

A review of the reference literature on hydroturbines [12,13,14] shows that for hydroturbines with rigidly fixed blades, an increase in angular velocity by approximately two times compared to the nominal one leads to a decrease in the power developed by the hydroturbine to zero (Figure 1.5) [14].

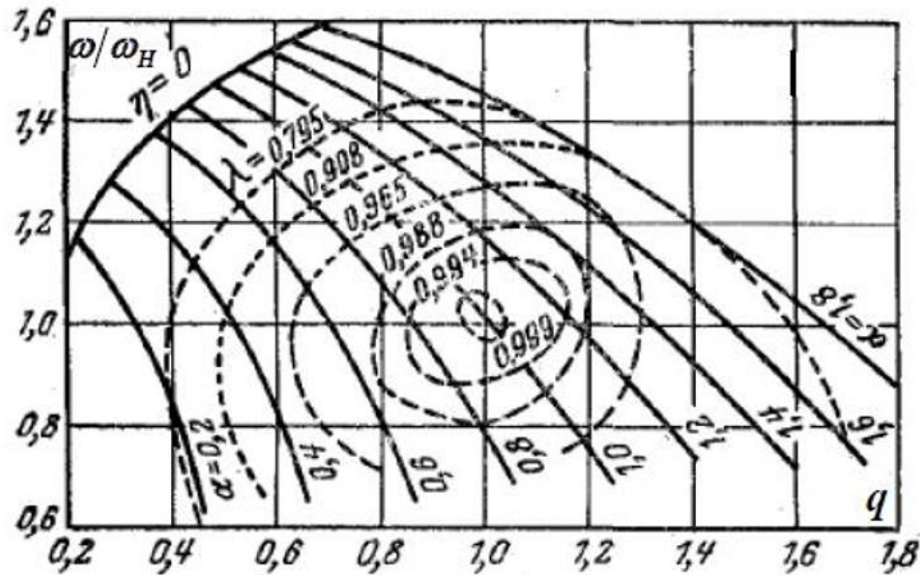


Figure 1.5 - Characteristics of the PV hydroturbine.

α - relative opening of the NA; $\lambda = \eta / \eta_n$ - relative efficiency; $q = Q / Q_n$ - relative water flow rate

The purpose of regulating the speed of the generator in the main mode is to maintain the maximum pressure value of the mini-hydroelectric power plant, but without idle spillway. The controlling influence on the generator in such mini-hydroelectric power plants is the electromagnetic moment of the generator M_e .

The automatic control system (AC) of the angular velocity of the GA should be an internal control loop in the AC of the active power generated P_e (Fig. 1.6). A fast-acting internal loop - AC ω is necessary, first of all, to limit ω in transient processes during sudden unscheduled power tasks P_e . Since the voltage at the terminals of the AC along the circumference of the AM rotor is almost directly proportional to the slip frequency, limiting the minimum and maximum values of ω will protect the AC from exceeding the permissible values of the voltage along the circumference of the rotor.

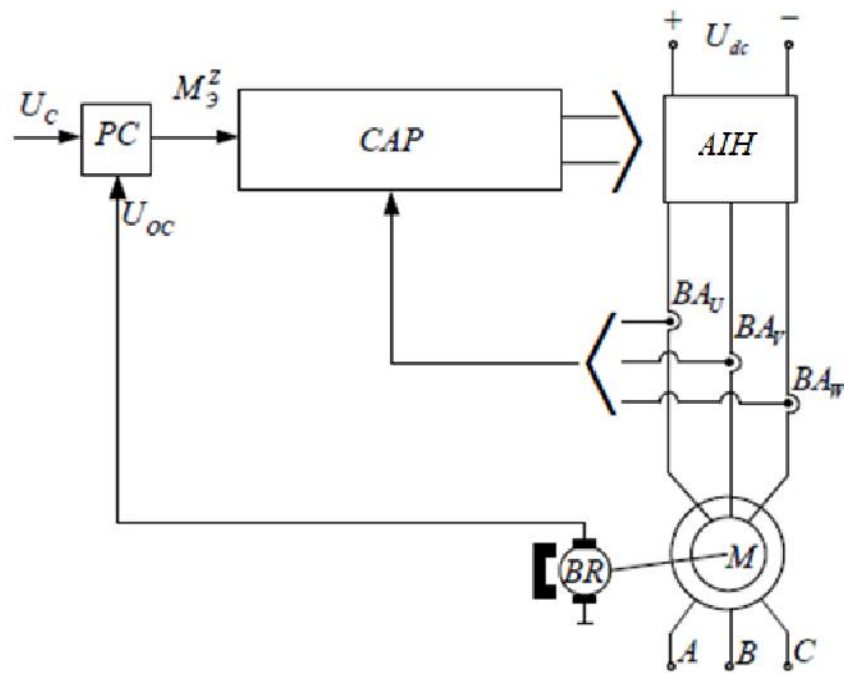


Figure 1.6 - Functional diagram of the ATS MPZH

MPZ with a vector control system (VCS) are currently widely used in wind power plants. MPZ with CVS has influence channels for controlling the active and reactive power transmitted to the network.

The vector control system of an electric drive based on a dual-feed machine is a two-channel ACS. The control influences in it are the components of the vector of the setpoint signals on the currents or voltages of the generator rotor. In this case, one of the vector components is used to regulate the speed (torque).

The task of constructing control circuits and synthesizing regulators of the active power control system of a mini-hydroelectric power plant based on MPZh requires a mathematical description of the processes of the electric machine of electric energy converters by the equations of their two-phase model. The variables of this model should be the regulated coordinates of the SVU and the projections of the vector of control influences on the axes of the Cartesian coordinate system, which rotates synchronously with the motor field.

1.3 Mathematical description of the vector control system of a doubly fed machine

A doubly fed machine in this work is an asynchronous machine with a phase rotor, controlled by a frequency converter, with the generator stator connected to the AC network, and the rotor to the converter outputs. An asynchronous machine can be either serial, with three-phase windings, or specially designed, in particular, to have a two-phase winding on the rotor.

An asynchronous generator with a phase rotor is an implicitly poleless, magnetically and electrically symmetrical machine. Its mathematical description in a Cartesian coordinate system, rotating with an arbitrary angular velocity ω_k , can be represented by the following vector -matrix equations:

Circuit winding voltage balance equation

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = U_s - R_s I_s - \omega_k D\Psi_s. \quad (1.1)$$

Rotor circuit voltage balance equation

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = U_r - R_r I_r - \omega_\Delta D\Psi_r. \quad (1.2)$$

Magnetic circuit equation

$$\Psi_s = L_s I_s + L_m I_r, \quad (1.3)$$

$$\Psi_r = L_m I_s + L_r I_r, \quad (1.4)$$

$$\Psi_m = L_m (I_s + I_r). \quad (1.5)$$

Expression for the electromagnetic torque of the motor

$$M_\mathcal{E} = c L_m I_s^T D I_r, \quad (1.6)$$

Here $\Psi_s, \Psi_r, U_s, U_r, I_s, I_r$ are two-dimensional column vectors of flux linkage, voltages and currents of the form $X_i = [x_{i1}, x_{i2}]^T$; x_{i1}, x_{i2} are components of the vector X_i , which are its projections onto the corresponding axes of the Cartesian coordinate system 1,2. The index i means that the variable refers to the stator or rotor winding; T is the symbol for the transposition of the -column vector. Ψ_m , is the flux linkage vector characterizing the magnetic flux in the air gap, $\Psi_m = [\Psi_{m1}, \Psi_{m2}]^T$. D is the transformation matrix of the -column vector,

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix},$$

R_s, R_r - active resistances of the stator and rotor windings, L_m - main inductance of the motor, L_s, L_r - intrinsic inductances of the stator and rotor windings,

$$\begin{aligned} L_s &= L_m + L_{\sigma s}, \\ L_r &= L_m + L_{\sigma r}, \end{aligned}$$

where $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ - leakage inductances. ω - rotation speed of coordinate system 1, 2 relative to the rotor,

$$\omega_{\Delta k} = \omega_n \omega \quad (\pi 1.7)$$

Provided that the coordinate system 1, 2 rotates synchronously with the stator magnetic field, ω_{Δ} in (1.7) is the slip frequency. M_E is the electromagnetic moment, c is the design constant of the generator. In the following work, we will assume that the two-phase model of an asynchronous generator is compiled using a power-invariant transformation of physical variables. Then $c = p_n$. The equation of mechanical motion has the form

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_{\Theta}, \quad (1.8)$$

where M_T is the moment of the hydroturbine, M_E is the electromagnetic moment of the MIS generator, and J_Σ is the total moment of inertia of the GA, reduced to the generator shaft.

Equations (1.1) - (1.6) of the mathematical description of an asynchronous generator with a phase rotor are compiled in a system of generally accepted assumptions [24]:

7. the stator and rotor windings of the electric machine are located symmetrically relative to the axis of rotation, as well as relative to each other at any angular position of the shaft ;
8. the mutual inductances of the stator and rotor phases are harmonic functions of the rotor angular position; the unevenness of the air gap due to the slots is not taken into account;
9. the magnetization characteristic is piecewise linear;
10. the effect of current displacement and the active resistance of the magnetizing circuit are not taken into account;
11. there are no damping circuits on the rotor;
12. There are no capacitances inside the windings and between them, and therefore, the energy of the electrostatic field is taken to be zero.

When constructing a system of electric drive regulators, as force influences on the generator from the control part of the mini-hydroelectric power plant, we will consider the average values of currents i_{r1} , i_{r2} or voltages u_{r1} , u_{r2} during the switching period of the power converter. These variables represent projections of generalized current vectors or rotor voltages, respectively, on axes 1, 2, which rotate synchronously with the generator field of the orthogonal coordinate system.

The modern level of development of semiconductor and conversion technology allows to build systems of alternating current electric drives, in which the generalized vector of current or voltage at the output of the power converter acts as the control influences. This means that the speed of current (voltage) regulation systems of such EPs is at least an order of magnitude higher than the speed of external control circuits of mini-hydroelectric power plants.

We will construct vector control systems for electric motors by considering the electric energy converter as an inertialess element of the automatic control system of the electric drive. We will take the mathematical description of the rotor current control system of an asynchronous generator as

$$I_r = k_{YT} I_r^z, \quad (1.9)$$

where k_{UT} is the gain coefficient of the " inertia-free " current source;

$I_r^z = [i_{r1}^z, i_{r2}^z]^T$; i_{r1}^z, i_{r2}^z - current setting signals at the output of external regulators of the IED.

The mathematical model of the voltage regulation system will have a similar appearance:

$$U_r = k_{yH} U_r^z, \quad (1.10)$$

here k_{UN} is the gain of the voltage source;

$$U_r^z = [u_{r1}^z, u_{r2}^z]^T ;$$

u_{r1}^z, u_{r2}^z - voltage at the output of external regulators of the TIR vector control system.

The electromagnetic moment M_E of the generator is determined by the product of the rotor current I_r (1.9) and the stator flux linkage amplitude Ψ_s .

Therefore, in the operating modes of the EP with stabilization of the magnetic state ($\Psi_s = \text{const}$), the instantaneous value of M_E will be directly proportional to i_{r2} and the expression for M_E will have the form,

$$M_{\mathcal{O}} = -p_n k_s k_{YT} \Psi_s i_{r2}^z, \quad (1.11)$$

$$M_{\mathcal{O}} = \kappa_M^{CBV} M_{\mathcal{O}}^Z. \quad (1.12)$$

where k_s is a dimensionless coefficient.

1.4 Overview and selection of the type of hydroturbine

Fig. 1.7 shows a mini-hydroelectric power plant consisting of a daily regulation reservoir, a pressure water main and a hydraulic unit. The hydraulic unit consists of a hydraulic turbine and an alternating current generator.

A hydroturbine is a hydraulic prime mover designed to convert the energy of the flow supplied to it into mechanical energy on its shaft. Thus, hydraulic energy is first converted into mechanical energy in the hydroturbine, and then into electrical energy by means of an alternating current generator.

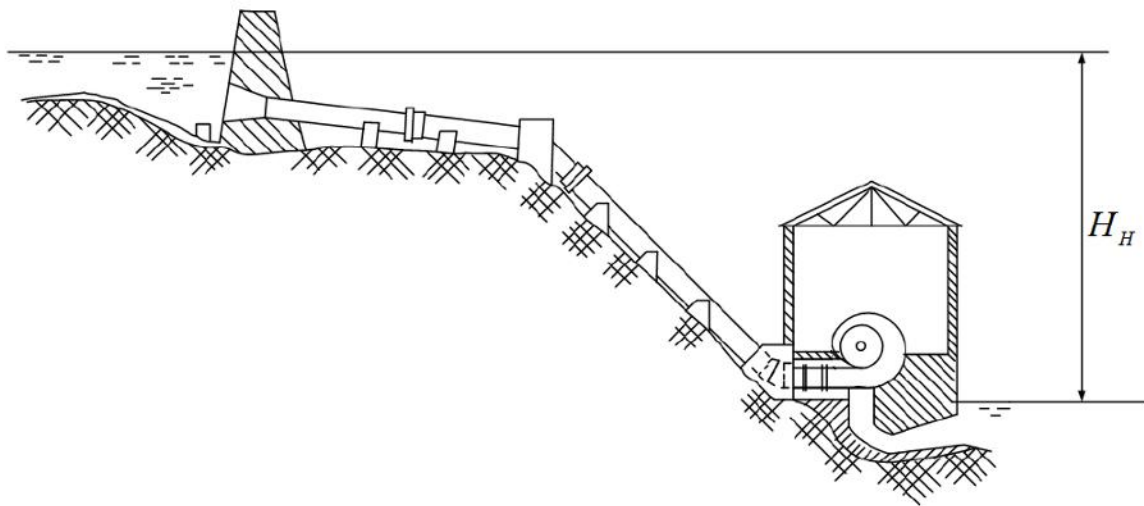


Figure 1.7 – Technological scheme of a mini-hydroelectric power plant

One of the problems in designing a mini-hydroelectric power plant is the choice of a hydroturbine.

The power of the hydroturbine P_T is equal to the product of the hydroturbine torque and the angular velocity:

$$P_T = M_T \omega. \quad (1.13)$$

The power of a hydroturbine changes when the water flow rate Q and the head H change. The expression for calculating the power of a hydroturbine has the form [11]

$$P_T = 9,81QH\eta_T, \quad (1.14)$$

where H is the pressure of water supplied to the hydroturbine;

Q - water flow;

η_T – is the efficiency of the hydroturbine.

The efficiency of a hydroturbine depends on its design and size and changes with the load on the hydroturbine. For small hydroturbines with a diameter of approximately 1m, the highest efficiency is 0.88 - 0.91.

The nominal power P_{TN} is determined at the nominal head H_N and the nominal throughput Q_N .

Generator power P_E , is measured at the generator terminals. In steady-state conditions, the generator power is equal to the hydroturbine power minus generator losses,

$$R_E = R_T \eta_{gene},$$

Where η_{gen} is the generator efficiency.

When choosing hydroturbines, it is necessary to pay attention to the fact that hydroturbines are divided into two types:

- active hydroturbines that use flow energy in kinetic form (Fig. 1.8. a);
- Jet hydroturbines (Fig. 1.8. b, c) use mainly the potential part of the energy of the flow.

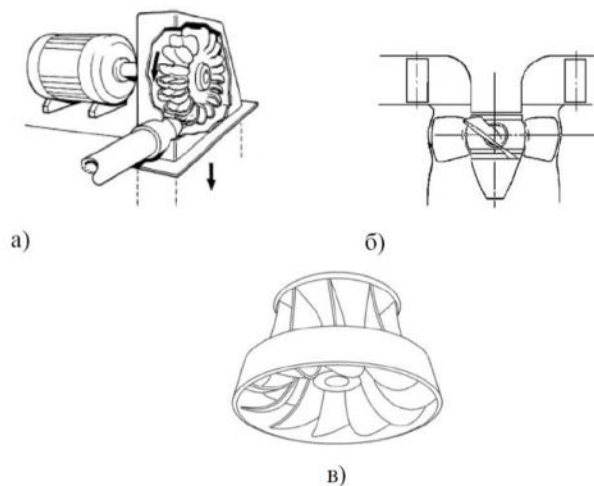


Figure 1.8 – Hydroturbines: a - bucket, b - propeller, c - radial-axial

Active hydroturbines (Fig. 1.8.a). The design feature of turbines of this type is that they operate from a free jet at normal atmospheric pressure. The nozzle directs water onto the blades of the impellers, which have the shape of a bucket, and all the energy in the nozzle is converted into kinetic energy.

Active turbines therefore operate on kinetic energy and are only used at high pressures, from 40 to 800 meters.

Jet hydroturbines. Jet hydroturbines operate primarily through pressure energy.

Reactive hydroturbines are divided into two types, axial hydroturbines and radial-axial hydroturbines. Axial turbines, in turn, are divided into propeller and rotary-blade (Fig. 1.8. b). In axial turbines, the flow in the meridional plane in the impeller blade area has an axial direction, and in radial-axial hydroturbines - a radial-axial direction.

By storing energy as much as possible in potential form until the moment of its conversion into mechanical energy, turbines of this type have a high intensity of use of flow energy and high efficiency. Today, jet hydroturbines are the most common type of turbine, covering the range of heads from 1.5-2 to 350 m [11].

Each type of hydroturbine corresponds to a certain range of pressure and water flow and has its own preferred area of application.

By constructing hydraulic structures, it is possible to create a wide variety of pressures from minimum to maximum values, which limit the relief of the terrain around the watercourse.

Hydroturbines must have the ability to provide the use of concentrated energy, without any restrictions on head in the specified range of its change and with high efficiency. These requirements are met by the following hydroturbine systems, which are characterized mainly by the impeller design:

- propeller and rotary -blade - at pressures from 1.5 to 40 m and higher;
- radial-axial – at a pressure of 20 to 350 m;
- bucket - at pressures from 200 to 1500 m and higher.

These turbines are available with both horizontal and vertical shaft arrangements.

Let us consider the basic forms of universal characteristics of various turbine systems and types of their impellers.

Bucket turbines. Fig. 1.9 shows the universal characteristic of a bucket hydroturbine, for which it is characteristic that the curves of constant efficiency have the form of ellipses with a semi-major axis along the Q axis, and with a change in the given revolutions n' , the efficiency values are greatly reduced. Fig. 1.14 shows the main dimensions of a bucket hydroturbine.

The operating characteristic of a bucket turbine has a flat shape. The curves of constant openings on the universal characteristic are depicted as vertical straight lines. This is explained by the fact that the water flow does not depend on the turbine speed, but depends only on the nozzle opening and the pressure under which the outflow occurs.

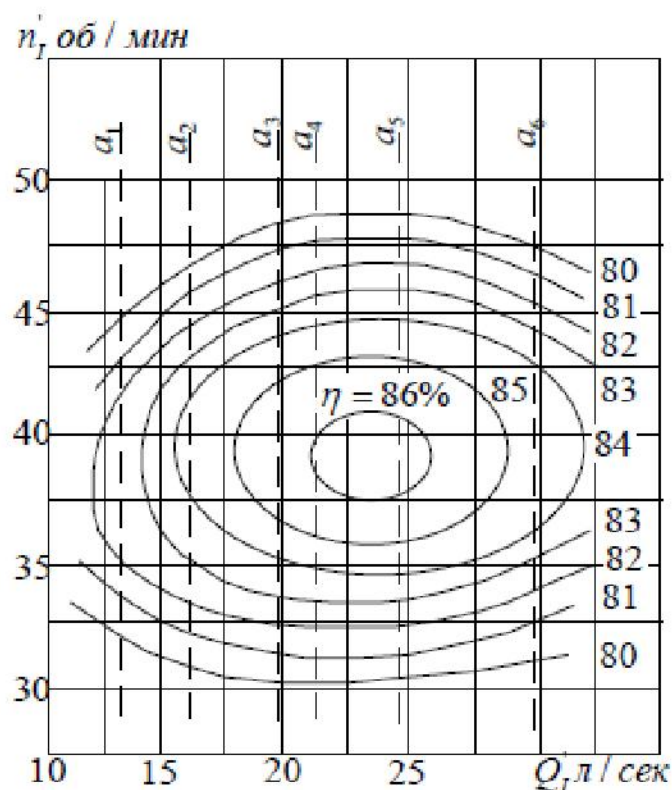


Figure 1.9 – Universal characteristic of a bucket hydraulic turbine

Radial-axial hydroturbines with low speed coefficient $n_s = 45 \div 150$. Turbines of the same system have different types of impellers. Each turbine system has slow-speed, normal and high-speed impellers. Fig. 1.10 shows the universal characteristic of a radial-axial hydroturbine with a low speed coefficient, and Fig. 1.14.b shows the main dimensions. Such impellers have small ratios b_0 / D_1 . The leading edges of the impeller blades are located near the leading ends of the blades of the guide device and have an almost vertical arrangement, and the length of the blades along the streamline is relatively large. The number of impeller blades is also large - from 17 to 21. The tangents to the curves of constant openings form an obtuse angle with a straight line parallel to the Q axis. The water flow rate depends on both the speed of the hydroturbine and the opening of the NA.

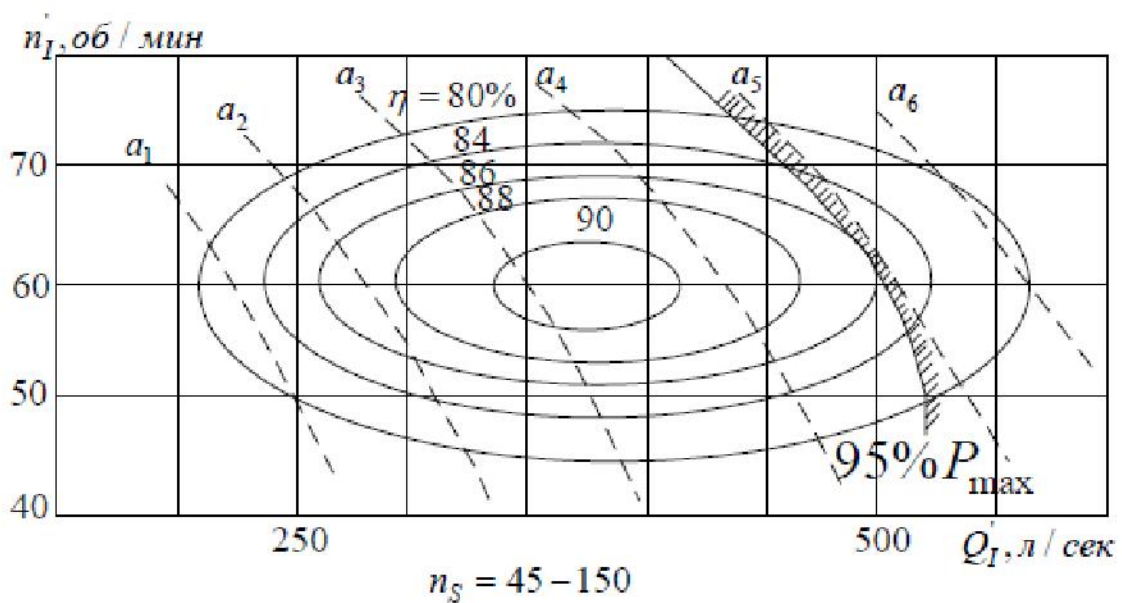


Figure 1.10 – Characteristics of a radial-axial hydroturbine with a low speed ratio

Radial-axial hydroturbine with medium speed coefficient $n_s = 145 \div 260$. Fig. 1.11 shows the universal characteristic of a radial-axial hydroturbine with an average speed coefficient, and Fig. 1.14.c shows its main dimensions.

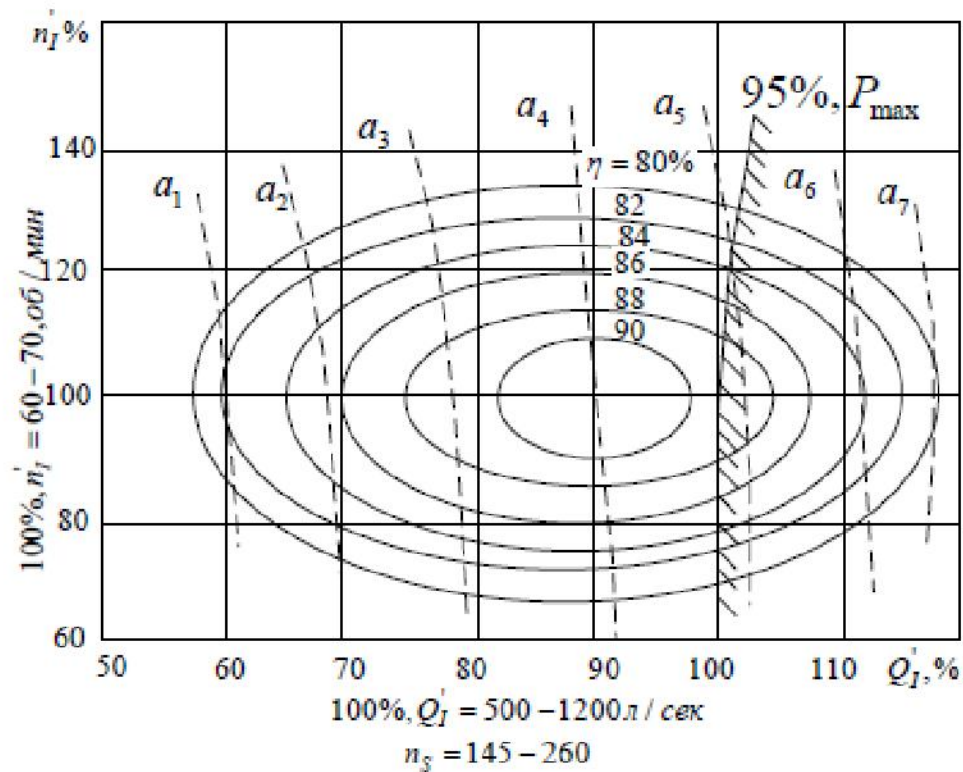


Figure 1.11 – Characteristics of a radial-axial hydroturbine with an average speed coefficient

The wheels of normal radial-axial turbines have a higher value of b_0 / D_1 compared to the wheels of low-speed turbines. The leading edge of the impeller blades is located almost vertically. The constant opening curves approach vertical straight lines.

Radial-axial hydroturbines with high speed coefficient $n_s = 260 \div 400$.

Fig. 1.12 shows the universal characteristic of a radial-axial hydroturbine with a high speed coefficient, and Fig. 1.14.g shows its main dimensions.

The leading edge of the impeller blades is significantly distant from the trailing ends of the guide vanes and is sharply inclined to the shaft axis. The length of the blades along the streamline is relatively small, and the number of impeller blades is 8-16 pcs.

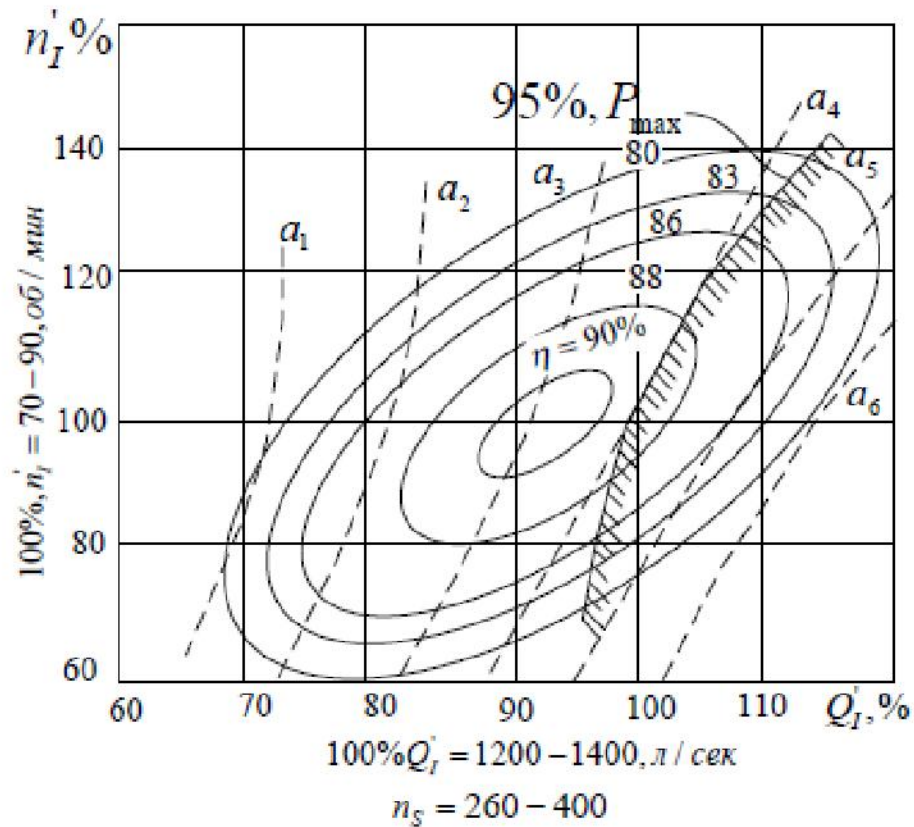


Figure 1.12 – Characteristics of a radial-axial hydroturbine with a high speed coefficient

The universal characteristics of a radial-axial hydroturbine with a high speed coefficient are compressed along the Q axis and elongated along the n axis.

The main disadvantage of such characteristics is a sharp change in efficiency with a change in turbine power, and the curve of a five percent power reserve closely approaches the optimal efficiency value. High-speed radial-axial hydroturbines are advisable to install at those stations for which, under operating conditions, it is not necessary to change the load in a wide range. The elongation along the n axis of the curves $\eta = \text{const}$ allows maintaining high efficiency values in a larger range due to the change in head.

Propeller hydroturbines. Fig. 1.13 shows the universal characteristic of a propeller hydroturbine, and Fig. 1.14.d shows the shape of its flow part. Propeller turbines have all the disadvantages of radial-axial hydroturbines with a high speed coefficient, but only in a more severe form.

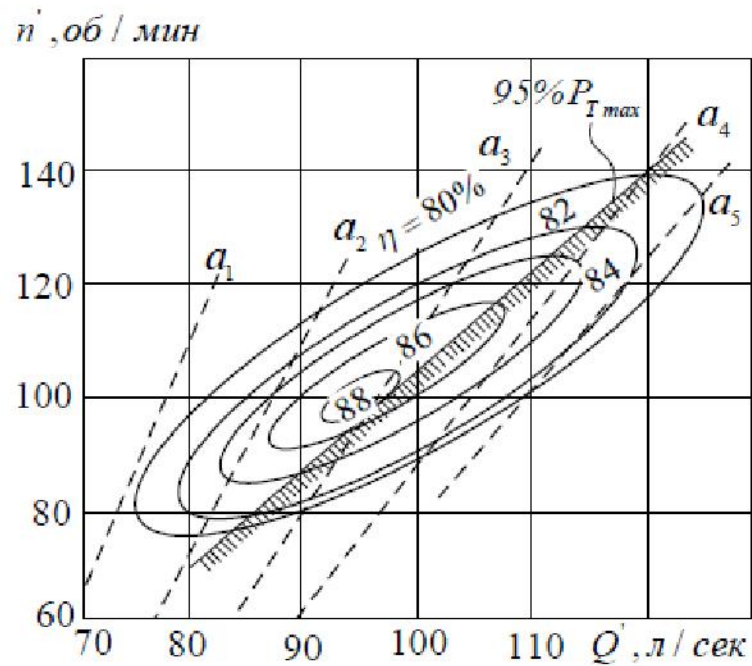


Figure 1.13 – Propeller hydroturbine.

A significant change in efficiency is obtained even with small changes in power, and the five percent power reserve curve passes near the optimal efficiency values. However, the positive effect is a small change in efficiency over a wide range of pressures.

Propeller hydroturbines should be rationally installed at stations with a large number of units, since under these conditions it will be possible to operate the turbine with small changes in power, and significant changes in the power of the entire hydroelectric power plant can be ensured by turning one or more units on and off.

Fig. 1.15 shows a group of operating characteristics of hydroturbines of different types and speeds. Bucket rotary blade hydroturbines have the most flat shape of the characteristic with a relatively small change in efficiency during load fluctuations in the range from 25-30 to 10%. Radial-axial turbines show a greater drop in efficiency at partial loads, the greater their speed coefficient.

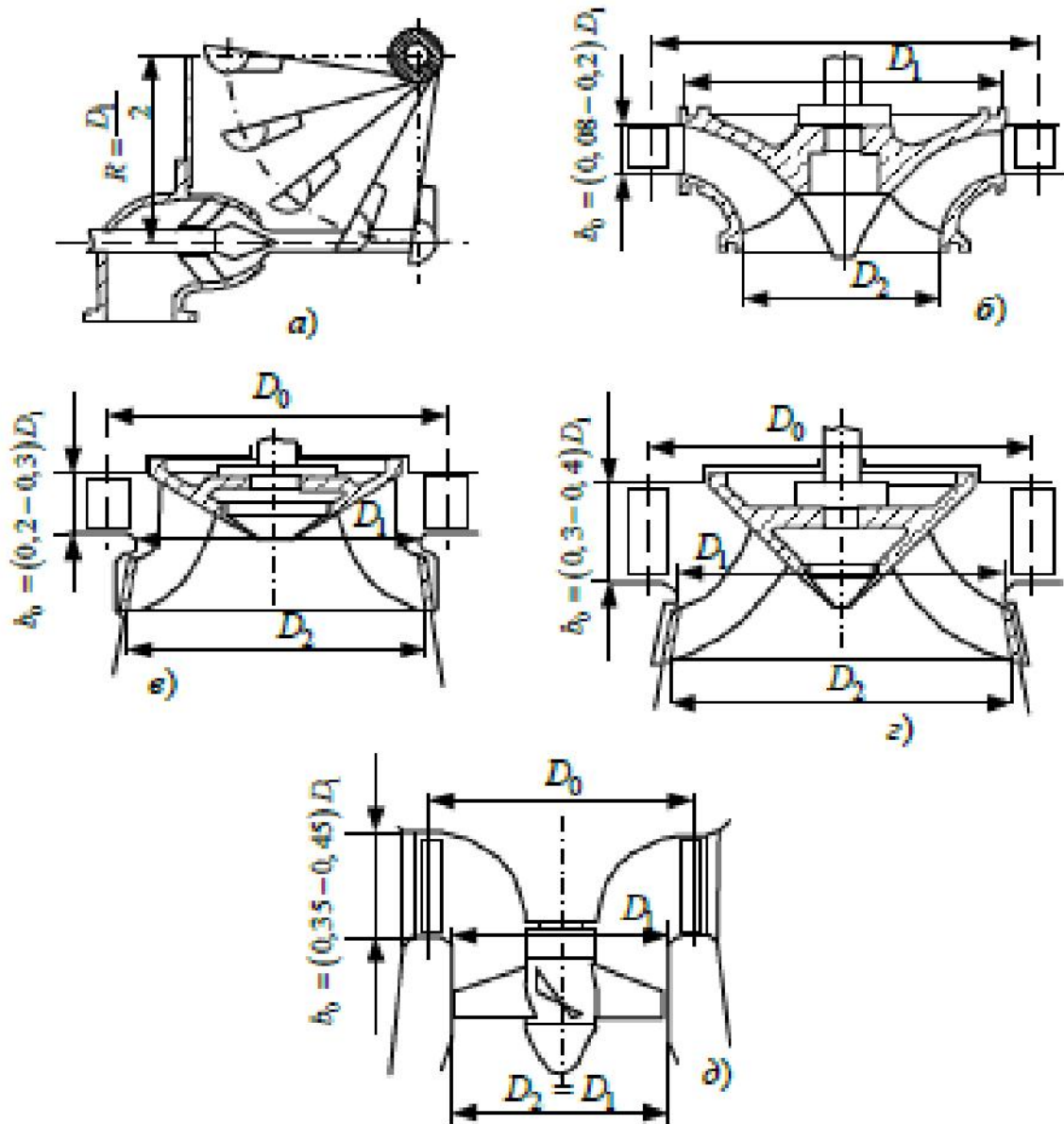


Figure 1.14 – Types of hydroturbines

The operating characteristics with an increased speed ratio approach those of propeller hydroturbines. For this reason, the operation of radial-axial with a high speed ratio and propeller hydroturbines at partial loads is in most cases uneconomical.

The change in flow rate when changing the speed of rotation of the GA, in other words, the slope of the equal opening lines on the flow characteristics, in RO hydroturbines depends on the shape of the flow part, i.e. on the type of wheel. The influence of the type of wheel on the position of the equal opening lines can be traced by comparing the universal characteristics of wheels of different types.

Radial-axial hydroturbines with low and medium speed coefficients are characterized by a decrease in throughput with increasing rotational speed. This is explained by the fact that their impellers have significant blade sections with a radial direction of inter-radial flow.

When the speed increases, due to the centrifugal effect, back pressure is created, which prevents water from entering the impeller through the guide device. In low-pressure and some medium-pressure RO hydroturbines, on the contrary, most of the blades operate in the mode with axial direction of the inter-radial flow. Therefore, when the speed increases due to the increase in the axial component of the velocities in RO hydroturbines, there is a tendency to some increase in throughput with the same opening of the NA.

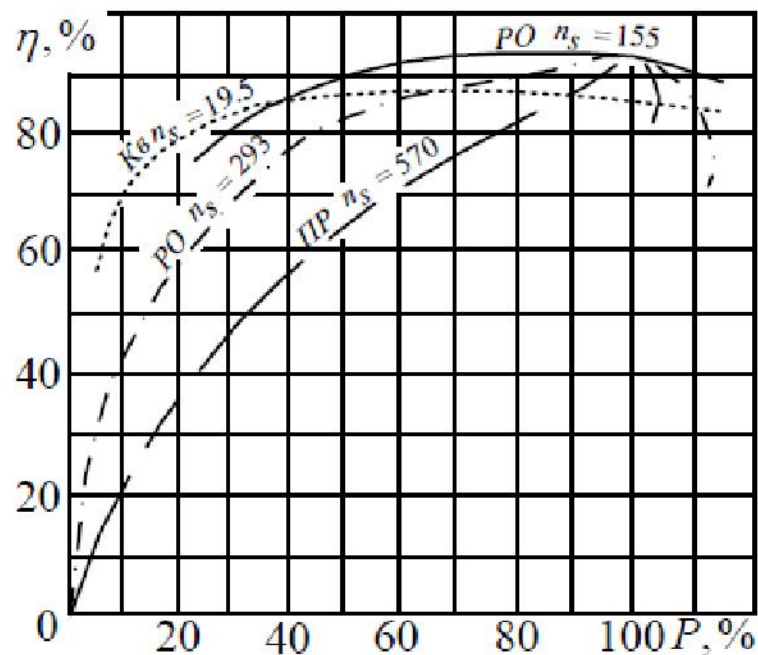


Figure 1.15 - Operating characteristics of hydroturbines of various systems and high-speed

Based on a review of the technical properties of hydroturbines and their operating conditions, the following conclusion was made regarding the choice of the type of hydroturbine.

Due to the fact that the main water runoff (Fig . 1.2) falls on the period from May to September and is 76.0% of the annual runoff, and the remaining months have

a minimum runoff with a simultaneous increase in the need for electricity (Fig. 1.1), and when designing mini-hydroelectric power plants, winter water runoff is taken, which significantly lowers the installed capacity of the mini-hydroelectric power plant and does not allow it to participate in daily regulation. For a short-term increase in the generation of active power of a mini-hydroelectric power plant and its participation in daily regulation, it is necessary:

- build reservoirs with daily regulation, which will allow increasing the participation of mini-hydroelectric power plants in covering the maximum load of the power system, reducing the need for the capacity of other power plants and improving their operating mode;
- choose from the hydroturbines considered above a radial-axial hydroturbine with a low speed coefficient, which will allow, while reducing the amount of active power P_e generated, to reduce water consumption by increasing the speed of rotation of the turbine.

From Fig. 1.5 it is seen that when using hydroturbines with a low speed coefficient, the hydroturbine has the highest efficiency at the main angular velocity of the GA shaft $\varpi=1$. Let us consider the main universal characteristic (Fig. 1.5) along the line $a=1$ which corresponds to the nominal opening angle of the NA GA. An increase in the angular velocity of the GA shaft to $\varpi=1.4$ leads to a decrease in the water flow rate through the hydroturbine (q) approximately to the value $q=0.6$ and to a decrease in the power developed by the hydroturbine (P_T) - by 2.4 times. When the angular velocity of the GA shaft decreases from the nominal down to $\varpi=0.7$, the water flow rate increases by only 16 percent, due to a decrease in the efficiency of the hydroturbine. A further decrease in the speed does not make sense, since it does not lead to an increase in the power of the hydroturbine. At other angles of opening of the NA the situation is similar.

Thus, for hydropower units based on RV hydroturbines with a low speed ratio, the required range of rotation frequency changes will be approximately 1: 2. With this range of GA angular velocities, it is possible to change P_T in the range of 1: 2.4 without affecting the NA of the hydroturbine. At the same time, it is possible to

reduce q approximately 2 times during hours of minimum electrical load to store water in the reservoir.

With a constant water inflow into the reservoir, larger values correspond to smaller values of power P_E and water storage; smaller values correspond to larger values of P_E and a decrease in the water level in the reservoir. Such a mini-hydroelectric power plant can automatically and quickly change the electricity generation, maintaining a balance between generated and consumed active capacities, and use the storage capacity of the reservoir to cover peaks in the electrical load schedule.

The purpose of regulating the speed of the HPP in the main mode is to maintain the maximum pressure value of the mini-hydroelectric power plant, but without idle spillway.

The controlling influence on the GA in such mini-hydroelectric power plants is the electromagnetic moment of the generator (M_E).

1.5 Static characteristics of a radial-axial hydroturbine

From the theory of electric drives it is known that a synchronous machine has an absolutely rigid mechanical characteristic. This mechanical characteristic does not allow the synchronous machine to change the speed.

E and M_T is maintained at any time interval. During the operation of the hydraulic unit, the value of M_T can be varied within wide limits. The moment of the hydroturbine changes due to changes in the water flow rate at the GA mini-hydroelectric power plant.

The torque developed by a hydroturbine depends on the water flow rate Q , the angular speed of rotation of the rotor, the acting pressure H and is determined by the formula

$$M_T = 9,81 \frac{QH}{\omega} \eta_T. \quad (1.15)$$

From this expression it is clear that at $\omega = \text{const}$ the torque of the hydroturbine can be changed by changing the water flow rate Q or the head H . In real conditions it is practically impossible to automatically change the effective head, therefore the turbine torque is regulated by changing the water flow rate. The water flow rate Q is the so-called control parameter, by means of which the regulated quantity (active power generated) is maintained within the specified limits. The change in the water flow rate is carried out by regulating bodies corresponding to the type of hydroturbine.

To rearrange the regulating elements in hydroturbines, exclusively hydraulic servomotors are used, which allow creating the necessary forces.

The active power of the hydraulic unit is maintained within the specified limits at different generator loads by an automatic speed controller, which, by changing the position of the guide device, accordingly changes the water flow through the hydraulic turbine. This method of controlling active power is not suitable for mini-hydroelectric power plants due to the complexity of the mechanical part of the hydraulic turbine and the lack of personnel on duty.

The author proposes to regulate the active power of the MPG generator by changing the number of revolutions of the GA. The MPG stator voltage and the frequency f_c of the electric current in the stator circuit are supported by a power system of infinite power.

By changing the speed of the GA, the regulation of the active power P_E MPZh should be ensured in accordance with the task with the ODU. Equality between $M_E = M_T$ is ensured at $d\omega/dt = 0$. In dynamic operating modes $d\omega/dt \neq 0$. The torque M_T of the hydroturbine and the electromagnetic torque M_E of the MPZh change in dynamic modes. The torque M_E changes due to a change in the control task, and the torque M_T of the hydroturbine changes due to the self-regulation effect when the water flow rate changes.

The task of automatic control of the mini-hydroelectric power plant is to quickly process the signal for the active power task of the MPZh when the control

signal changes. In this case, the angular velocity of the power plant is expected to change in the range of 1:2.

The power developed by the hydroturbine when the guide device (GA) is opened $\alpha = \text{const}$ depends on the flow rate Q , the effective head H and the electromagnetic torque of the MPZH and is determined by formulas (1.14) and (1.8).

If we assume that in stable regimes $M_E = M_T$, then formula (1.15) can be written in the following form

$$\omega = 9,81 \frac{QH}{M_{\Sigma}} \eta_T. \quad (1.16)$$

From this expression it is clear that at $\alpha = \text{const}$ the angular velocity ω of the GA and the flow rate of the hydroturbine can be changed by changing the electromagnetic moment M_E MPZH. Using the electromagnetic moment M_E MPZH, the regulated value (active power P_E mini-hydroelectric power plant) is maintained within the specified limits. As is known from practice, in mini-hydroelectric power plants there are practically no systems for automatic regulation of active power by regulating the water flow rate at a fixed opening of the NA $\alpha = \alpha_{\text{nom}}$.

According to formula (1.15), the torque of a hydroturbine is a function of the flow rate, the speed of rotation of the water head and the efficiency, that is, if we take into account that the flow rate through the hydroturbine is determined by the opening of the regulating body a . This dependence is called the static characteristic of the hydroturbine.

The static characteristic of a hydroturbine can be constructed according to the data of the universal characteristic of the hydroturbine model, on which the curves of constant openings of the regulating body a_M and the curves of constant values of the coefficient of efficiency of the hydroturbine are constructed in the coordinates n_1 and Q_1 , reduced to 1 m of head and 1 m of impeller diameter.

The most widely used are static characteristics (SC), built on the basis of [7]:

- in the axes of relative dimensionless parameters: m - torque, $\bar{\omega}$ - speed, \bar{h} - head, q - throughput;
- in the axes of the given parameters M'_I , n'_I , Q'_I (Fig. 1.16).

Relative dimensionless parameters are determined by the ratios

$$m = \frac{M}{M_H}, \quad (1.17a)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_H}, \quad (1.17b)$$

$$\bar{h} = \frac{H}{H_H}, \quad (1.17b)$$

$$q = \frac{Q}{Q_H}, \quad (1.17r)$$

where M , M_H - turbine torque and its nominal value, Q , Q_H - water flow through the turbine and its nominal value, H , H_H - turbine head and its nominal value, ω_H - nominal angular speed of rotation.

The ratios for calculating the above parameters,

$$M'_I = \frac{M}{HD_1^3}, \quad (1.18 a)$$

$$n'_I = \frac{nD_1}{\sqrt{H}}, \quad (1.18 b)$$

$$Q'_I = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}}. \quad (1.18 B)$$

Static characteristics (SC) are complete in the sense that they cover all modes that can occur during the operation of a hydraulic unit. Using SC, it is possible to visually trace and also calculate (taking into account the influence of unsteady fluid movement) the change in the induced flow rate, torque and speed from the moment the load is removed from the unit to its complete stop.

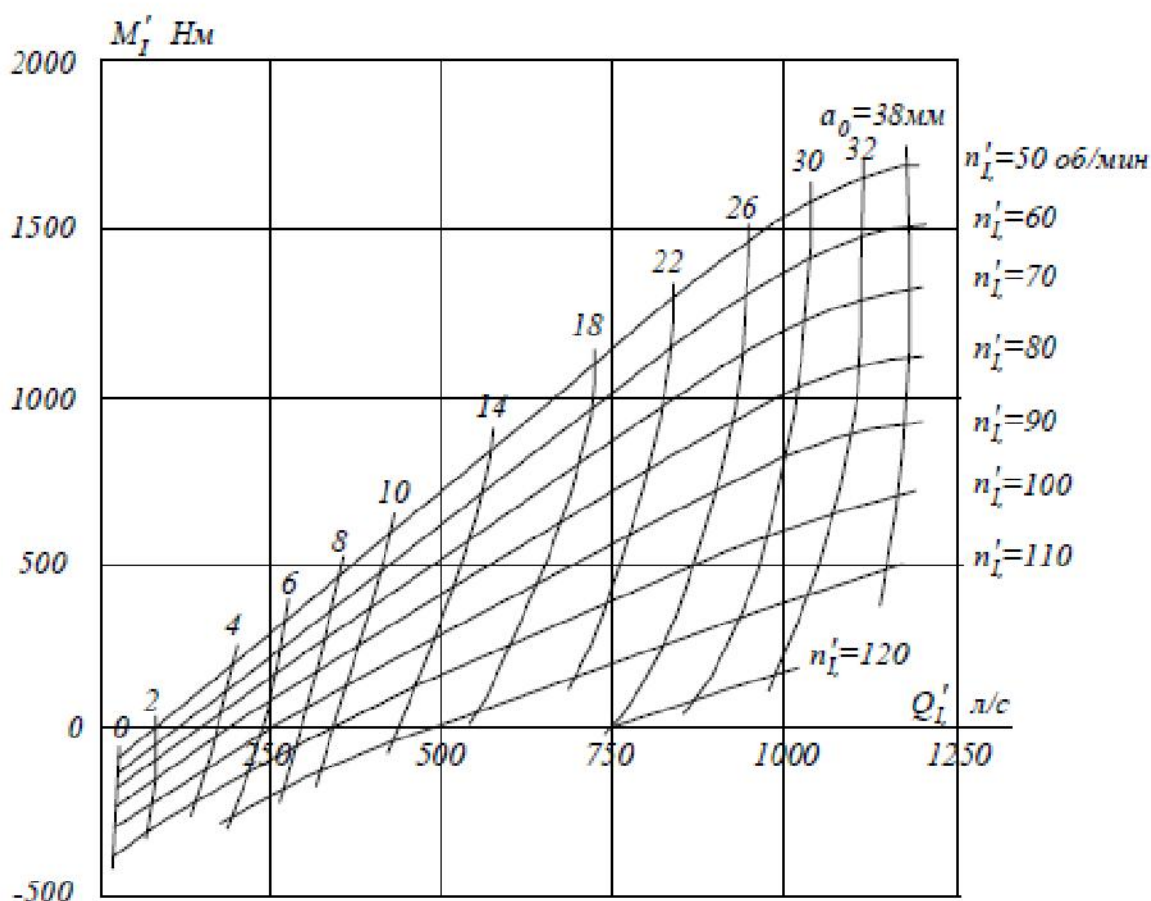


Figure 1.16 - Full static torque -discharge characteristic of a hydraulic turbine

For conventional hydroturbines, there are three modes: turbine, acceleration and hydraulic braking mode. When constructing SH turbines, a different sign rule is used - turbine parameters are taken as positive: in the direction of fluid movement, in the direction of shaft rotation and the sign of the moment.

The shape of the characteristic is greatly influenced by the type of hydroturbine. Fig. 1.16 shows the SH of a radial-axial hydroturbine.

First of all, it is worth noting the differences in the nature of the lines of permanent openings of the NA: in RV hydroturbines with a low speed coefficient, with increasing speed, the water flow rate decreases, which is explained by the effect of "hydraulic channel closure", and in axial turbines, on the contrary, an increase in speed is accompanied by an increase in flow rate due to the "pumping effect".

The construction of static characteristics of the hydroturbine of the designed GA is carried out as follows. Suppose it is necessary to construct a characteristic for

the value of the opening of the NA corresponding to a_M in the model. First, it is necessary to determine the opening a of the designed GA, which corresponds to the opening a_M (a_M – is determined from the universal characteristic of the physical model of the hydroturbine), according to the formula

$$a = a_M \frac{Dz}{D_M z_M}, \quad (1.19)$$

where D_M – diameter of the model impeller; z and z_M the number of blades of the guide device, respectively, of the hydroturbine and the model; a_M is the opening of the NA model.

The view of the universal characteristic of the radial-axial hydroturbine model is shown in Fig. 1.17.

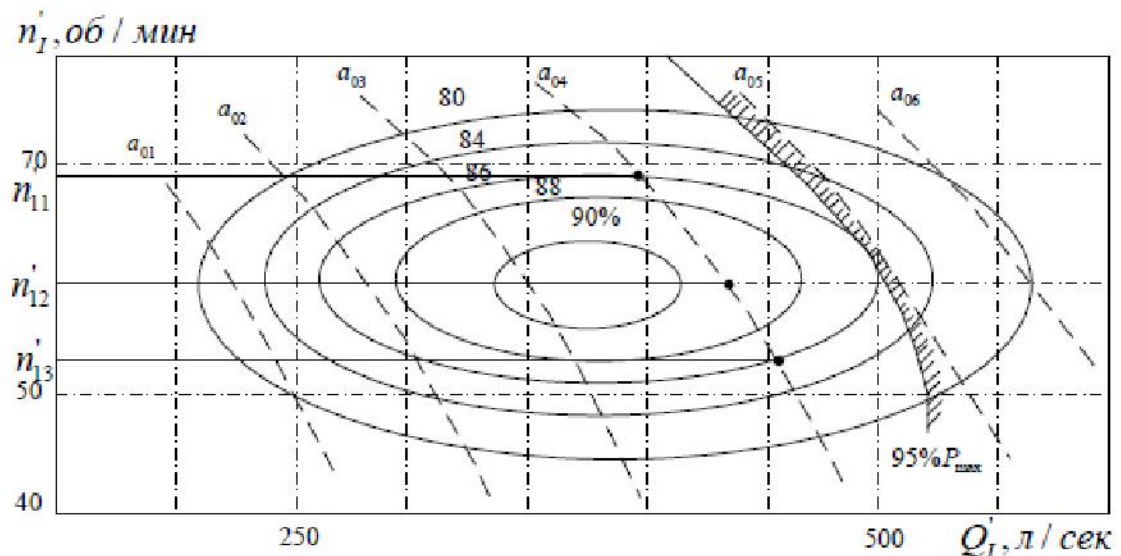


Figure 1.17 – View of the universal characteristic of a radial-axial hydroturbine

Then a series of lines of constant values of the reduced speed n'_{11} , n'_{12} , n'_{13} , etc. is drawn and according to the expression (1.18.b) for each value of n'_1 the speed of rotation of the real hydroturbine is determined. At the intersection points of these lines with the curve $a_M = \text{const}$ the values of the reduced flow rate Q'_1 and the efficiency of the model η_T are determined. Next, for each of the considered values of n'_1 the moment of the hydroturbine is calculated according to the formula [16]

$$M_T = \frac{30}{\pi} \gamma D_1^3 H \frac{Q_1'}{n_T} \eta_T, \quad (1.20)$$

The efficiency of the hydroturbine in expression (1.20) in the first approximation can be taken equal to the efficiency of the model η_M . However, for a more accurate determination of the torque of the hydroturbine, it is advisable to use the empirical dependence,

$$\eta_T = 1 - (1 - \eta_M) \sqrt[5]{\frac{D_M}{D_1}}. \quad (1.21)$$

Static characteristics are constructed in exactly the same way for other discoveries of the regulatory body.

Let us consider an approximate view of the static characteristics of a radial-axial hydroturbine (Fig. 1.18) at different openings of the guide device.

a_1, a_2, a_3 .

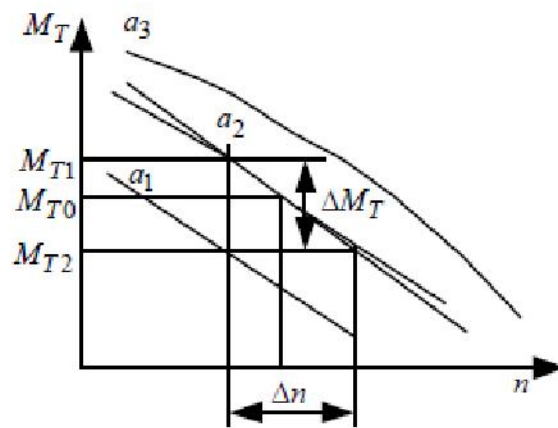


Figure 1.18 – Static characteristics of a hydroturbine

The graphs show that with increasing turbine rotation speed, its torque decreases. This property is possessed by all types of hydroturbines without exception, and it is called the self-regulation effect. Quantitatively, the self-regulation effect is characterized by the turbine self-regulation coefficient e_T , which for a given mode is determined by the slope of the tangent drawn to the constant

opening curve at a given point. Usually, the coefficient e_T is expressed in terms of relative values and is determined by the ratio

$$e_T = \frac{dM_T}{dn} \frac{n_H}{M_{TH}}, \quad (1.22)$$

where M_{TH} and n_{TH} are the nominal (calculated) values of the torque and speed of rotation of the turbine.

According to Fig. 1.18, the derivative dM_T/dn always has a minus sign, since the self-regulation coefficient is a negative value. It should be noted that usually in the technical literature on hydroturbine control, the self-regulation coefficient is called the value (1.22) taken with the opposite sign. The above definition of the self-regulation coefficient is adopted in accordance with the International Code for Testing Hydroturbine Control Systems [8].

Based on the review of the global state of development of mini-hydroelectric power plants, the author proposes a functional scheme for controlling mini-hydroelectric power plants.

This scheme differs from standard schemes for automatic regulation of active power of a hydroelectric power plant with one GA in that the regulation of active power at a hydroelectric power plant is carried out by changing the frequency of rotation of the GA. In the active power regulation system proposed by the author, the hydraulic turbine HP does not require an oil pressure installation (MPU).

The position of the NA is adjusted manually, set to the nominal operating mode, and the regulation of the generated active power is carried out by the generator by changing the electromagnetic torque M_E of the generator (the frequency of rotation of the GA). A mini-hydroelectric power plant based on the MPZh operates in parallel with the EES. Regulation in the proposed system is carried out by increasing or decreasing the electromagnetic torque, which allows water to be accumulated and allows it to be used during peak loads in the presence of a reservoir. The control of the hydraulic unit equipment is provided by a digital information processing device (DIPD), which uses all the necessary signals from sensors that are

sources of information in the ACS and performs control according to a given algorithm.

The actuator that regulates the generation of electricity in accordance with the power task is the MPG generator. An increase in the electromagnetic torque of the generator leads to a decrease in the speed of rotation of the hydroturbine, as a result of which the water flow rate increases.

The torque on the hydroturbine shaft is transmitted via a mechanical connection to the rotor of the electricity generator. This causes the generator to rotate at a certain frequency and generate electricity.

The received electricity enters the switch cabinet (SC), which acts as a power switch, and is transmitted to the electrical power system.

The proposed hydroelectric power plant uses the property of a hydroturbine to reduce water consumption and power when the rotation speed increases to store water in a reservoir while reducing electricity consumption by consumers. The stored water is used by the hydroelectric power plant when there is a power shortage in the power system.

Conclusions on section 1

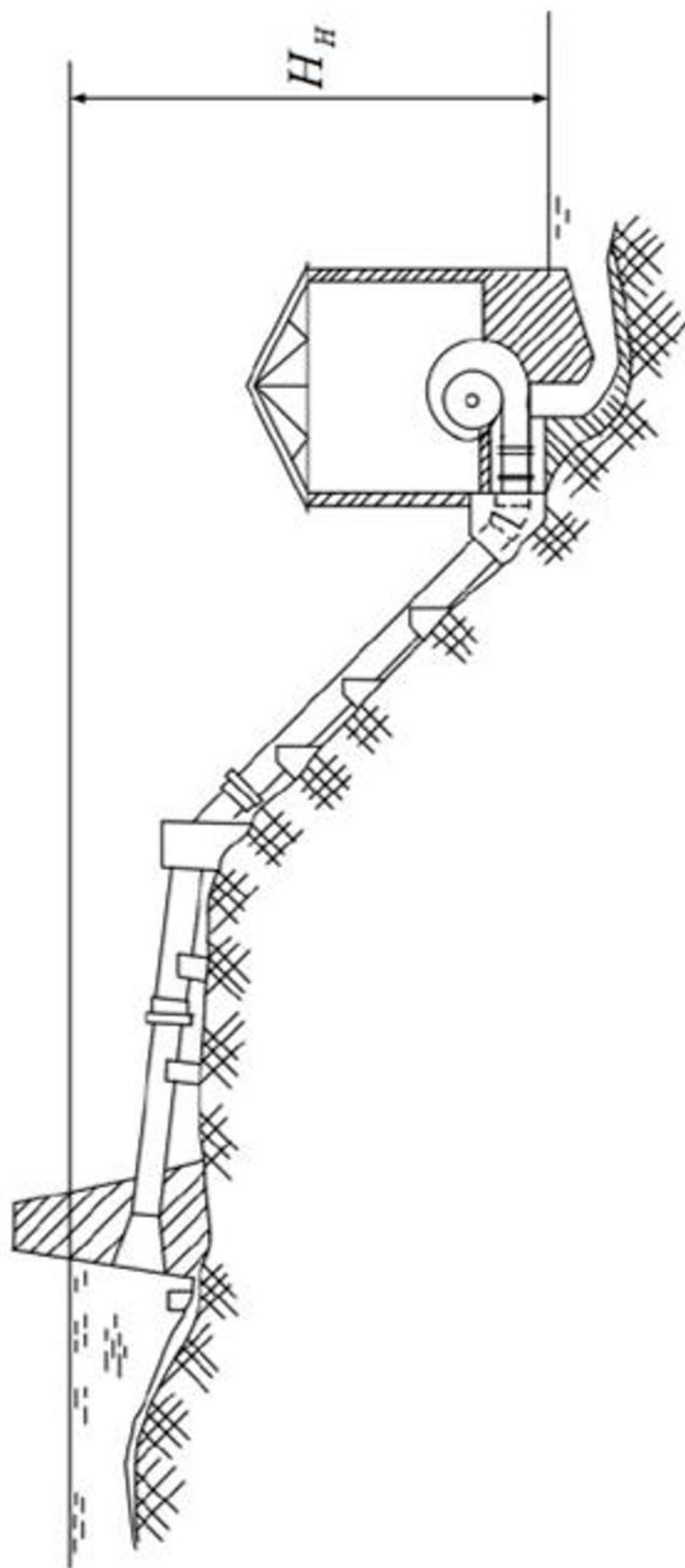
7. The necessity of daily regulation of the water level in the mini-hydroelectric power plant reservoir to cover the maximum load of the electric power system is substantiated. Such regulation will allow to reduce the active power generation of other power plants during hours of maximum electric load and improve their operation mode.
8. The feasibility of regulating the active power of a mini-hydroelectric power plant based on a multi-phase motor by changing the frequency of rotation of the power plant shaft is substantiated.
9. The mathematical description of a doubly-fed induction machine with a frequency converter in the rotor circuit as a control object is substantiated. For further research, an inertia-free model of the electromagnetic torque

vector control system of the TDM with a current source in the rotor circuit is adopted.

10. For the purpose of regulating active power by changing the number of revolutions, a radial-axial hydroturbine with a low speed coefficient is most suitable.
11. The angular velocity of the MPG generator as part of the GA will need to be adjusted in a range no wider than 1:2, due to the increasing decrease in the efficiency of the hydroturbine as its rotation frequency deviates from the main one.
12. The time constant of the MVU of the MPZ in terms of electromagnetic torque, and accordingly in terms of active power, for modern MVUs with high-power alternating current electric machines is from 0.005 to 0.02 sec .

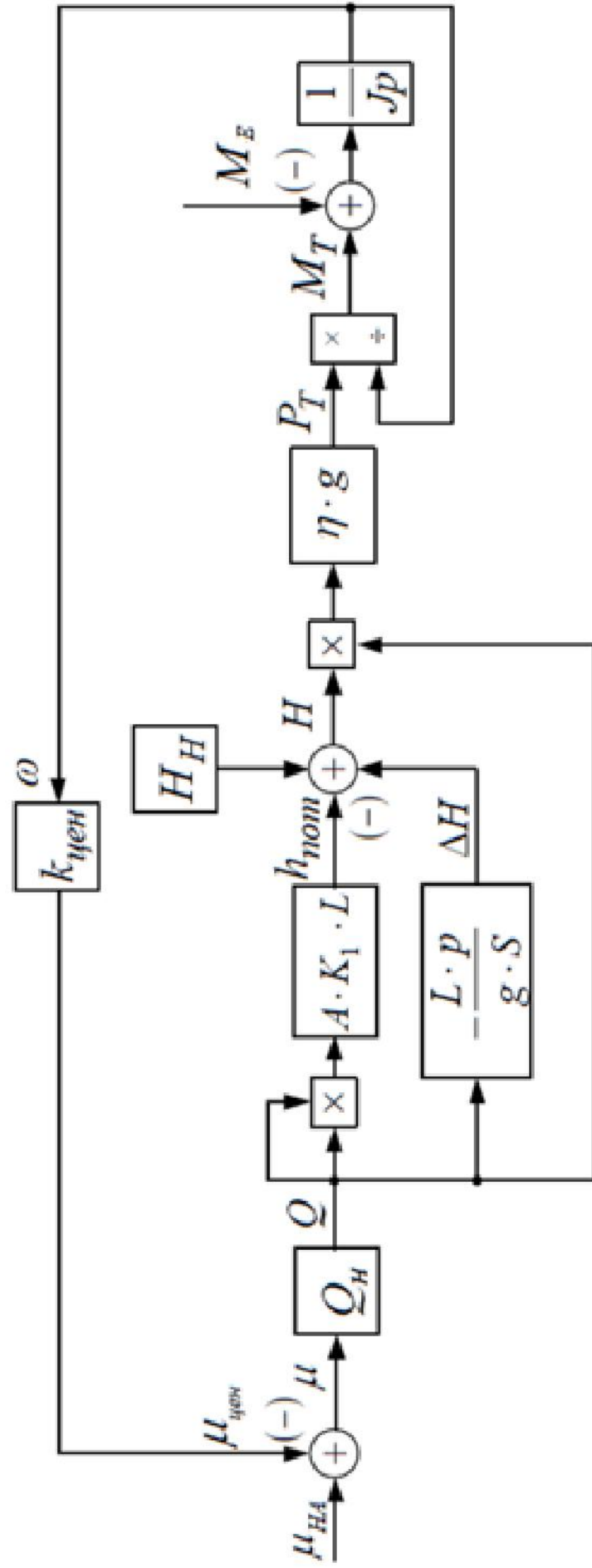
2

Технологічна схема міні-ГЕС



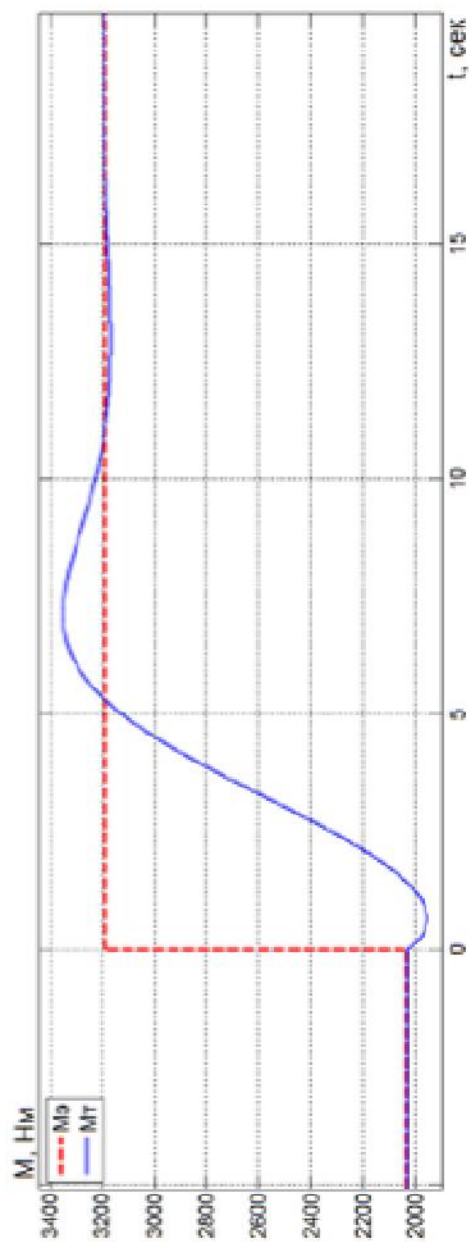
3

Структурна схема математичної моделі радіально-осьової гідротурбіни

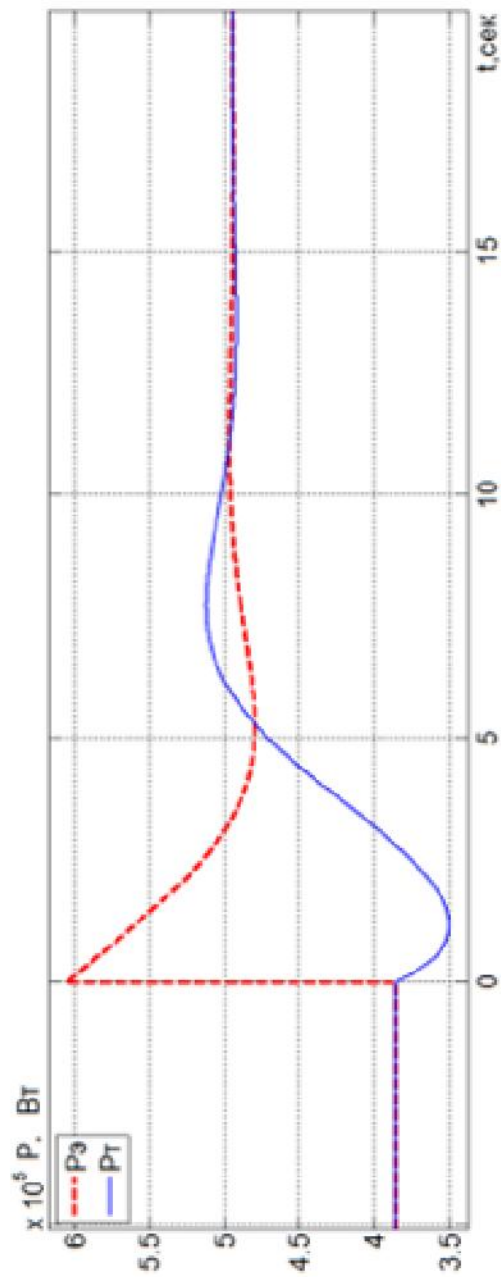


Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ

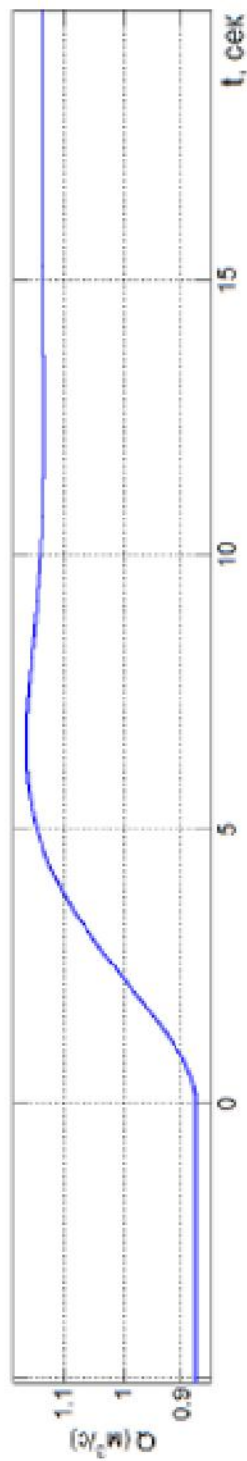
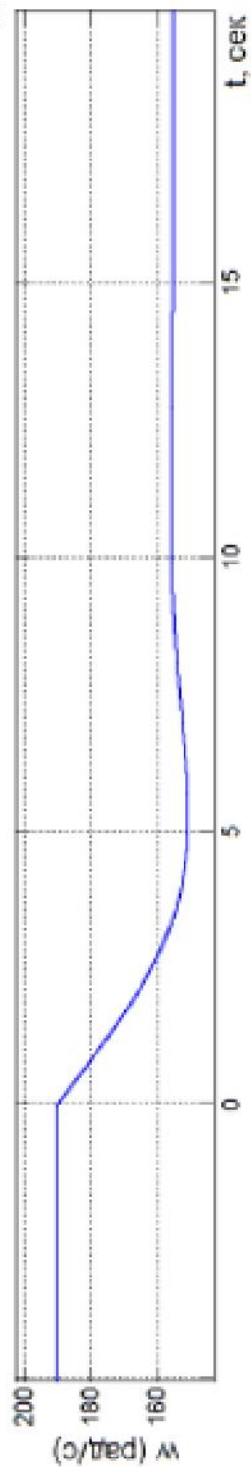
4



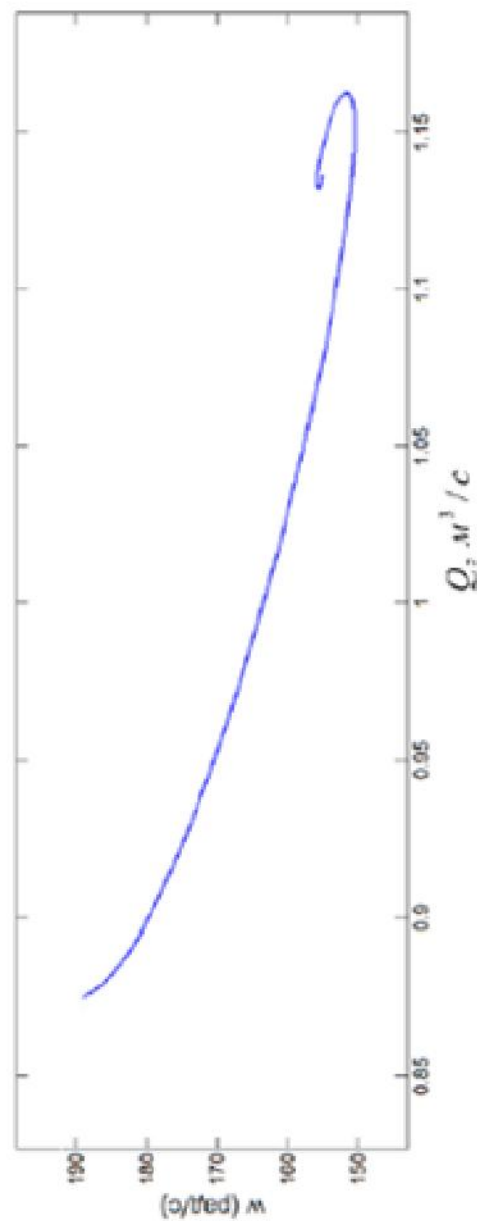
Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ



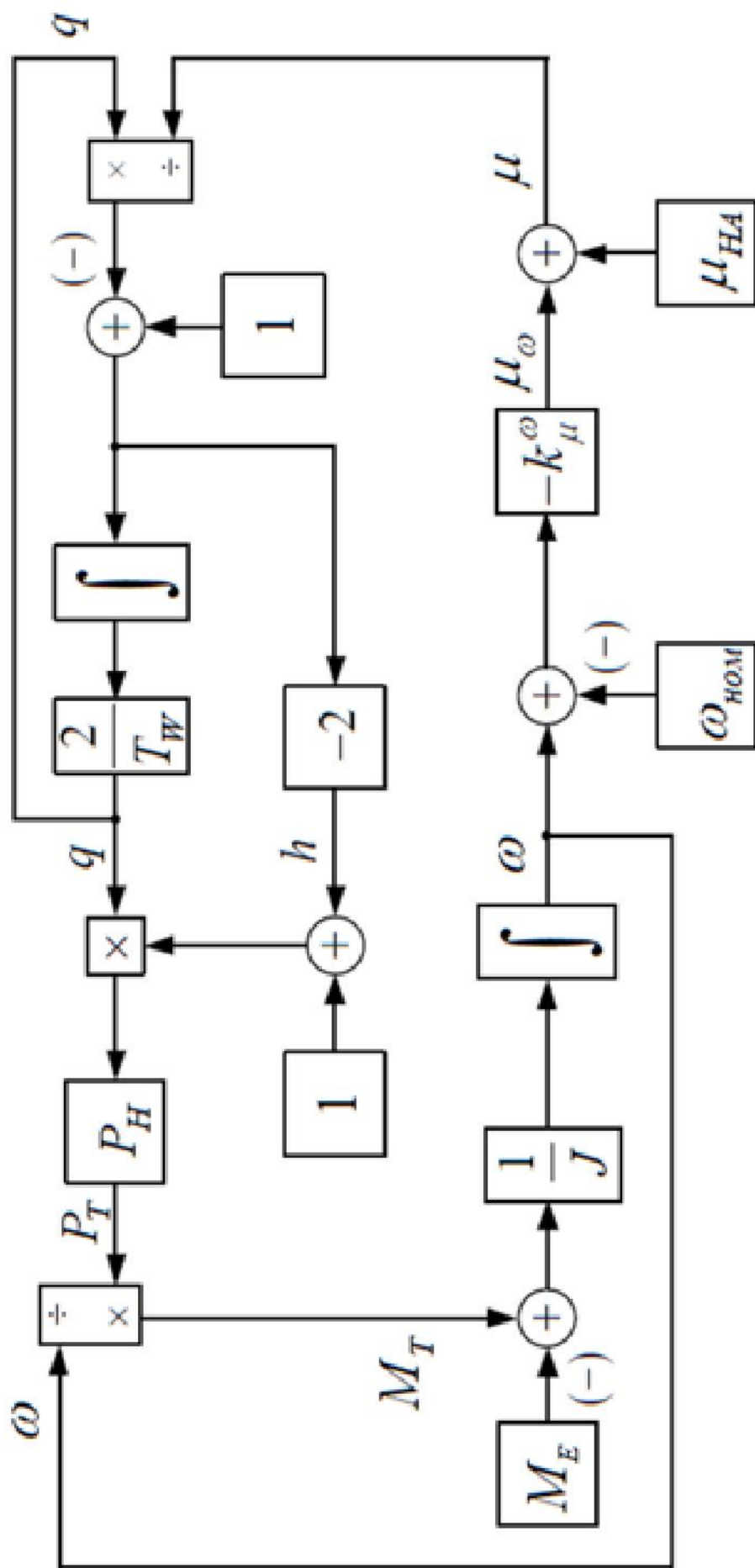
Перехідні процеси по кутовий швидкості валу і витраті води ГА 5



Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості валу ГА

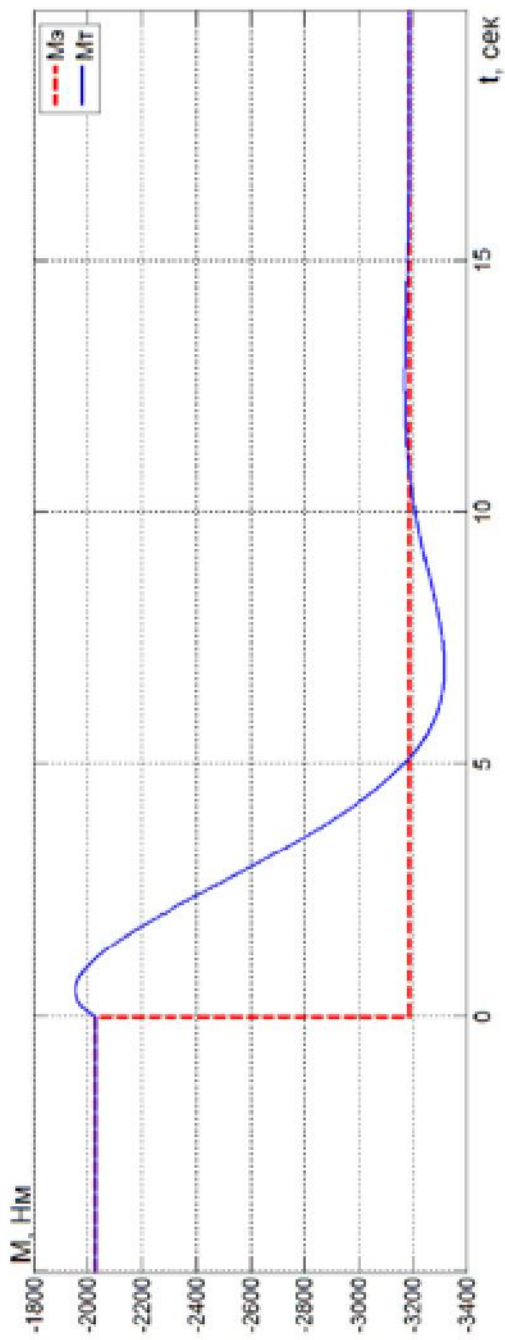


Математична модель РВ гідротурбіни з урахуванням
кінетичної енергії води в водогоні 6

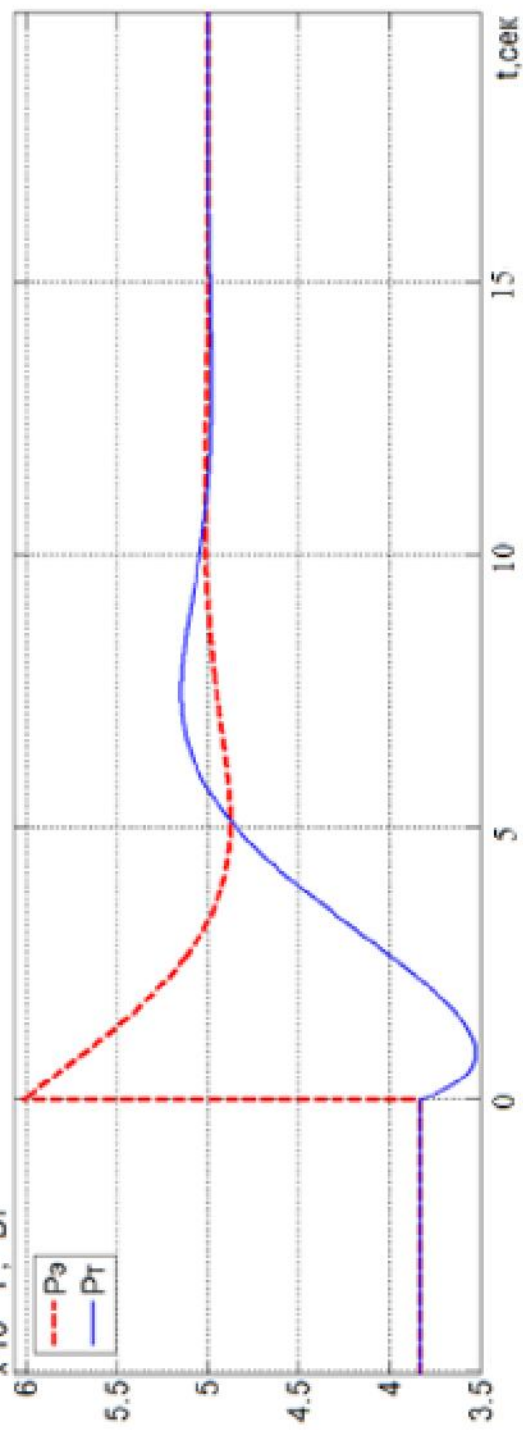


Перехідні процеси за моментом ГА на основі МПЖ

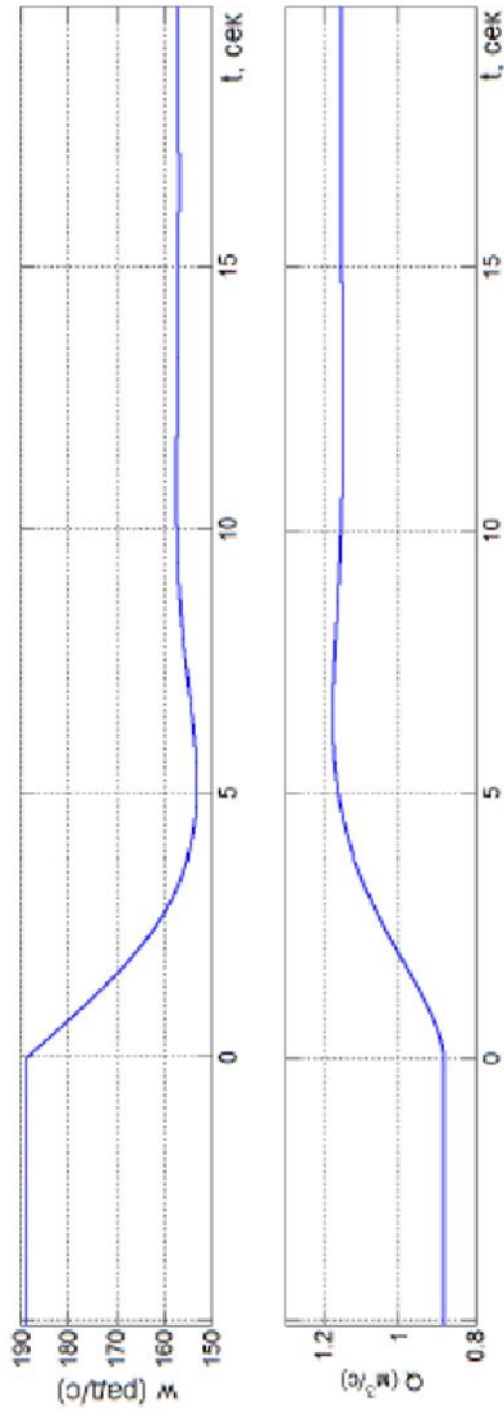
7



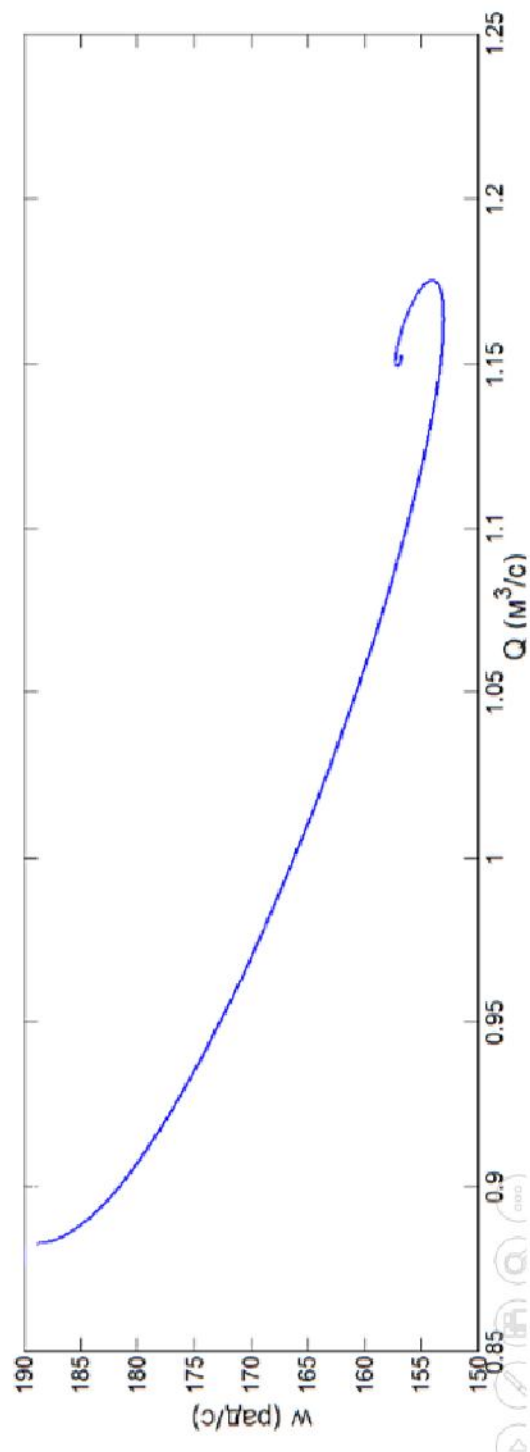
Перехідні процеси по активній потужності ГА на основі МПЖ



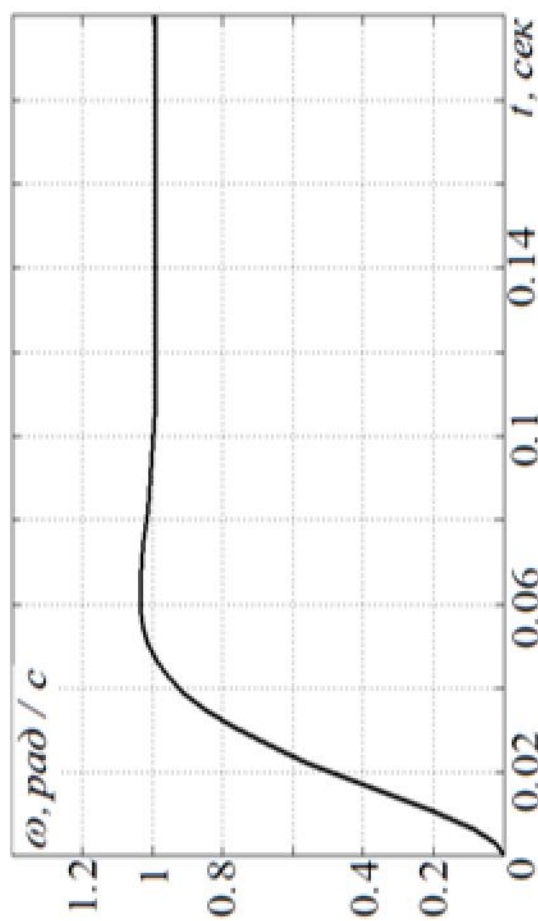
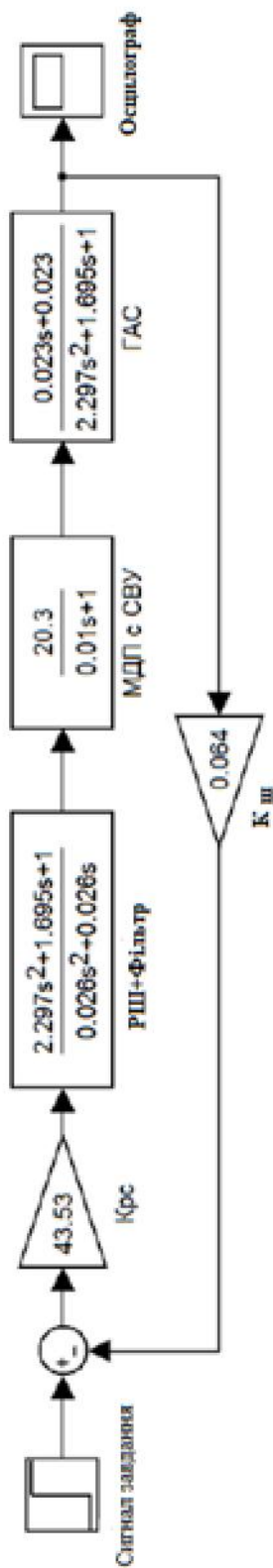
Перехідні процеси по кутовий швидкості вала і витраті води ГА 8



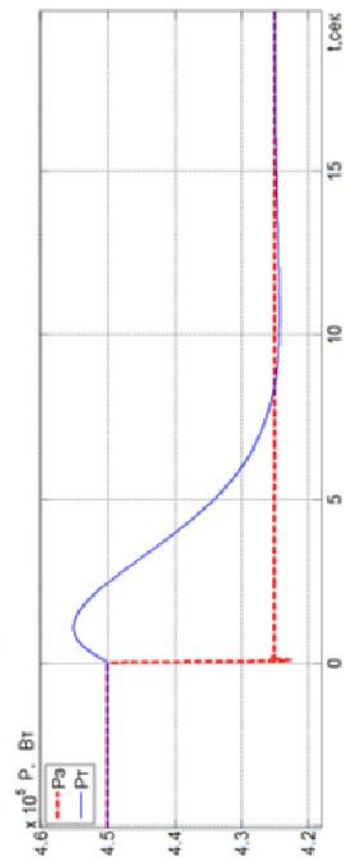
Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА



Математична модель контуру регулювання швидкості ГА на основі машини подвійного живлення 9

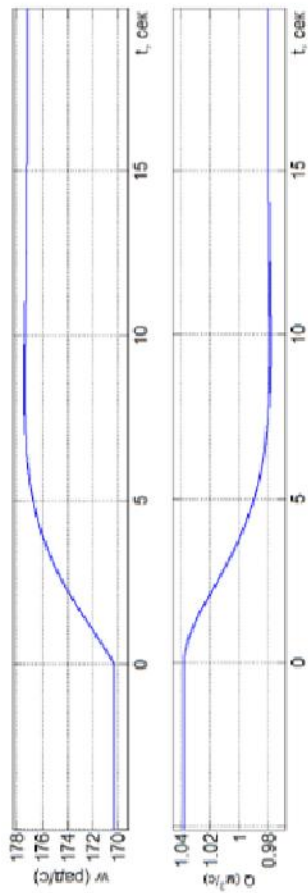


Перехідні процеси ГА на основі МПЖ по активній потужності



10

Перехідні процеси ГА по кутовій швидкості вала і витраті води



Динамічна залежність витрати води від кутової швидкості вала ГА

