

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СПРОЩЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ МІНІГЕС

© Мезеря А.Ю., Придворов С.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Мезеря Андрій Юрійович (Mezerya Andrey): ORCID: 0000-0003-2946-9593; e-mail: mezzera@ukr.net; Українська інженерно-педагогічна академія, кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Придворов Сергій Сергійович (Pridvorov Sergii): ORCID: 0009-0004-5164-4997; e-mail: spridv@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті наведено дослідження показників якості регулювання для повної та спрощеної математичної моделі гідроагрегату мініГЕС. Показана актуальність задачі подальшої оптимізації схем автоматики та структур мініГЕС в умовах дистанційного керування (без обслуговуючого персоналу). Розроблено математичну модель АСУТП, яка відповідає існуючій структурі та заснована на використанні системи інженерних та наукових розрахунків MATLAB. Базою при моделюванні перехідних процесів та аналізі роботи агрегатів мініГЕС використовувалась загальна структурна схема системи регулювання без аналізу її конструктивних форм. Модель для дослідження характеристик гідроагрегату, базується на схемі з оборотнім зв'язком. Елементи моделі представлені у вигляді передатних функцій. Виконано порівняльне моделювання спрощеної системи та системи, яка містить усі зв'язки. Для обох схем отримано параметри перехідних процесів по частоті обертання та обертаючому моменті. Наведено, що час перехідного процесу більше для спрощеної системи завдяки коливальному перехідному процесу, але перерегулювання частоти однакове для обох видів моделі для любых видів перехідних процесів (пуск, набір та скидання навантаження). Показано, що виконання моделювання при відсутності обмежень не має практичного сенсу та носить інформативний характер, що ставить задачу введення обмежень. Проведено порівняльне дослідження моделей з різними величинами постійної часу агрегату, яке показало, що перерегулювання збільшується для моделей з меншим значення постійної часу, але час перехідного процесу майже однаковий. Доведено, що система регулювання зі спрощеною моделлю в цілому стійка, але забезпечує перехідні процеси з коливаннями та може бути використана якщо не потребується високі якості регулювання.

Ключові слова: показники якості регулювання, системи керування, мініГЕС, енергозбереження, математичне моделювання.

Mezerya A., Pridvorov S. “Research of the quality indicators of the simplified automatic regulation system of a mini-HPP”

The article provides a study of regulation quality indicators for both complete and simplified mathematical model of a mini-HPP hydro unit. The relevance of further optimizing the automation schemes and structures of the mini-HPP under remote control conditions (without service personnel) is demonstrated. A mathematical model of the automated control system has been developed, reflecting the existing structure and based on the MATLAB system for engineering and scientific calculations. The general structural diagram of the control system, without analysis of its structural forms, was used as a basis for modeling transient processes and analyzing the operation of

mini-HPP units. The model for studying the characteristics of the hydraulic unit is based on a circuit with a reversible connection. Elements of the model are presented in the form of transfer functions. A comparative simulation of a simplified system and a system containing all connections was performed. For both schemes, parameters of transient processes in terms of rotation frequency and torque were obtained. It is shown that the transient time is longer for the simplified system due to the oscillating transient, but the frequency overshoot is the same for both types of models for any type of transients (start-up, loading, and unloading). It is demonstrated that modeling without restrictions does not have practical significance and is informative in nature, highlighting the need for introducing restrictions. A comparative study of models with different values of the unit's time constant was conducted, showing that overregulation increases for models with a smaller time constant, but the duration of the transition process remains almost the same. It is proven that the regulation system with a simplified model is generally stable but provides transient processes with oscillations and can be used if high-quality regulation is not required.

Keywords: quality indicators of regulation, control systems, mini-HPP, energy saving, mathematical modeling.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Статистична служба Європейського союзу (Eurostat) вважає, що Україна потенційно здатна виробляти з відновлюваних джерел не менше 74% від енергії, що виробляється в країні, тоді як зараз даний рівень становить близько 6%. [1]

На сучасних мініГЕС, так як і на ГЕС з гідроагрегатами великих потужностей, встановлені складні системи автоматичного управління та технологічної автоматики, які контролюють та регулюють понад 20 параметрів, та є дорогим обладнанням. Разом з тим, на мініГЕС немає потреби у контролі такої кількості параметрів через спрощені режими їхньої роботи.

Усе це веде до необгрунтованого збільшення капітальних витрат під час будівництва ГЕС і собівартості виробленої електроенергії.

Крім того, на даний час на ГЕС малої потужності працюють в основному аналогові системи автоматичного управління та системи технологічної автоматики на базі електромагнітних та електромеханічних реле, завдяки чому знижується надійність роботи станції.

Управління ГЕС малої потужності здійснюється обслуговуючим персоналом на щитах та пультах управління, які встановлені безпосередньо у машинному залі станцій, що також призводить до підвищення експлуатаційних витрат станції.

Для ГЕС малої потужності актуальним завданням є подальша оптимізація схем автоматики та структур енергоблоку, особливо в умовах дистанційного керування роботою станції. Це дає можливість зменшити вартість мініГЕС (завдяки спрощенню системи управління), зменшити чисельність обслуговуючого персоналу та дозволяє економити на побутових та виробничих приміщеннях. Таким чином, використання оптимальних систем автоматичного управління ГЕС малої потужності дасть Україні значний економічний зиск та забезпечить широке поширення ГЕС малої потужності з метою більш ефективного використання відновлюваних джерел енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки у всьому світі стали більше уваги приділяти розвитку установок перетворення відновлюваних видів енергії в електроенергію, децентралізації та створенню самозабезпечених енергорайонів. При цьому аварії, катастрофічні за економічними збитками і навіть небезпечні з точки зору обороноздатності країни, при землетрусах стають лише

локальними наслідками. Відновлюються сотні раніше необґрунтовано занедбаних мініГЕС та будуються нові на гідротехнічних спорудах об'єктів неенергетичного призначення.

У зв'язку з цим, актуальність та важливість використання мініГЕС відображено у нормативному акті України [2]. Дослідження цього питання досить докладно висвітлено у літературі [3-15]. Існуючі дослідження водного потенціалу для мініГЕС [7] показали великий потенціал і можливу суттєву економію енергії. Реальні перспективи використання мініГЕС відбито у [3, 12, 13], які експлуатаційні характеристики [5]. Проведено дослідження питань як будівництва нових станцій [4], так і модернізації існуючих [6]. Розглянуто питання використання мініГЕС у геотермальних установках [9], проведено дослідження раціонального вибору типу генераторів [14]. Також увага приділяється стандартизації гідроелектростанцій [8, 10, 15] та моделювання гідроагрегатів [11].

Нині у світі інтенсивно будуються мініГЕС, особливо у КНР, Індонезії, Малайзії, державах Південної Америки та Африки. У світі працює вже понад 150 000 мініГЕС, а в перспективі можливості набагато більші. У зв'язку з цим розробляються заходи щодо зниження капітальних витрат, особливо здешевлення силового устаткування, оскільки у вартості вартості устаткування на мініГЕС доходить до 40-60% [3, 6].

Незважаючи на успішне вирішення низки важливих завдань у цьому напрямку, не до кінця вирішеними залишаються завдання експлуатації мініГЕС без обслуговуючого персоналу з використанням спрощеної системи регулювання, що забезпечує при цьому необхідні показники якості регулювання. Дослідженню цього питання та присвячена ЦЯ робота.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою даної є дослідження показників якості спрощеної системи регулювання гідроагрегатами мініГЕС для їх управління без обслуговуючого персоналу.

Виклад основного матеріалу

На цей час склалася структура АСУТП мініГЕС і успішно застосовується на практиці. Особливості сучасної АСУТП пов'язані з використанням мікропроцесорної техніки та сучасних виконавчих елементів.

У цій роботі розроблена математична модель АСУТП, що відповідає встановленій структурі і заснована на використанні широко застосовуваної в даний час системи інженерних і наукових розрахунків MATLAB. Система MATLAB використана для виконання процесу моделювання та дослідження характеристик та особливостей роботи математичної моделі АСУТП.

Структура та характеристики елементів математичної моделі АСУТП

Незважаючи на велику різноманітність конструкцій елементів автоматичного регулятора гідроагрегатів (АРТ), принципові схеми пристроїв регулювання, так само як і їх склад ланок є досить однотипними. Це дає можливість при моделюванні перехідних процесів та аналіз роботи агрегатів ГЕС базуватися на загальній структурній схемі системи регулювання та характеристиках основних її ланок, не торкаючись їх конструктивної форми.

Структурна схема типового автоматичного регулятора турбіни, що широко застосовується, наведена на рис. 1. Основними її складовими ланками є: чутливий елемент 1, що сприймає відключення частоти обертання агрегату φ , суматор впливів Σ , підсилювач 3, обмежувач відкриття 4, сервомотор 5, що визначає вихідну величину регулятора відкриття турбіни α . Є ще дві ланки зворотний зв'язок: постійний статизм 6 і тимчасовий статизм – изодром 7, і навіть ланка впливу прискорення обертання агрегату 2. По характеристикам і рівнянням ланок структурної схеми визначаються залежність між вхідний і вихідний величинами АРТ, що його впливом геть перехідний процес.

У цій структурній схемі не враховується фізична природа кожної ланки, а розглядаються лише показники у відносних величинах. Базовою величиною прийнято вплив чутливого елемента частоти обертання η , пропорційне відхилення частоти агрегату від заданого значення. Такий підхід до розгляду структури АРТ є універсальним, що суттєво спрощує його подання та дослідження без втрати фізичного змісту.

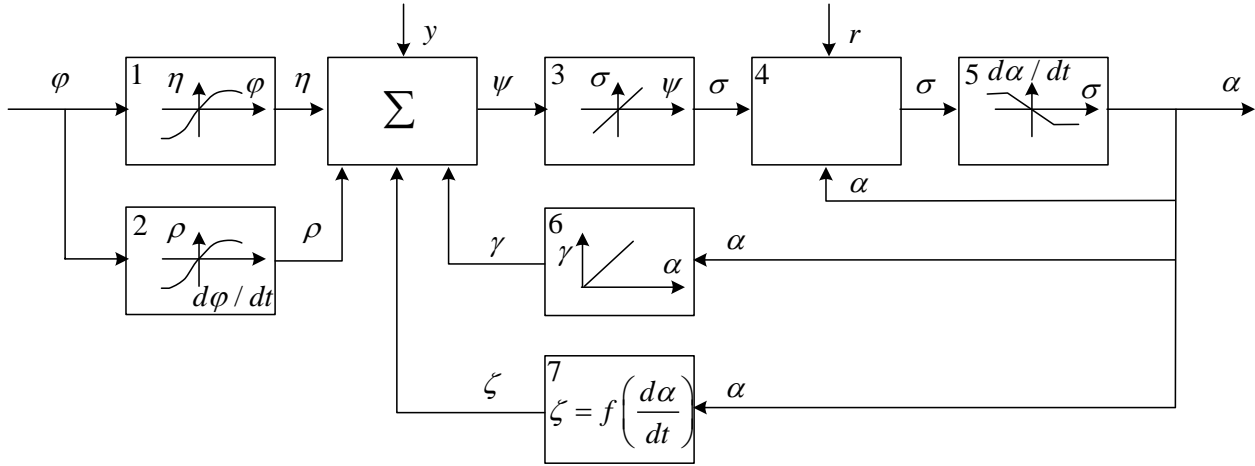


Рис. 1 – Типова структурна схема АРТ

Характеристики елементів АРТ такі.

Чутливий елемент

Чутливий елемент вимірює відхилення частоти агрегату від заданого значення і момент розглядається як пропорційна ланка, яка відповідає співвідношенню:

$$\eta = \varphi$$

на лінійній ділянці показники. У той самий час зона дії чутливого елемента має обмеження (як ділянки насичення), що визначається співвідношенням:

$$\varphi \geq \varphi_{\text{нас}}, \quad \eta = \eta_{\text{нас}}$$

Для електрогідравлічного типу чутливий елемент має наступний показник $\varphi_{\text{нас}} = 0,03 \div 0,05$ (у відносному вираженні).

Суматор

На суматор надходять такі сигнали:

- сигнал чутливого елемента η , пропорційний відхилення частоти агрегату від заданого значення;
- стабілізуючі сигнали – статизм γ , ізодромний сигнал ζ , вплив на прискорення частоти обертання;
- керуючий сигнал y , що викликає усунення статичної характеристики АРТ.

На виході суматора формується загальний регулюючий вплив φ , що дорівнює:

$$\psi = \eta + \gamma + \zeta + \rho + y$$

Підсилювач-перетворювач

Підсилювач-перетворювач формує сигнал переміщення головного золотника. Працює як пропорційна ланка:

$$\sigma = \psi$$

При $\alpha < \alpha_2$ сигнал проходить через ланку обмеження 4 без зміни. При $\alpha \geq \alpha_2$ настає обмеження сигналу σ . Сигнал σ викликає рух сервомотора, тобто зміна відкриття гідротурбіни α .

Сервомотор

Сервомотор є інтегруючою ланкою. Залежність між зміною відкриття і зміщенням головного золотника має наступний характер:

$$\frac{d\alpha}{dt} = f_c(\sigma)$$

або

$$\alpha = \int f_c(\sigma) \cdot dt + \alpha_0$$

Знак $\frac{d\alpha}{dt}$ обернений знак σ . При позитивному значенні σ $\frac{d\alpha}{dt} < 0$ сервомотор рухається на закриття турбіни. Крім того, характеристика сервомотора складається із трьох зон: Зона нечутливості при $\sigma < \sigma_{\text{нас}}$, $\frac{d\alpha}{dt} = \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{\text{пр}}$ (має місце гранична швидкість на відкриття та закриття золотника);

Зони граничних швидкостей на відкриття та закриття можуть мати різне значення перехідного процесу (тобто від величини гідравлічного удару)

$$\left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{\text{пр.відк.}} \neq \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{\text{пр.зак.}}$$

Загальний вигляд характеристики сервомотор показано на рис 2.

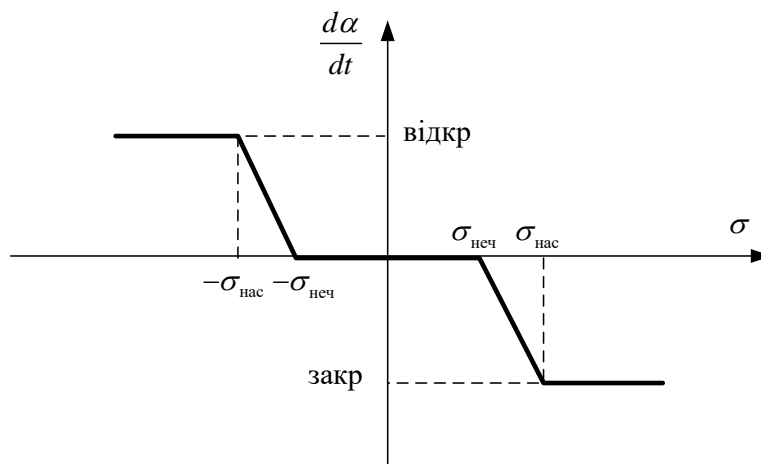


Рис. 2 – Загальний вигляд характеристики сервомотору

У сучасних регуляторах величини нечутливості $\sigma_{\text{насч}}$ та насичення $\sigma_{\text{нас}}$ мають такі значення:

$$\sigma_{\text{насч}} = \pm 0,0001 \div 0,00015,$$

$$\sigma_{\text{нас}} = 0,02 \div 0,05$$

За відхиленням частоти φ нечутливість не перевищує значення $\pm 0,01 \div 0,015 \%$, що знаходиться в межах допустимого. Таким чином, наближена характеристика сервомотора має вигляд:

$$T_{s1} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = -\sigma,$$

де T_{s1} – постійна часу сервомотора, що визначає нахил його характеристики. При цьому нехтуємо величиною зони нечутливості. Діапазон значень величини T_{s1} може бути визначений за відомим часом повного ходу сервомотора $T_{серв}$ від $\alpha=1$ до $\alpha=0$ залежно:

$$T_{серв} = \frac{1}{d\alpha/dt} = \frac{T_{s1}}{\sigma}.$$

Величина T_{s1} є важливим показником роботи сервомоторів. Іншим важливим показником роботи сервомотора є граничний час сервомотора T_s , що визначається співвідношенням:

$$T_s = \frac{1}{|d\alpha/dt|_{\text{пр}}}$$

і час повного ходу сервомотора, що дає, якщо

$$\sigma \geq \sigma_{\text{нас}}.$$

Ланки, що забезпечують стабілізацію системи

Цими ланками є: ланка 6 (статизм системи), ланка 7 (ізодром), ланка 2 (вплив на прискорення), ланка 4 (обмежувач відкриття).

Ланка «статизм»

Статична характеристика АРТ дає зв'язок між частотою обертання агрегату і величиною відкриття α в режимі, що встановився, відповідному рівнянню:

$$\varphi + \gamma + y = 0.$$

Рівняння цієї ланки:

$$\gamma = \varphi_{\text{ост}} \cdot \alpha.$$

Коефіцієнт $\varphi_{\text{ост}}$ можна приймати рівним:

$$\varphi_{\text{ост}} = 0 \div (0,04 \div 0,06).$$

При $\varphi = 0$ регулятор має астатичне налаштування.

Ізодром

Рівняння ідеального ізодрому має вигляд:

$$T_i \frac{d\zeta}{dt} + \zeta = \delta \cdot T_i \frac{d\alpha}{dt},$$

де T_i – Постійна часу ізодрому,

δ – тимчасовий статизм.

При $T_i=2$ рівняння ізодрому набуває вигляду:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \delta \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad \text{або} \quad \zeta = \delta \cdot \frac{d\alpha}{dt}.$$

У цьому випадку ізодром перетворюється на статичну ланку та величина δ еквівалентна нерівномірності, що залишається.

За наявності початкового збурення ζ_0 і $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ рівняння ізодрому набуває вигляду:

$$T_i \frac{d\zeta}{dt} + \zeta = 0$$

і має рішення

$$\zeta = \zeta_0 \cdot e^{-t/T_i}$$

Реальна характеристика ізодрому істотно нелінійна і визначається так званим «вільним ходом» (при $\left| \frac{d\zeta}{dt} \right| < \left| \frac{d\zeta}{dt} \right|_{\min}$, $\zeta = 0$, що характерно для гідравлічних ізодромів і практично відсутня для електричних) та зоною насичення.

$$|\zeta| \leq |\zeta|_{\text{нас}}$$

З урахуванням сказаного приймаємо характеристику ізодрому лінійної, що має обмеження у вигляді насичення. Налаштування ізодромів зазвичай знаходяться в таких межах:

- тимчасовий статизм $\delta = 0,15 \div 1$;

- Постійна часу $T_i = 2 \div 12$ с.

На початку передачі сигналу від зміщення сервомотора до АРТ можлива наявність люфту, величина якого повинна бути зведена до мінімуму.

Вплив по прискоренню агрегату

Цей блок АРТ є стабілізуючим та сприяє підвищенню швидкодії. Рівняння ідеальної ланки впливу прискорення має вигляд:

$$\rho = T_\rho \frac{d\varphi}{dt}$$

У діапазоні прискорення $\frac{d\varphi}{dt}$, що відповідає реальним умовам можливе створення такої ланки. Багато АРТ це ланка немає, так як стабілізація системи переважно здійснюється ізодромом.

Обмежувач відкриття.

Ця ланка пов'язує три величини: сигнали зміщень золотника $\sigma_{\text{вх}}$, $\sigma_{\text{вих}}$ та відкриття α .

Рівняння ланки:

$$\alpha < \alpha_2; \sigma_{\text{вх}} = \sigma_{\text{вих}} ;$$

$$\alpha < \alpha_2; \sigma_{\text{вих}} \geq 0$$

Найбільш поширена схема АРТ є схема, зворотний зв'язок якої здійснюється від основного сервомотора турбіни. Модель для дослідження характеристик гідрогенератора, керованого від АРТ, базується на розглянутому регуляторі. Характеристики елементів такої системи досліджені за допомогою програмної системи MATLAB, що широко застосовується для подібних цілей. Елементи моделі представлені як передатних функцій. Параметри моделі та її елементів визначено у відносних одиницях.

Структура системи керування гідроагрегатом (СКГ)

Для формування повної моделі системи необхідно включити генератор (агрегат) до зворотного зв'язку АРТ, що показано на рис. 3. При цьому агрегат підключений до енергосистеми як джерело енергії, а енергосистема – як приймач.

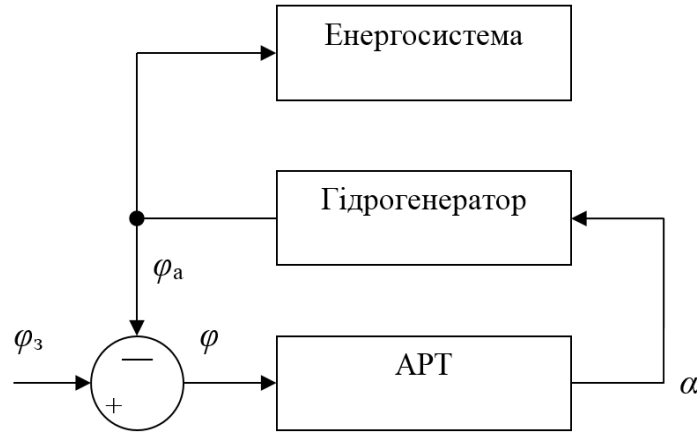


Рис. 3 – Структура системи керування гідроагрегатом

Тут прийняті такі позначення:

$\varphi_з$ – задана частота мережі (50 Гц);

φ_a – частота електроенергії, що виробляється агрегатом;

φ – відхилення частоти агрегату від заданого значення ($\varphi = \varphi_з - \varphi_a$);

α – відкриття головного золотника;

Система керування є статичною.

Передавальні функції елементів СКГ та розрахунок їх параметрів

Як згадувалося вище параметри моделі (крім часових показників) визначаються у відносних одиницях. Визначимо вид та параметри передавальних функцій елементів системи.

Агрегат

Передатна функція агрегату $W_a(P)$ у загальному вигляді визначається із відомого рівняння руху механічної системи [16]:

$$T_a \dot{\varphi} = m - m_a,$$

де T_a – постійна часу агрегату, с;

$\dot{\varphi}$ – похідна за часом від частоти обертання агрегату;

m, m_a – повний момент турбіни та момент генератора;

P – оператор перетворення Лапласа.

Передатна функція $W_a(P)$ має вигляд:

$$W_a(P) = \frac{K_a}{T_a \cdot P},$$

де K_a – коефіцієнти передачі агрегату:

$$K_a = \frac{\varphi}{m}.$$

Визначення точної величини K_a важко, тому що вона залежить від цілого ряду параметрів роботи гідротурбіни та від їх обліку (натиск, "жорсткий", "пружний" удари і т.д.). У той же час для отримання хоча б приблизного значення цієї величини можна скористатися існуючою методикою, де наведено сімейство залежностей $\varphi = f(m)$ для різних значень параметра α . Для $\alpha \approx 0,2$ отримаємо:

$$K_a = \frac{-0,8}{0,2} = -4$$

Відповідно передавальна функція $W_a(P)$ набуде наступного вигляду:

$$W_a(P) = -\frac{4}{T_a \rho}$$

Якщо прийняти $T_a = 10\text{с}$ (гідроагрегат потужністю 115000 кВт) отримаємо:

$$W_a(P) = -\frac{0,4}{T_a \rho}$$

При $T_a = 5\text{с}$:

$$W_a(P) = -\frac{0,8}{T_a \rho}$$

Чутливий елемент

Чутливий елемент є пропорційною ланкою з попереднім значенням коефіцієнта передачі, що дорівнює 1 і з рівнем обмеження по виходу, рівним $\varphi_{\text{нас}} = 0,03 \div 0,05$. При цьому виділення сигналу φ відхилення частоти агрегату від заданого значення $\varphi = \varphi_z - \varphi_a$ перед чутливим елементом увімкнено вузол порівняння. Таким чином, попередні параметри чутливого елемента наступні:

$$K_{re} = 1; \varphi_{\text{нас}} = 0,03 \div 0,05$$

Надалі при моделюванні перехідних процесів можлива зміна попередніх параметрів, що стосується всіх елементів моделі. Це необхідно при дослідженні та налаштуванні параметрів моделі.

Суматор

Суматор також є пропорційним елементом із коефіцієнтом передачі K_Σ

$$K_\Sigma = 1$$

та без зони обмеження. Суматор представлений у моделі у вигляді елемента порівняння, що підсумовує всі сигнали, що надходять на нього.

Підсилювач-перетворювач

Є пропорційною ланкою з попереднім значенням коефіцієнта передачі $K_{уп}$

$$K_{уп} = 1$$

та з обмеженням по виходу, прийнятим за величиною $\psi_{\text{нас}} = \pm 1$.

Сервомотор

Є інтегруючою ланкою з постійного часу T_s , коефіцієнтом передачі K_s . Якщо нехтувати зоною нечутливості, що становить $\sigma_{\text{нер}} = \pm(0,01 \div 0,015)\%$, отримаємо:

$$K_s = 1$$

із зоною обмеження $\sigma_{\text{нас}} = \pm 0,02 \div 0,05$.

За такого підходу передатна функція сервомотора має вираз:

$$W_s(P) = \frac{K_s}{T_s P}$$

У разі виконання підсилювача сервомотора з жорстким зворотним зв'язком сервомотор може бути представлений як аперіодична ланка:

$$W_s(P) = \frac{K_s}{T_s P + 1}$$

При моделюванні необхідно перевірити ці два уявлення сервомотора.

Ланки, що забезпечують стабілізацію системи

Тут розглянуті передатні функції ланок: «статизм», ізодром, прискорення агрегату, обмеження відкриття.

Ланка «статизм».

Ця ланка пропорційна з коефіцієнтом $K_{\text{ст}}$:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\gamma}{\alpha} = \gamma_{\text{ост}}$$

Розмір цього коефіцієнта перебуває у межах:

$$K_{\text{ст}} = 0,04 \div 0,06$$

Цей зворотний зв'язок є негативним.

Ізодром.

Передаточна функція ланки може бути подана у вигляді:

$$W_i(P) = \frac{T_i P}{T_i P + 1}$$

Цей зворотний зв'язок є негативним.

Прискорення.

Передаточна функція ланки може бути подана у вигляді:

$$W_y(P) = \frac{T_y P}{T_y P + 1}$$

Як диференціююча ланка першого порядку.

Цей зв'язок у схемі моделі є позитивним.

Обмежувач відкриття.

Ця ланка не внесено в модель системи у зв'язку з тим, що вона виконує практично ті ж функції, що й вузол обмеження в самому сервомоторному блоці. Основні міркування щодо вибору параметрів даної ланки викладені у попередньому розділі і, у разі потреби, вона може бути внесена до досліджуваної моделі.

Математична модель системи СКГ та її дослідження

Відповідно до структурної схеми СКГ складено її математичну модель, наведену на рис. 4. Параметри елементів моделі вибрані у попередніх розділах звіту та представлені у відносних одиницях. Тут же відмічені основні елементи моделі:

- А – задатчик еталонної частоти гідроагрегату;
- В – вузол порівняння еталонної частоти та її дійсного значення (на виході вузла формується відхилення дійсного значення частоти від її еталонного значення φ);
- С – чутливий елемент (пропорційна ланка з обмеженням);
- D – задатчик статизму системи;
- E – суматор;
- F – підсилювач-перетворювач (з обмеженням);
- G – сервомотор ($T_s = 1,6\text{с}$, $K_s = 1$);
- H – ланка «статизм» ($K_c = 0,1$);
- I – ізодром ($T_i = 2\text{с}$);
- J – ланка прискорення ($T_y = 5\text{с}$);
- K – гідроагрегат ($K_a = -4$, $T_a = 10\text{с}$);
- L – суматор моментів агрегату та навантаження;
- M, N – масштабні коефіцієнти процесів φ^* та M^* ;
- O – елемент індикації (змішувач та дисплей);
- P – елементи моделювання навантаження.

Надалі для дослідження моделі змінювалися окремі параметри моделі, що відбивалося на досліджуваній схемою моделі і відповідних їй перехідних процесах. Наведена модель відображає керування агрегатом, що має постійну часу $T_a = 10\text{с}$. На індикацію перехідних процесів виведено процеси $\varphi^*(t)$ та $M^*(t)$. Дана модель формує у зазначеній послідовності наступні перехідні процеси: пуск агрегату вхолосту, начерк навантаження $\Delta M = +0,25$, начерк навантаження $\Delta M = +0,5$, скидання навантаження $\Delta M = -0,75$ до холостого ходу.

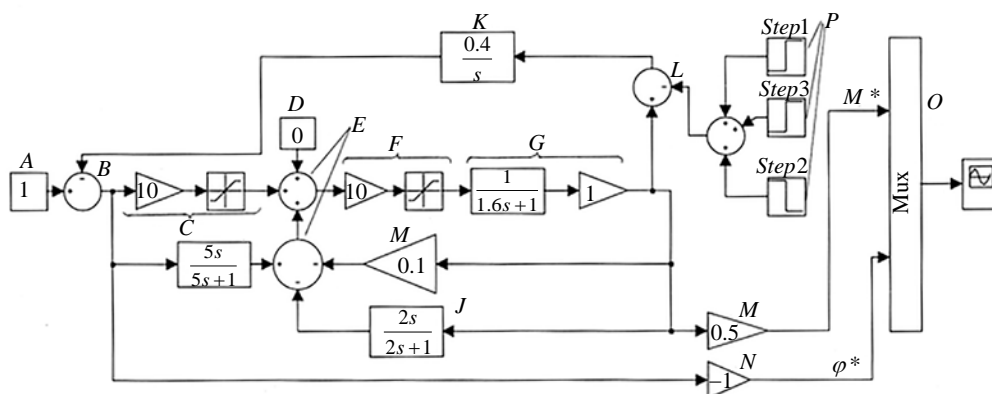


Рис. 4 – Математична модель СКГ

На рис. 5 для якісної ілюстрації (без кількісного аналізу) наведено ці перехідні процеси. Надалі при моделюванні СКГ використовується саме ця модель, що реалізує зазначені вище режими роботи.

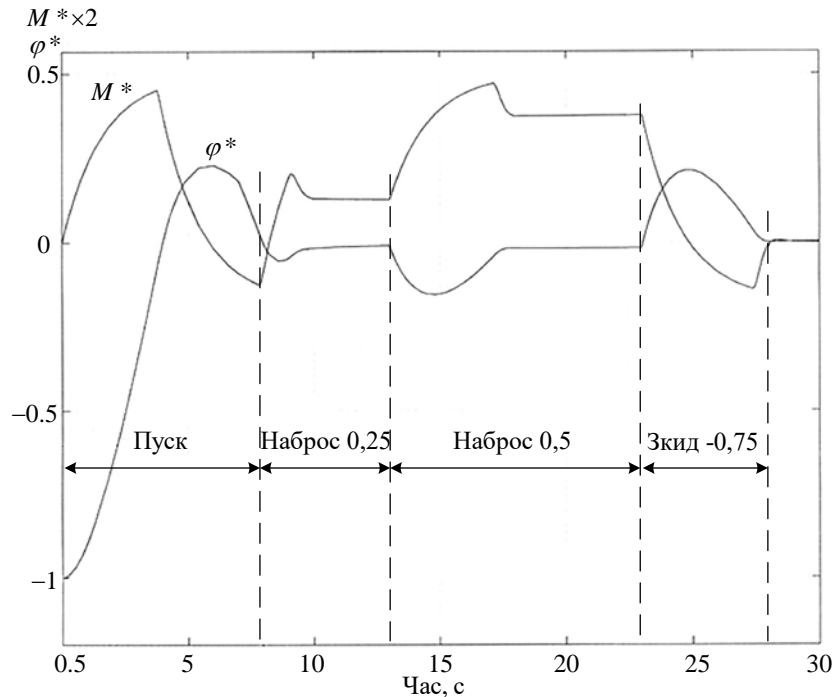


Рис. 5 – Перехідні процеси $\varphi^*(t)$, $M^*(t)$ пуску вхолосту, накидання навантаження +0, скидання навантаження 0 до холостого ходу

Моделювання СКГ

Метою моделювання є дослідження поведінки системи в перехідних процесах, особливо при скиданні навантаження з боку енергосистеми. Цікавим є також поведінка СКГ у спрощеному уявленні, наприклад, за відсутності окремих її елементів. Для дослідження взято систему, у якій відсутній ізодромний зворотний зв'язок, а також попереджувальний диференціюючий зв'язок. У зв'язку з цим виконано порівняльне моделювання спрощеної системи та системи, що містить всі зв'язки. Досліджувана модель таким чином складається з двох зазначених частин, що виконують паралельно описану вище послідовність режимів (пуск, двоповерховий накид навантаження +0,5 і +0,5 і повне скидання навантаження -1,0 до холостого ходу).

На рис. 6 представлені результати досліджень, що містять основні відомості параметрів перехідних процесів (перерегулювання за частотою $\varphi^*(t)$ та моментом $M^*(t)$ у відносних одиницях, час перехідного процесу у с.).

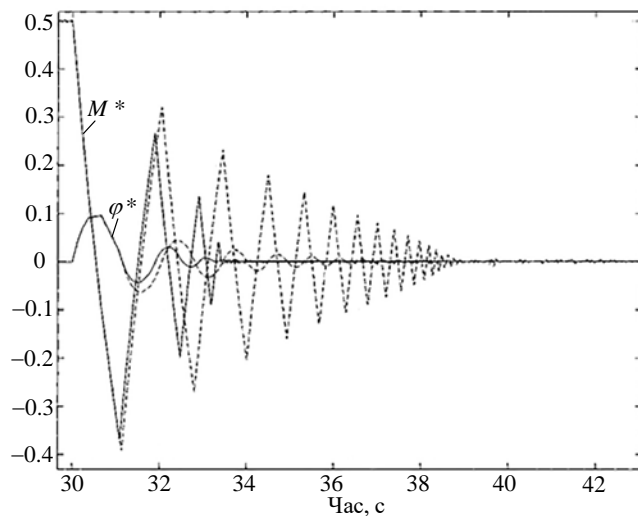


Рис. 6 – Перехідні процеси $\varphi^*(t)$ та $M^*(t)$ для повної та спрощеної системи регулювання

Висновки

Дослідження показників якості регулювання для повної та спрощеної математичної моделі гідроагрегату мініГЕС дозволяє зробити наступні висновки:

Перерегулювання частоти Δf^* однаково для обох видів моделі кожного виду перехідного процесу (пуск, накид навантаження, скидання навантаження) за наявності елементів обмеження. Відрізняється лише час перехідного процесу – він більший (приблизно вдвічі) для спрощеної моделі (відсутня ізодромний зворотний зв'язок) завдяки коливальному загасаючому перехідному процесу $\varphi^*(t)$.

Виконання моделювання за відсутності обмеження немає практичного значення (бо всім реально існуючих елементів моделі завжди має місце обмеження). Ця процедура має швидше інформативний характер, ілюструючи можливості практично повної компенсації динамічних помилок при перехідному процесі.

Отже, регулюючи рівень обмеження, можна значно знизити динамічну помилку при перехідних процесах. Необхідне введення обмеження у модель.

Порівняльне дослідження моделей з різними величинами постійної часу агрегату T_a (10с та 5с) показує збільшення перерегулювання Δf^* для моделі з меншим значенням величини T_a за приблизно однакових часів перехідного процесу.

Дослідження спрощеної моделі (без гнучкого зв'язку) показали, що система в цілому стійка, хоча забезпечує перехідні процеси з загасаючими коливаннями і, отже, може застосовуватися за певних умов, коли не потрібна висока якість регулювання.

Список використаних джерел:

1. Україна потенційно здатна виробляти 74% електроенергії з відновлюваних джерел [Електронний ресурс] // Eurostat. – Режим доступу : <https://itc.ua/news/eurostat-ukraina-potensialno-sposobna-proizvodit-74-elektroenergii-iz-vozbnovlyuemyih-istochnikov/> (дата звернення 21.05.24)
2. Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії із альтернативних джерел енергії [Електронний ресурс] : Закон України № 514-19 ред. від 01.07.2019. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/514-19#Text> (дата звернення 21.05.24)
3. Нікіторович О. В. Малі гідроелектростанції України: минуле, сучасне, майбутнє [Електронний ресурс] / О. В. Нікіторович. – Режим доступу : https://niss.gov.ua/sites/default/files/2014-06/0620_pres3.pdf (дата звернення 21.05.24)
4. Будівництво малих гідроелектростанцій на Західних Балканах [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://bankwatch.org/blog/stroitelstvo-malykh-gidroelektrostantsii-na-zapadnykh-balkanakh?lang=ua> (дата звернення 21.05.24)
5. Міні-гідроелектростанції: характеристики та особливості [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://hydromarket.com.ua/ua/a480494-mini-gidrostantsii-harakteristiki.html> (дата звернення 21.05.24)
6. Проектування будівництва мікро, малих та міні ГЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://mcl.kiev.ua/proektirovanie-stroitelstva-mikro-mini-i-malyh-ges/> (дата звернення 21.05.24)
7. Великий потенціал малої води [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zn.ua/energetics/bolshoj-potensial-maloj-vody.html> (дата звернення 21.05.24)
8. Jamoldinovich A. E. The importance of metrology and standardization today Alikhonov Elmurod / A. E. Jamoldinovich // *Innovation technical and technology*". – 2020. – Vol. 1, no 4. – Pp. 1-3.
9. Отакулов О. Х. Modeling of geothermal Micro-GES / О. Х. Отакулов та інші // *Scientific-technical journal*. – 2020. – Т. 24, no 2. – Pp. 89-93.
10. Rustamov U. S. Farg'ona viloyati aholisini elektr energiyasi tanqisligini bartaraf etishda Mikro-GESlardan foydalanish / U. S. Rustamov et al // *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*. – 2021. – Vol. 1, no 10. – Pp. 603-610.
11. Ergashev S. F. Automated Water Management System Based on Computer Automation Elements / S. F. Ergashev et al // *Automatics & Software Engineering*. – 2020. – N 3 (33). – Pp. 7.
12. Віхарев Ю. Малі ГЕС: сьогоднішня та майбутня / Ю. Віхарев, А. Карамушка та ін. // *Енергетична політика України*. – 2005. – № 6. – С. 90–96.
13. Нікіторович А. В. Аналіз стану та перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні / А. В. Нікіторович // *Енергетика та електрифікація*. – 2006. – № 9. – С. 29-32.
14. Мезеря А. Ю. Аналіз якісних показників використання різних типів генераторів на міні ГЕС // О. Ю. Мезеря, С. С. Придворів // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2023. – Вип. 31. – С.61-70.

15. Канюк Г. І. Наукове обґрунтування та нормативне забезпечення енергоефективних режимів роботи систем автоматичного регулювання гідрогенераторних установок / Г. І. Канюк, О. Ю. Мезеря, В. Є. Мельников // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит.* – 2019. – № 2. – С. 22-30.

16. Хлапук Н. М., Маковський А. М. Мала гідроенергетика України – можливості розвитку / Н. М. Хлапук, А. М. Маковський // *Гідроенергетика України.* – 2005. – № 3. – С. 30-40.

References:

1. Eurostat n.d., *Ukrayna potentsyalno sposobna proyzvodyt 74% elektroenerhyu yz vozobnovliaemikh ystochnykov* [Ukraine has the potential to produce 74% of its electricity from renewable sources], viewed 21 May 2024 <<https://itc.ua/news/eurostat-ukraina-potentsialno-sposobna-proizvodit-74-elektroenergii-iz-vozobnovlyaemyih-istochnikov/>>

2. Verkhovna Rada Ukrainy 2019, *Zakon Ukrainy № 514-19 O vnesenyy yzmeneniy v nekotorie zakoni Ukrainy otnosytelno obespecheniya konkurentnykh uslovyi proyzvodstva elektroenerhyu yz alternatyvnykh ystochnykov enerhyu* [On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Provision of Competitive Conditions for the Production of Electricity from Alternative Energy Sources], viewed 21 May 2024 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/514-19#Text>>

3. Nykytorovych, OV n.d., *Malie hydroelektrostantsyy Ukrainy: proshloe, nastoiashchee, budushchee* [Small Hydroelectric Power Stations of Ukraine: Past, Present, Future], viewed 21 May 2024 <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2014-06/0620_pres3.pdf>

4. Stroytelstvo malikh hydroelektrostantsyi na Zapadnykh Balkanakh [Construction of Small Hydroelectric Power Stations in the Western Balkans], viewed 21 May 2024 <<https://bankwatch.org/blog/stroitelstvo-malykh-gidroelektrostantsii-na-zapadnykh-balkanakh?lang=ru>>

5. Mini-gidrostantsii: kharakterystyky ta osoblyvosti [Mini-Hydropower Stations: Characteristics and Features], viewed 21 May 2024 <<https://hydromarket.com.ua/ua/a480494-mini-gidrostantsii-harakteristiki.html>>

6. Proektuvannya budivnytstva mikro, malykh ta mini HES [Designing the Construction of Micro, Small, and Mini Hydropower Plants], viewed 21 May 2024 <<https://mcl.kiev.ua/proektirovanie-stroitelstva-mikro-mini-i-malyh-ges/>>

7. Bolshoi potentsyal maloi vodi [Designing the Construction of Micro, Small, and Mini Hydropower Stations], viewed 21 May 2024 <<https://zn.ua/energetics/bolshoj-potentsial-maloy-vody.html>>

8. Jamoldinovich, AE 2020, 'The importance of metrology and standardization today Alikhonov Elmurod', *Innovation technical and technology*, vol. 1, no 4, Pp. 1-3.

9. Otakulov, OX et al. 2020, 'Modeling of geothermal Micro-GES', *Scientific-technical journal*, Vol. 24, no 2, Pp. 89-93.

10. Rustamov, US et al 2021, 'Farg'ona viloyati aholisini elektr energiyasi tanqisligini bartaraf etishda Mikro-GESlardan foydalanish', *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, Vol. 1, no 10, Pp. 603-610.

11. Ergashev, SF et al 2020, 'Automated Water Management System Based on Computer Automation Elements', *Automatics & Software Enginery*, no 3, Pp. 7.

12. Vykharev, Yu, Karamushka, A et al 2005, 'Malie HES: nastoiashchee y budushchee' [Small Hydropower Stations: Present and Future], *Enerhetycheskaia polytyka Ukrainy*, no 6, Pp. 90-96.

13. Nykytorovych, AV 2006, 'Analyz sostoiانيا y perspektyvi razvytyia maloi hydroenerhetyky v Ukraine' [Analysis of the Current State and Development Prospects of Small Hydropower in Ukraine], *Enerhetyka ta elektryfikatsiia*, no 9, Pp. 29-32.

14. Mezeria, AYU & Prydvorov, SS 2023, 'Analiz yakisnykh pokaznykiv vykorystannia riznykh typiv heneratoriv na mini HES' [Analysis of Quality Indicators of Different Types of Generators Used in Mini Hydropower Stations], *Mashynobuduvannia*, iss 31, Pp. 61-70.

15. Kaniuk, HI, Mezeria, AYU & Melnikov, VYe 2019, 'Naukove obhruntuvannia ta normatyvne zabazpechennia enerhoefektyvnykh rezhymiv roboty system avtomatychnoho rehuliuвання hidroheneratorykh ustanovok' [Scientific Justification and Regulatory Support for Energy-Efficient Operation Modes of Automatic Control Systems for Hydrogenerator Plants], *Enerhozberzhennia Enerhetyka Enerhoaudyt*, no 2 (150), Pp. 22-30.

16. Khlapuk, NN & Makovskyi, AM 2005, 'Malaia hydroenerhetyka Ukrainy – vozmozhnosti razvytyia' [Small Hydropower in Ukraine – Development Opportunities], *Hydroenerhetyka Ukrainy*, no 3, Pp. 30-40.

Стаття надійшла до редакції 15 червня 2024 року.