

УДК 621.22-56

А.М. Чернюк

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## РОЗРОБКА СПРОЩЕНОЇ СХЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПУСКО-ЗУПИНЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ МАЛИХ ТА МІКРО ГЕС

У статті проведений аналіз проблеми побудови системи регулювання малих та мікро ГЕС, визначене науково-практичне завдання, що полягає у лінеаризації закону управління засівкою пуско-зупинюючого агрегату, яке вирішене шляхом геометричного моделювання форми кулачка засівки.

**Ключові слова:** малі та мікро ГЕС, лінеаризація, управління пуско-зупинюючими агрегатами.

### Вступ

#### Постановка проблеми і аналіз публікацій.

Гідроенергетичні ресурси великих річок в Україні практично цілком освоєні. У зв'язку з цим великого значення приділяється питанню розвитку малої гідроенергетики шляхом будівництва нових, реконструкції та модернізації існуючих малих ГЕС. На сьогодні економічно доцільніше будівництво нових ГЕС, ніж реконструювати існуючі.

Як показує практика вартість регуляторів порівнянна із вартістю гідротурбін (1:4), що суттєво здорожує будівництво мГЕС. У даний час урахуваючи, що мГЕС не вирішують питань регулювання частоти обертання у мережі і покриття піків навантаження, стоїть питання про здешевлення цих пристроїв. Метою статті і є саме здешевлення будівництва малих ГЕС за рахунок спрощення систем регулювання гідроагрегатів.

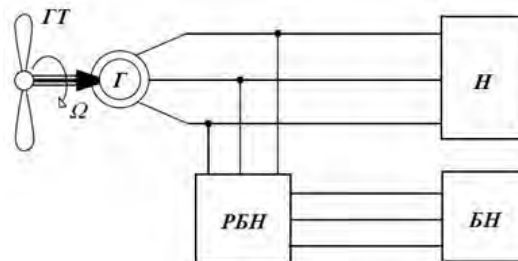
За прийнятою в світі класифікацією до малої гідроенергетики належать мікроГЕС (мкГЕС) потужністю до 100 кВт, мініГЕС (мГЕС) від 100 до 1000 кВт та маліГЕС (мГЕС) - 25000 кВт. У Російській Федерації під малою енергетикою розуміють ГЕС від 100 кВт до 30000 кВт з діаметром робочого колеса до 3 м.

Відповідно до пункту 4.16 СНиП 2.06.01.86 до малихГЕС в Україну слід відносити ГЕС, встановлена потужність яких не перевищує 30 МВт, що де-що відрізняється від світової класифікації.

Суттєвою проблемою на шляху розвитку малої та мікро ГЕС в Україні є занадто висока вартість систем регулювання роботи агрегатів цих станцій, яка може досягати ціни основних агрегатів станції.

**Огляд засобів регулювання на малих ГЕС.** В даний час для мікро-ГЕС та міні-ГЕС з потужністю до 200 кВт-300 кВт застосовується система регулювання з баластним навантаженням. Баластний пристрій являє собою набір нагрівальних елементів різних типів. За допомогою баластного пристрою забезпечується реалізація принципу підтримки балансу потужності водотоку, що підводиться до гідротурбін.

Спростити конструкцію, як вентильного перетворювача, так і гідроагрегату, дозволяє спосіб стабілізації параметрів мікроГЕС, що полягає в регулюванні величини її електричного навантаження. Змінювати величину навантаження автономного джерела електроживлення можливо включенням на вихід генератора регульованого баластного навантаження. Якщо під «баластним» розуміти деяке корисне навантаження, то цей спосіб стабілізації передбачає автоматичний перерозподіл електричної потужності між деякими споживачами, частина з яких допускає зниження величини напруги живлення або його відключення. Схема енергоустановки з автобаластним регулюванням вихідних параметрів показана на рис. 1.



ГТ – гідротурбіна; Г – генератор; Н – корисне навантаження; БН – баластне навантаження; РБН – регулятор баластного навантаження

Рис. 1. Структурна схема стабілізації параметрів мікро ГЕС автобаластного типу

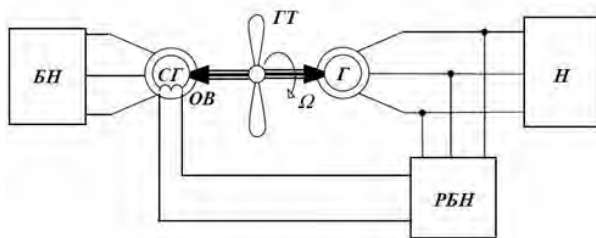
Перевагою даного способу є можливість стабілізації частоти обертання гідроагрегату при повному виключенні з системи стабілізації електромеханічних пристроїв. Заміна їх статичним регулятором вельми вигідна і з точки зору поліпшення характеристик мікроГЕС і з точки зору чисто економічної. Так, за даними, вартість регулятора автобаласта може становити лише 20% від механічного регулятора гідротурбіни.

Електронна система регулювання може мати високу швидкодію, що позитивно позначається на якості вихідної напруги джерела електроживлення.

За рахунок стабілізації частоти гідроагрегату, в аналізованому типі енергоустановок, можуть застосовуватися загальнопромислові генератори без великого запасу механічної міцності, а в якості гідродвигуна – насос в турбінному режимі. Крім того, автобаластний спосіб стабілізації добре поєднується з регулюванням вихідних параметрів асинхронного генератора з ємнісним самозбудженням, що дозволяє застосовувати в автономних мікроГЕС як синхронні так і асинхронні машини.

Енергоустановки, робочі режими яких регулюються за допомогою управління потужністю їх електричних навантажень, можуть бути розділені на дві групи. До першої групи відносяться системи стабілізації частоти обертання гідроагрегату за рахунок створення гальмівного моменту на валу додаткової електричної машини. Стабілізація іншого параметра мікроГЕС – величини вихідної напруги здійснюється відомими методами регулювання напруги генераторів. В якості додаткової електричної машини, що створює управляючий механічний вплив на гідротурбін, можуть застосовуватися різні типи машин.

Наприклад, в використовується додатковий синхронний генератор, розташований на одному валу з гідроагрегатом. Основний генератор працює на корисне навантаження, а додатковий на баластне навантаження, рівне по потужності корисному. Обмотка збудження додаткового генератора підключена до регулятора, який при зміні величини корисного навантаження змінює величину струму збудження СГ таким чином, щоб сумарний момент опору двох генераторів залишався на рівні, що забезпечує сталість частоти обертання енергоустановки (рис. 2).



СГ – синхронний генератор;  
ОВ - обмотка збудження

Рис. 2. Структурна схема мікроГЕС автобаластного типу, сконструйована на базі двох генераторів

Перевагами таких схем є простота, невелика потужність ланцюгів управління, висока швидкодія, відсутність впливу регулюючих елементів на ланцюг навантаження.

До недоліків слід віднести використання двох електричних машин сумірною потужності, що значно погіршує масогабаритні показники джерела електроживлення. Для стабілізації напруги на корисному навантаженні необхідний додатковий регулятор напруги основного генератора. Несиметрія навантаження джерела не компенсується системою стабілі-

зації, що викликає додаткові втрати електроенергії та погіршення її якості.

Зазначені недоліки обмежують застосування в мікроГЕС автобаластних систем, призначених тільки для регулювання гальмівного моменту гідроагрегату. Набагато ефективніше управляти електричною потужністю генератора мікроГЕС, регулюючи його навантаження. Можна запропонувати кілька способів регулювання електричного навантаження станції. Найпростіший з них полягає у відключенні частини навантажень при зменшенні енергії, що підводиться до гідродвигуна. Більш досконалий тип регулятора передбачає наявність ряду дозованих навантажень, які можуть підключатися або відключатися в певних поєднаннях з допомогою тиристорного комутатора.

Структурна схема мікроГЕС з тиристорним комутатором дискретних баластних навантажень показана на рис. 3. При зміні величини корисного навантаження  $H$  система управління СУ видає керуючий сигнал на певні тиристорні ключі  $K_1 - K_n$ , які комутують одну або декілька ступенів баластного навантаження  $БН_1 - БН_n$ . В результаті відбувається зміна величини гальмівного моменту генератора, що компенсує відхилення моменту турбіни, і частота обертання стабілізується. Крім того, регулюється струм якорного обмотки генератора, що позитивно позначається на стабільності його напруги.

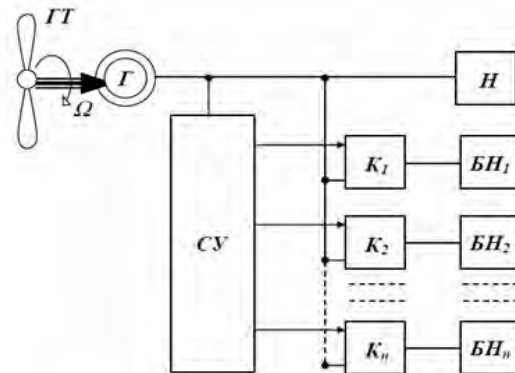


Рис. 3. Структурна схема мікроГЕС з дискретним баластом

Комутація вентилів комутатора звичайно здійснюється природним чином, тому для ряду схемних рішень тиристорних ключів характерна відсутність спотворень форми напруги генератора. У цьому полягає найважливіша перевага автобаластних систем стабілізації з тиристорними комутаторами.

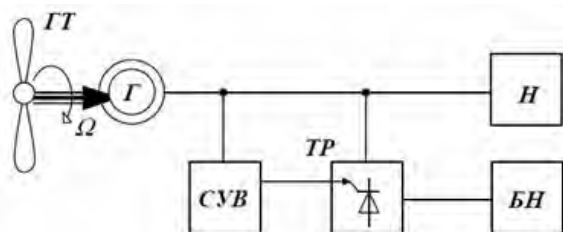
Недоліками таких схем є необхідність використання великого числа керованих вентилів, що ускладнює і здорожує систему регулювання. Для досягнення прийнятної точності стабілізації напруги число дозованих ступенів баластного навантаження вибирається не менше ніж  $n = 15$ .

Крім ускладнення схеми, дроблення баласту на ряд точно дозованих ступенів ускладнює корисне використання потужності, що розсіюється на ньому.

Тому тиристорні комутатори більш доцільні в установках невеликої потужності, в межах декількох кВт.

Усунути ці недоліки, при певному погіршенні якості виробленої електроенергії, дозволяє використання в регуляторах автобаласта схем з фазовим регулюванням. Такі регулятори вимагають значно меншої кількості тиристорів для побудови силових схем і найбільшою мірою задовольняють основним вимогам, пред'являються до мікроГЕС – простота і надійність.

Структурна схема мікроГЕС, система стабілізації якої побудована на тиристорному перетворювачі з фазовим регулюванням потужності баласту, показана на рис. 4. Система управління вентилями регулятора, звичайного вертикального типу (СУВ), формує певний кут управління тиристорами регулятора (ТР) в залежності від величини керуючого впливу, що характеризує відхилення вихідних електричних параметрів установки щодо номінальних значень.



СУВ – система керування вентилями;  
ТР – тиристорний регулятор

Рис. 4. Структурна схема мікроГЕС з фазовим керуванням

Основним недоліком регуляторів автобаласта з фазовим регулюванням в порівнянні з тиристорними комутаторами є спотворення форми кривих фазних струмів і напруг генератора мікроГЕС.

До параметрів автономної енергоустановки, за якими доцільно здійснювати регулювання робочих режимів гідроагрегату, відносяться, перш за все, струм навантаження і його складові, частота вихідної напруги і його величина.

### Основний матеріал

Малі потужності гідроагрегатів дозволяють застосовувати нетрадиційні технічні рішення, неприйнятні на ГЕС з гідроагрегатами великої потужності. Для зниження витрат на оснащення та експлуатацію електричної частини мікро ГЕС, при використанні в якості генераторів електричних машин змінного та постійного струму в системах управління можуть бути використані електромеханічні системи.

На сьогоднішній день регулювання витрати рідини на міні ГЕС здійснюється, як правило, за допомогою плоско-паралельної, шарової або поворотної засувки з використанням конфузорно-дифузорного переходу або без нього. Витрата рідини на гідротурбіні регулюється величиною відкриття засувки, що змінює витрату рідини:

$$Q = \mu_0 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D_T^2 \cdot \sqrt{2gH},$$

де  $\mu_0$  – коефіцієнт витрати рідини;  $D_T$  – діаметр трубопроводу до конфузорно-дифузорного переходу;  $H$  – гідравлічний напір на засувці [1, 3].

Коефіцієнт витрати рідини  $\mu_0$  є нелінійна функція від ступеня закриття засувки  $S$  чи кута повороту засувки  $\alpha$ , тобто витрата рідини залежить нелінійно відносно ступеня відкриття засувки. Завдяки цьому система автоматики та регулювання міні ГЕС набуває значної складності, що підвищує вартість міні ГЕС та собівартість електроенергії, що виробляється на них [2].

У зв'язку з цим, розробка пристроїв регулювання витрати рідини, які б мали лінійну залежність витрати рідини від руху регулюючого органу, є однією з актуальних задач для міні ГЕС.

При русі робочого органу засувки, або при його повороті, витрата рідини, що протікає крізь засувку, залежить від положення робочого органу згідно з законом, який показано на рис. 5 (крива 1 – залежність витрати рідини від положення робочого органу; крива 2 – нестача витрати рідини до лінійної залежності; крива 3 – лінеаризована залежності витрати рідини від положення робочого органу). Недоліком цих засувок є нелінійна залежність величини витрати рідини від руху робочого органу для плоско-паралельної засувки, або куту повороту для шарової та поворотної засувки, завдяки чому ускладнюється автоматизована система регулювання потужності міні ГЕС та збільшується вартість гідроелектричної станції в цілому.

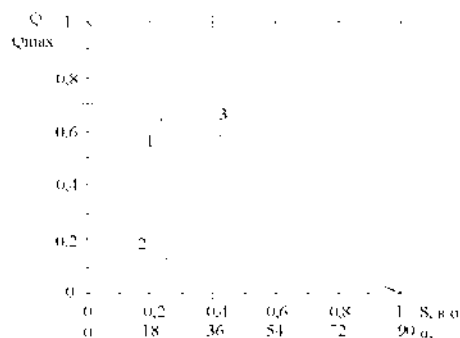


Рис. 5. Залежності витрати рідини від положення засувки

Пуско-зупинюючий пристрій призначений для подачі води на гідротурбіну при її пуску і для закриття її при зупинці турбіни.

При цьому повинні забезпечуватися такі функції управління:

- пуск турбіни;
- синхронізація з системою;
- збудження генератора;
- управління вимикачем навантаження;
- зміна навантаження гідротурбіни при зміні водотока в каналі, що підводить, або водопроводі;
- зупинка турбіни.

Захист:

- генератора від перевантаження і короткого замикання;
- баластного навантаження від перевантаження і короткого замикання.

Моніторинг основних параметрів пристроїв і вузлів гідроагрегату:

- енергетичні параметри генератора і мережі;
- частота обертання гідротурбіни;
- положення направляючого апарату;
- положення вимикача мережі;
- вихідні сигнали захисних і допоміжних пристроїв;

– готовність до роботи приводу направляючого апарату;

- положення засувки на входному трубопроводі;
- стан джерела резервного живлення.

Система управління повинна мати два режими роботи: місцеве і дистанційне, в кожному з яких САУ повинно забезпечувати ручне або автоматичне управління. Згадані завдання вирішуються САУ ГА у всіх режимах роботи гідроагрегату: робочому, перехідному і аварійному.

В роботі поставлено задачу лінеаризації характеристики плоско-паралельної, шарової та поворотної засувки на трубопроводах рідини на міні ГЕС шляхом введення додаткового потоку рідини таким чином, щоб сумарна витрата рідини на вході в гідротурбіну була лінійною функцією від положення регулюючого органу засувки. Поставлена задача вирішується тим, що паралельно з плоско-паралельною, шаровою або поворотною засувкою регулювання витрати рідини, яка складається з робочого органу та системи зміни положення робочого органу, встановлюється байпасне відгалуження з додатковою засувкою та кулачком комбінатора, який з'єднано з приводом.

Застосування байпасного відгалуження зі змінною витратою рідини дозволить компенсувати нестачу витрати рідини крізь головну засувку трубопроводу при різних положеннях робочого органу головної засувки, завдяки чому залежність витрати рідини на гідротурбіні від положення робочого органу головної засувки буде лінійною (рис. 6).

На рис. 7 зображено кулачка комбінатора.

Пристрій регулювання витрати рідини з лінійною залежністю витрати рідини від положення робочого органу плоско-паралельної, шарової або поворотної засувки складається з головного трубопроводу 1, конфузorno-дифузornoного переходу 2, головної засувки 3, редуктора 4, електродвигуна 5, байпасного відгалуження 6, кулачка комбінатора 7 та засувки байпасного відгалуження 8.

Профіль кулачка комбінатора 7 зроблено таким чином, щоб величина витрати рідини, яка протікає крізь байпасне відгалуження дорівнювала величині нестачі витрати рідини крізь головну засувку.

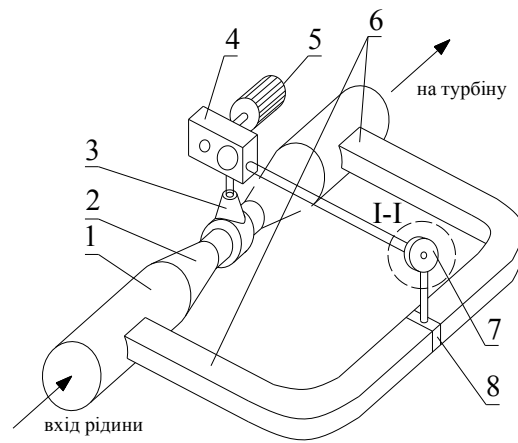


Рис. 6. Додаючий байпас

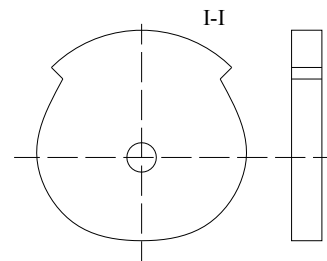


Рис. 7. Профіль кулачка комбінатора

Пристрій працює таким чином: подають сигнал на зміну витрати рідини на електродвигун 5, який за допомогою редуктора 4 переміщує робочий орган головної засувки 3. Паралельно з ним за допомогою редуктора 4 переміщується кулачок комбінатора 7, який регулює відкриття засувки 8 на байпасному відгалуженні 6 згідно із встановленим законом. Величина повної витрати рідини на гідротурбіні складається з витрати рідини головної засувки та витрати рідини байпасного відгалуження і є лінійною функцією від ходу робочого органу основної засувки.

Експериментальні дослідження, проведені в натурній турбінній лабораторії дозволили отримати залежності потужності потоку рідини від кута відкриття засувки, яка має суттєво нелінійний вигляд (рис. 8), що ставить завдання лінеаризації функції управління.

Побудування форми кулачка здійснено методами графічного моделювання за різницею лінеаризованої та нелінеаризованої функції [4] (рис. 9, 10). Подібна лінеаризація на даний час реалізована складними та досить дорогими системами автоматичного регулювання пуско-зупиняючих пристроїв. Запропонована методика лінеаризації основана на геометричній моделі форми кулачка (рис. 11).

## Висновки

1. Спрощення системи управління гідроагрегатів малих та мікро ГЕС значною мірою підвищує конкурентоспроможність генерації електроенергії на електростанціях цього типу

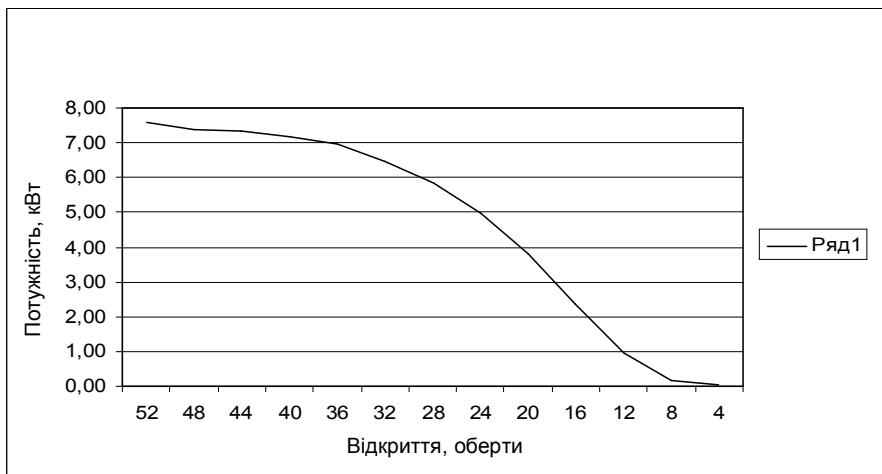


Рис. 8. Залежності потужності потоку рідини від кута відкриття засівки

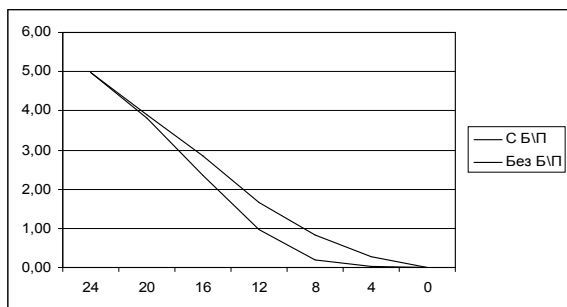


Рис. 9. Лінеаризація системи управління засівкою

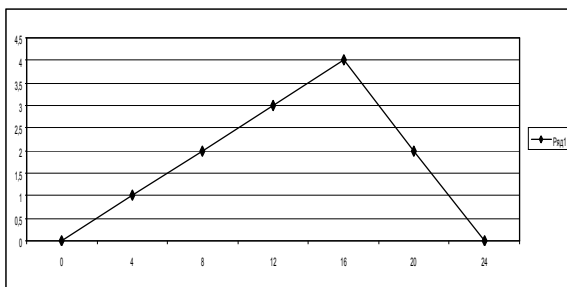


Рис. 10. Побудова форми кулачка засівки

2. Запропонована система лінеаризації функції управління пуско-зупинюючих агрегатів ГЕС може бути реалізована за допомогою додаткового комплексуючого байпасного приладу та особливої форми кулачка засувки.

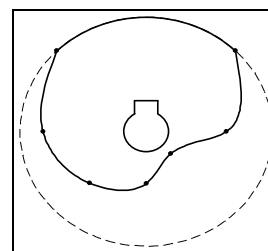


Рис. 11. Форма кулачку засівки лінеаризованої системи управління

### Список літератури

1. Петров А.Г. Аналитическая гидродинамика / А.Г. Петров. – М.: Физматлит, 2009. – 520 с.
2. Система управления частотой вращения ротора гидротурбины, пути ее развития / З.Я. Лурье, В.Н. Бездетко, В.Н. Дмитерко и др. // Проблемы машиностроения. – 2003. – Т.6. – №2. – С. 26-36.
3. Ursell F. Asymptotic Methods in Wave Mechanics (Eds G Wickham, P A Martin) (Cambridge: Cambridge University Press, 1992).
4. Vidyasagar M. Nonlinear Systems Analysis / M. Vidyasagar second edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.

Надійшла до редколегії 25.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПУСКО - ОСТАНАВЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ МАЛЫХ И МИКРО ГЭС

А.М. Чернюк

В статье проведен анализ проблемы построения системы регуляции малых и микро ГЭС, определено научно-практическое задание, которое заключается в линейзации закона управления задвижкой пуско-останавливающего агрегата, которое решено путем геометрического моделирования формы кулачка задвижки.

**Ключевые слова:** малые и микро ГЭС, линейризация, управление пуско-останавливающими агрегатами.

### DEVELOPMENT OF THE SIMPLIFIED CHART OF ADJUSTING OF START - STOPPING DEVICES SMALL AND MICRO HPS

A.M. Chernyuk

In the article the analysis of problem construction of the adjusting system is conducted small and micro HPS, a scientific task, which consists at the lining law of management of start-stopping aggregate, which is decided by the geometrical design of form of fist, is certain.

**Keywords:** small and micro HPS, lining, management start-stopping aggregates.