

УДОСКОНАЛЕННЯ ГРУПОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ГІДРОАГРЕГАТІВ ДНІПРОВСЬКОЇ ГЕС ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Розроблено систему групового регулювання гідроагрегатів ГЕС на базі нечіткої логіки, яка рекомендує вибір агрегату для включення, виходячи з основних параметрів його поточного стану та на основі експертних оцінок спеціалістів. Наведено приклад розрахунку пріоритетності включення гідроагрегату ДніпроГЕС-2 з використанням запропонованої системи регулювання.

Ключові слова: *групове регулювання, нечітка логіка, гідроагрегат, гідроелектростанція*

Безперечною перевагою гідроелектростанцій (ГЕС) у складі енергосистеми є їх висока маневреність. Тому ГЕС працюють, як правило, на піку графіка навантаження системи. Безперервний характер зміни ситуацій на ГЕС призводить до необхідності покращення адаптаційних властивостей моделей керування. Питанням підвищення ефективності керування режимами роботи ГЕС приділяється велика увага.

У науково-технічній літературі відомі різні способи і засоби керування основним обладнанням, а також режимами роботи ГЕС [1–4]. Вони базуються на способах керування, заснованих на традиційних підходах теорії автоматичного керування. Такі способи демонструють хороші результати в теорії, але на практиці їх важко використовувати внаслідок наявності великої кількості неврахованих факторів впливу на обладнання ГЕС, що призводить до зниження якості керування. Дослідження в області удосконалення систем керування основним обладнанням та режимами роботи гідроелектростанцій залишаються актуальними та тривають і в даний час.

При цьому на даний час оперативне керування енергетичним обладнанням ГЕС здійснюється виключно за участю людини (особи, що приймає рішення – далі ОПР). Тому, як правило, прийняте рішення є суб'єктивним і спирається на досвід та інтуїцію ОПР. Недооцінка одних ситуацій та переоцінка інших ОПР може призвести до зниження рівня надійності та економічності працюючого обладнання, а в деяких випадках, до катастрофи. Приклад Саяно-Шушенської ГЕС в цьому випадку є досить переконливим. Згідно Акту технічного розслідування аварії на Саяно-Шушенській ГЕС 17 серпня 2009 однією з причин аварії названа невірна оцінка ситуації черговим інженером.

Ефективне керування режимами і складом працюючого на станції обладнання є основним завданням, розв'язуваним оперативним персоналом ГЕС, і має на увазі використання комплексної оцінки ситуації на гідроагрегатах в поточний момент часу. Така оцінка може бути отримана на основі контролю та моніторингу обладнання та є важливим, якщо не основним, елементом підтримки прийняття рішень при керуванні режимом і складом обладнання. Для керування складними об'єктами з великою долею невизначеності (такими як ГЕС) доцільно

застосувати сучасні методи штучного інтелекту, зокрема нечітку логіку та штучні нейронні мережі. Засноване на цих методах керування дозволить істотно підвищити ефективність, безпеку і надійність ГЕС, що є актуальним завданням. В існуючій науково-технічній літературі відомі застосування нечіткої логіки для керування витратами води на ГЕС, зокрема [5,6]. В даній статті розглядається використання нечіткої логіки в системі групового регулювання гідроагрегатами ГЕС.

Метою статті є удосконалення системи групового регулювання активної потужності гідроагрегатів за допомогою нечітких методів і моделей.

На першому етапі проаналізовано існуючі системи автоматичного регулювання частоти та активної потужності ГЕС енергосистеми України (у тому числі на Дніпровській ГЕС). Такі системи побудовані з наступних складових:

- первинні регулятори і агрегатні контролери;
- системи станційного керування «Centralog» ГЕС;
- центральний регулятор (SCADA/AGC), який встановлений в диспетчерському пункті ДП «НЕК» Укренерго»;
- телекомунікаційні зв'язки між центральним регулятором, системою «Centralog» ГЕС та відповідними підстанціями міждержавних ліній електропередачі.

У режимі групового регулювання активної потужності (ГРАП) система «Centralog» автоматично розподіляє завдання за активною потужністю між працюючими гідроагрегатами (ГА) і включає або зупиняє/переводить в режим синхронного компенсатора ГА в залежності від значення одержаного завдання.

У цьому процесі гідроагрегати можуть працювати в неоптимальних режимах, внаслідок чого погіршуються їхні температурні та вібраційні показники, зростає кількість відмов насосів маслonaпорної установки (МНУ), частішають випадки пробою обмотки статора. Перевідні режими (пуск, зупинка, перевід з генераторного режиму в режим синхронного компенсатора та навпаки) і постійне регулювання потужності в діапазоні 0–72 МВт є найбільш важким для основного обладнання ГА і допоміжного обладнання (компресорні установки, масляні насоси МНУ). В даний час до системи автоматичного регулювання частоти та потужності ОЕС України одночасно підключені шість гідроагрегатів Дніпровсь-

кої ГЕС. Загальна кількість гідроагрегатів Дніпровської ГЕС-1 – дев'ять. Для усунення недоліків існуючої схеми ГРАП необхідне її удосконалення за рахунок вирішення наступних задач:

- 1) визначення поточного технічного стану усіх ГА на ГЕС;
- 2) розрахунок пріоритету включення ГА;
- 3) вибір ГА з найвищим пріоритетом для включення, що і буде порадою для ОПР.

Розв'язання цих задач аналітичними методами є ускладненим внаслідок: неповноти вхідної інформації, великої кількості параметрів, від яких залежить визначення оптимального пріоритету та відсутності явного математичного зв'язку між цими параметрами.

У програмі групового керування агрегатами існує параметр - тиск в повітряній магістралі системи відтиску – з двома уставками: 1 - заборона на переведення агрегату в режим синхронного компенсатора; 2 - дозвіл на переведення агрегату в режим синхронного компенсатора. При зменшенні загальної уставки активної потужності станції проводиться перехід гідроагрегатів в режим синхронного компенсатора по черзі, при наявності повітря в системі відтиску. Решта гідроагрегатів, які підключені до ГРАП, при зменшенні загальної уставки активної потужності переводяться в режим холостого ходу, з подальшим переведенням в режим синхронного компенсатора при наявності тиску в системі відтиску.

На даний час вибір ГА та їх пріоритету у ГРАП виконується начальником зміни станції. У своїй роботі він керується такими чинниками:

- температурний режим гідроагрегату;
- температурний режим головного трансформатору (ГТ);
- стан допоміжного обладнання (МНУ та ін.);
- кількість перевідних режимів;
- наявність дефектів гідроагрегату, головного трансформатору та допоміжного обладнання.

Основним недоліком такого підходу до вирішення задачі є людський фактор. Будь-якій людині властиві обмеження можливостей чи помилки. Не завжди психологічні і психофізіологічні характеристики людини відповідають рівню складності вирішуваних завдань або проблем.

Досить важливою причиною появи помилок людини можуть бути відсутність або недостатність інформаційної підтримки (спеціальні обробники таких ситуацій в програмному забезпеченні, наочні матеріали та інструкції); особливо сильно ця проблема проявляється в екстремальних ситуаціях і в умовах дефіциту часу на прийняття рішення.

Неповнота вхідної інформації, відсутність математичних залежностей між основними факторами, що впливають на черговість, та наявність людського фактору роблять доцільним використання для вирішення поставленої задачі сучасних методів штучного інтелекту, зокрема методів нечіткої логіки. Застосування цих методів дозволяє створити програмний засіб для видачі порад для ОПР.

За результатами проведеного аналізу пропонується створення системи, яка буде працювати в режимі порадника для ОПР та видавати рекомендації з пріоритету включення ГА на базі визначальних параметрів (температурний режим гідроагрегату, температурний режим головного трансформатора, кількість перевідних режимів) ГА.

На другому етапі для оцінки технічного стану гідроагрегату запропонована нечітка модель, яка виконує визначення пріоритетності пуску, зупинки, перевodu у режим синхронного компенсатора, гідроагрегата, як нечіткої функції від згаданих параметрів:

- температури найбільш нагрітої точки гідрогенератора;
- температури найбільш нагрітої точки трансформатора;
- кількість перевідних режимів гідрогенератора;
- тиску у котлі МНУ.

Прийняті вхідні величини описуються наступними нечіткими термами:

- 1) «температура найбільш нагрітої точки гідрогенератора»: *Допустима, Висока*;
- 2) «температура найбільш нагрітої точки трансформатора»: *Допустима, Висока*;
- 3) «кількість перевідних режимів гідрогенератора»: *Допустима, Висока*;
- 4) «тиск у котлі МНУ»: *Низький, Нормальний, Високий*.

Для настроювання функцій приналежності нечітких термів вхідних величин: «Температура найбільш нагрітої точки гідрогенератора», «Температура найбільш нагрітої точки трансформатора», «Кількість перевідних режимів гідрогенератора», «Тиск у котлі МНУ» у роботі [7] було проведено опитування дванадцяти експертів Дніпровської ГЕС (результати наведені у табл. 1). Для обробки експертної інформації застосовувався метод парних порівнянь Сааті [8]. Перевагами методу Сааті у порівнянні з іншими методами настроювання функцій приналежності є достатність для його застосування мінімальної кількості експертної інформації, зручна для сприйняття експертами шкала парних порівнянь і висока ступінь узгодженості оцінок різних експертів.

Загальна кількість правил у базі визначається кількістю можливих комбінацій нечітких термів всіх вхідних величин:

$$N_{\text{пр.}} = N_{A1} \cdot N_{A2} \cdot N_{A3} \cdot N_{A4} = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 24.$$

Для нечіткої моделі вибору пріоритетності ГА в ГРАП з чотирма вхідними величинами сформовано нечіткі правила «ЯКЩО-ТО». Наприклад, одне з таких правил має наступний вигляд:

– *ЯКЩО* температура $t_{\text{нтт.ген.}}$ «Допустима», та температура $t_{\text{нтт.пр.}}$ «Допустима», та кількість перевідних режимів N «Допустима», та тиск у котлі P «Нормальний», *ТО* пріоритет пуску гідроагрегата S «Дуже високий».

Інші правила нечіткого логічного виводу мають аналогічну структуру та представлені в табл. 2.

На базі табл. 1 визначені функції приналежності вхідних величин. Для функції приналежності вихідної нечіткої змінної «Пріоритет пуску ГА» було обрано 5 наступних термів: «Дуже високий»; «Високий»; «Середній»; «Низький»; «Дуже низький» (рис. 1).

Використовуючи вхідну інформацію та наведену базу нечітких правил (табл. 2) нечітка система виконує нечіткий логічний вивід – отримання висновку (нечіткого значення вихідної змінної) у вигляді нечіткої множини, відповідного поточним значенням параметрів.

Результатом застосування методу нечіткої логіки є деяка нечітка множина, яка описується функцією приналежності. У такій ситуації невизначеність вибору зберігається. Для визначення остаточного рішення (конкретного значення Y) необхідно здійснити перехід від отриманої нечіткої множини до єдиного значення Y, яке визнається в якості вирішення поставленого завдання, такий перехід називається дефазифікацією.

В якості механізму нечіткого виводу, який реалізує логічні операції імплікації та агрегування нечітких правил для відображення вхідних нечітких змінних у вихідну нечітку змінну, застосовано алгоритм Мамдані [9]. Результуюче значення виходу визначається за допомогою дефазифікації вихідної нечіткої змінної шляхом знаходження зваженого середнього значення (центру ваги):

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{A_i}(P_i) \cdot y}{\sum_{i=1}^m \mu_{A_i}(P_i)} \quad (1)$$

На третьому етапі, як приклад, розглянемо функціонування запропонованої нечіткої моделі вибору пріоритетності гідроагрегата на ДніпроГЕС-2. На момент отримання завдання від енергосистеми технічний стан ГА відповідає таким параметрам:

- температура генератора $t_{ген.} = 70,4^{\circ}\text{C}$;
- температура блочного трансформатора дорівнює $t_{тр.} = 47,8^{\circ}\text{C}$;
- кількість перевідних режимів ГА дорівнює $N = 4$;
- тиск у котлі МНУ дорівнює $P = 18,4$ атм.

Далі визначасмо ступені приналежності вхідних величин відповідним нечітким термам:

- $A_1 : \mu_{допустима}(t_{ген.}) = 0,66 \quad \mu_{висока}(t_{ген.}) = 0,34$
- $A_2 : \mu_{висока}(t_{тр.}) = 0,23 \quad \mu_{висока}(t_{тр.}) = 0,23$
- $A_3 : \mu_{допустима}(N) = 1 \quad \mu_{висока}(N) = 0$
- $A_4 : \mu_{низький}(P) = 0 \quad \mu_{нормальний}(P) = 1 \quad \mu_{високий}(P) = 0$

Згідно з правилами нечіткого логічного виводу (табл. 1, правило 4) визначається нечітка множина вихідної величини шляхом імплікації (відтинання трапецій від вихідних функцій приналежності згідно з операцією мінімуму) та агрегування отриманих відсічених трапецій нечітких термів вихідної змінної. За виразом (1) виконаємо дефазифікацію вихідної нечіткої величини:

$$Y = 0,349.$$

Аналогічно системою нечіткою логіки розраховуються за тими ж правилами значення пріоритетів для інших ГА, використовуючи вхідні значення їх параметрів. Гідроагрегат з найбільшим значенням пріоритету буде переважним для вмикання у систему ГРАП. Таким чином, завдяки використанню розробленої системи керування на базі нечіткої логіки, скоротиться кількість перевідних режимів ГА, та завжди здійснюється вибір гідроагрегату, який знаходиться у найкращому технічному стані.

Таблиця 1 – Експертні оцінки технічного стану основних вузлів ГА

Температура найбільш нагрітої точки генератора $^{\circ}\text{C}$								
$t_{нтг\ ген.}$	30	40	50	60	70	80	90	100
Допустима	12	12	12	12	5	2	0	0
Висока	0	0	0	0	7	10	12	12
Температура найбільш нагрітої точки трансформатора $^{\circ}\text{C}$								
$t_{нтг\ тр.}$	20	30	40	50	60	70		
Допустима	12	12	12	11	4	0		
Висока	0	0	0	1	8	12		
Кількість перевідних режимів гідроагрегатора								
N	10	20	30	40	50	60	70	80
Допустима	12	9	2	1	1	0	0	0
Висока	0	3	10	11	11	12	12	12
Тиск у котлі МНУ, атм.								
P	15	16	17	18	19	20	21	22
Низький	12	10	7	2	1	0	0	0
Нормальний	0	2	5	10	11	10	5	0
Високий	0	0	0	0	0	2	7	12

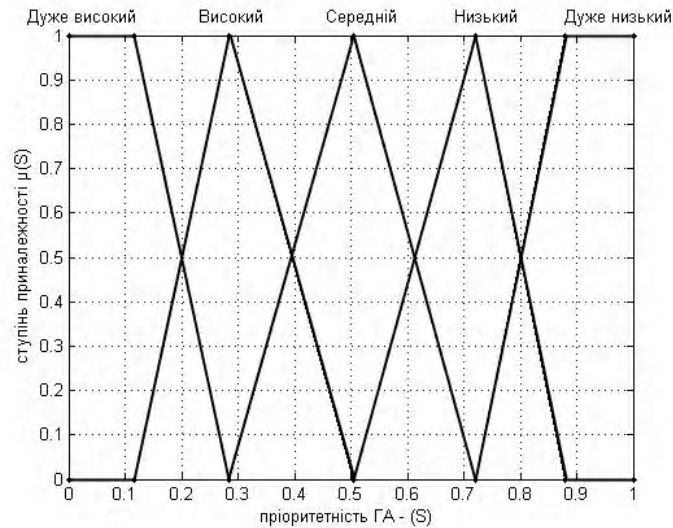


Рисунок 1 – Функція приналежності вихідної нечіткої змінної «Пріоритет пуску ГА»

Таблиця 2 – База нечітких правил визначення пріоритетності ГА в ГРАП

№	Кількість перевідних режимів, N	Тиск у котлі МНУ, P	Температура генератора, $t_{нт.ген.}$	Температура трансформатора, $t_{нт.тр.}$	Пріоритет пуску гідроагрегата, S
1	Допустимий	Нормальний	Допустимий	Допустимий	Дуже високий
2	Допустимий	Нормальний	Допустимий	Високий	Середній
3	Допустимий	Нормальний	Високий	Допустимий	Середній
4	Допустимий	Нормальний	Високий	Високий	Низький
5	Допустимий	Високий	Допустимий	Допустимий	Високий
6	Допустимий	Високий	Допустимий	Високий	Низький
7	Допустимий	Високий	Високий	Допустимий	Низький
8	Допустимий	Високий	Високий	Високий	Дуже низький
9	Допустимий	Низький	Допустимий	Допустимий	Середній
10	Допустимий	Низький	Допустимий	Високий	Низький
11	Допустимий	Низький	Високий	Допустимий	Низький
12	Допустимий	Низький	Високий	Високий	Дуже низький
13	Високий	Нормальний	Допустимий	Допустимий	Середній
14	Високий	Нормальний	Допустимий	Високий	Низький
15	Високий	Нормальний	Високий	Допустимий	Низький
16	Високий	Нормальний	Високий	Високий	Дуже низький
17	Високий	Високий	Допустимий	Допустимий	Низький
18	Високий	Високий	Допустимий	Високий	Дуже низький
19	Високий	Високий	Високий	Допустимий	Дуже низький
20	Високий	Високий	Високий	Високий	Дуже низький
21	Високий	Низький	Допустимий	Допустимий	Низький
22	Високий	Низький	Допустимий	Високий	Дуже низький
23	Високий	Низький	Високий	Допустимий	Дуже низький
24	Високий	Низький	Високий	Високий	Дуже низький

ВИСНОВКИ

1. Розроблено систему групового регулювання гідроагрегатів ГЕС на базі нечіткої логіки, яка рекомендує вибір гідроагрегату для вмикання, виходячи з основних параметрів його поточного стану (температурного режиму гідроагрегату та головного трансформатору, тиску у МНУ та кількості перевідних режимів).

2. На основі експертних оцінок спеціалістів виконаний приклад розрахунку пріоритетності включення одного з гідроагрегатів ДніпроГЕС-2 з використанням нечіткої логіки.

3. Використання запропонованої системи у якості «порадника» для оперативного персоналу ГЕС дозволить суттєво підвищити термін безаварійної роботи гідроелектростанції та її експлуатаційну надійність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Siu T.K. A Practical Hydro Dynamic Unit Commitment and Loading Model / T. K. Siu, G. A. Nash, Z. K. Shawwash // *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, Issue 2, 2001. – pp. 301–306.
2. Nilsson O. Hydro Unit start-up Costs and Their Impact on the Short Term Scheduling Strategies of Swedish Power Producers / O. Nilsson, D. Sjelvgren // *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, Issue 1, 1997. – pp. 38–44.
3. Shawwash Z.K. The B.C. Hydro Short Term Hydro Scheduling Optimization Model // Z.K. Shawwash, T.K.

- Siu, S.O. Russel // *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, Issue 3, 2000. – pp. 1291–1295.
4. Conejo A.J. Self-Scheduling of a Hydro Producer in a Pool-Based Electricity Market / A.J. Conejo, J. M. Arroyo, J. Contreras, F.A. Villamor // *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, Issue 4, 2002. – pp. 1265–1272.
5. Abbas M. Fuzzy Logic Based Hydro-Electric Power Dam Control System / M. Abbas, M. Saleem Khan, Nasir Ali // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Volume 2, Issue 6, 2011.
6. Adhikary P. Safe and Efficient Control of Hydro Power Plant by Fuzzy Logic / P. Adhikary, P. K. Roy, A. Mazumdar // *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*. Volume 2, Issue 5, 2012. – pp. 1270–1277.
7. Джуржий П.О., Скалько Ю.С. Удосконалення групового регулювання гідроагрегатів з використанням нечіткої логіки // *Матеріали XVIII НТК «Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості»*. – Запоріжжя: ЗДІА, 2013. – С. 201.
8. Saaty T.L. Eigenweightor a logarithmic least squares // *European Journal of Operations Research*, 1990. – pp.156–160.
9. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 452 с.

Стаття надійшла до редакції 2.11.2015

Скалько Ю. С.

К.т.н., Запорожская государственная инженерная академия, Украина

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГРУППОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОВ ДНЕПРОВСКОЙ ГЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Разработана система группового регулирования гидроагрегатов ГЭС на базе нечеткой логики, которая рекомендует выбор агрегата для включения, исходя из основных параметров его текущего состояния и на основе экспертных оценок специалистов. Приведен пример расчета приоритетности включения гидроагрегата ДнепроГЭС-2 с использованием предложенной системы регулирования.

Ключевые слова: групповое регулирование, нечеткая логика, гидроагрегат, гидроэлектростанция.

Skal'ko Yu. S.

PhD, Zaporozhye State Engineering Academy

IMPROVEMENT OF DNIPROGES POWER GENERATOR GROUP CONTROL USING FUZZY LOGIC

Group control system for hydroelectric power plant is developed based on fuzzy logic. The system recommends selection of power generator for starting based on its current state and expert estimations. Example of priority calculation for DniproGES-2 using the proposed system is given.

Keywords: group control, fuzzy logic, power generator, hydroelectric power plant

REFERENCES

1. Siu T. K. A Practical Hydro Dynamic Unit Commitment and Loading Model, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, Issue 2, 2001, pp. 301–306.
2. Nilsson O. Hydro Unit start-up Costs and Their Impact on the Short Term Scheduling Strategies of Swedish Power Producers, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, Issue 1, 1997, pp. 38–44.
3. Shawwash Z. K. The B. C. Hydro Short Term Hydro Scheduling Optimization Model, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, Issue 3, 2000, pp. 1291–1295.
4. Conejo A. J. Self-Scheduling of a Hydro Producer in a Pool-Based Electricity Market, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, Issue 4, 2002., pp. 1265–1272.
5. Abbas M. Fuzzy Logic Based Hydro-Electric Power Dam Control System, *International Journal of Scientific &*

- Engineering Research*, Vol. 2, Issue 6, 2011.
6. Adhikary P. Safe and Efficient Control of Hydro Power Plant by Fuzzy Logic, *International Journal of Engineering Science & Advanced Technology*. Vol. 2, Issue 5, 2012, pp. 1270–1277.
7. Dzhurzhij P. O., Skal'ko Yu. S. Udoskonalennya grupovogo reguluyannya gidroagregativ z vikoristannyam nechitkoї logiki. Materiali XVIII NTK «Metalurgiya ta energozberezhennya yak osnova suchasnoi promislivosti». Zaporizhzhya: ZDIA, 2013, 201 p.
8. Saaty T. L. Eigenweightor a logarithmic least squares, *European Journal of Operations Research*, 1990, pp. 156–160.
9. Rutkovskaya D. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. Moscow, Goryachaya liniya Telekom, 2007, 452 s.