

## КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

О.А. Зайченко<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, Ю.В. Маруня<sup>1\*\*</sup>, канд. техн. наук, О.М. Рижков<sup>1\*\*\*</sup>, докт. філ., С.І. Гаврилюк<sup>1\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, О.І. Хомицький<sup>2</sup>, О.О. Харченко<sup>3\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net),

<sup>2</sup> ПП «ПРОМЕНЕРГІЯ»,  
пр. Шкільна, 11/18, м. Бучач, Тернопільська обл., 48400, Україна.

<sup>3</sup> НТУ України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,  
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.

*В роботі розглянуто способи підвищення енергоефективності мікрогідроелектростанцій. Запропоновано концепцію побудови гібридної системи керування, яка поєднує класичні закони регулювання та нечітку логіку, що дає змогу покращити якість регулювання параметрів виробленої електроенергії незалежно від зміни режимів роботи мережі та зовнішніх умов. Показано, що використання гібридних фільтрів дозволить підвищити електромагнітну сумісність та, у підсумку, енергоефективність системи в цілому. Бібл. 12, рис. 3.*

**Ключові слова:** гібридна система автоматичного керування, нечітка логіка, мікрогідроелектростанція, енергоефективність, гібридний фільтр.

**Вступ.** Масштабні атаки на об'єкти централізованого електроживлення створюють нові виклики для стабільного функціонування енергетики України, де особливо актуальним постає питання безперебійного забезпечення електроенергією важливої та критичної інфраструктури. Найбільш швидким рішенням даної проблеми є побудова автономних систем електроживлення із застосуванням дизель-генераторних установок. Але такі системи мають ряд суттєвих недоліків, серед яких велика питома вартість виробленої енергії, збільшений рівень шуму, велика забрудненість повітря, потреба в постійному постачанні палива, що ускладнюється логістичними перепонами різного характеру тощо. Таким чином, враховуючи енергетичну кризу, пов'язану зі скороченням органічного палива та зростанням цін на нього, стрімко зростаючими проблемами екології та світові тенденції щодо декарбонізації, децентралізації та діджиталізації (т.з. 3Д-стратегія), більш перспективними автономними системами електроживлення є ті, що використовують відновлювані первинні енергетичні ресурси [1]. Крім того, що є дуже важливо, ці системи можна буде використовувати і в післявоєнні часи. Тому, актуальною є задача розробки енергоефективної системи живлення на основі відновлюваних ресурсів, яка може працювати як автономно, так і на централізовану мережу. Варто відзначити, що суттєве місце серед відновлюваних джерел енергії, враховуючи економічно-доцільний потенціал нашої країни [2], займає енергія потоку води, яка має високу енергетичну щільність та відносну стабільність на відміну від, наприклад, енергії вітру та сонця, а завдяки більшій густині води в порівнянні з повітрям, має менші масогабаритні та вартісні показники гідротурбіни в порівнянні з вітровою установкою.

Задля підвищення енергоефективності автономних систем електроживлення розробники застосовують різні типи генераторів, комбіновані методи керування та гібридні структури, що можуть поєднувати в собі різні типи первинної енергії та накопичувачі енергії. Так, використання різних видів первинної енергії дає можливість створити системи, які здатні працювати без додаткових резервних дизель-генераторів. Розробники [3] пропонують систему живлення на основі включених паралельно гідрогенератора і вітрогенератора та акумулятора в колі перетворювача частоти, де як гідроген-

© Зайченко О.А., Маруня Ю.В., Рижков О.М., Гаврилюк С.І., Хомицький О.І., Харченко О.О., 2024

ORCID: \* <https://orcid.org/0000-0001-9311-3378>; \*\* <https://orcid.org/0000-0003-0071-1702>;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-0011-9402>; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-7345-8405>;

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0009-0008-7144-5863>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

нератор використовується асинхронна машина з конденсаторним збудженням, а замість вітрогенератора – синхронна із постійними магнітами та перетворювачем частоти у колі статора. В [4] розроблено імітаційну модель та алгоритм керування автономною гідровітровою системою електроживлення з активним випрямлячем і баластним навантаженням задля забезпечення необхідної частоти струму.

В агрегатах мікростанцій використовують асинхронні та синхронні генератори змінного струму. Але незважаючи на більші габаритні розміри, масу та, як наслідок, вартість синхронних генераторів, менша потужність збудження, простота збуджуючих та регулюючих пристроїв, більша надійність надає їм перевагу у застосуванні. Синхронні генератори здатні генерувати реактивну потужність, і їх використовують в мережах із значною часткою навантаження на них та в автономних системах навіть за великій частці індуктивного навантаження [5].

**Метою роботи** є обґрунтування доцільності застосування гібридних методів керування, що поєднують класичні закони регулювання та нечітку логіку задля підвищення енергоефективності мікрогідроелектростанцій.

Зазвичай мікрогідроелектростанції (надалі мікростанції) складаються з гідротурбіни, електромашинного генератора, системи стабілізації параметрів вихідної напруги та містять інші додаткові елементи. Мікростанції не потребують спорудження складних гідротехнічних гребель, тому турбіни розміщують у вільному потоці води або в спеціальному напірному трубопроводі, що дає змогу підвищити енергію потоку води та застосовувати більш ефективні реактивні гідротурбіни. Потужність гідротурбіни визначається виразом

$$P_m = m_0 \cdot Q \cdot H \cdot \eta, \quad (1)$$

де  $m_0$ ,  $(\text{кг} \times \text{м} / \text{с}^2) / \text{м}^3$  – питома вага одиниці об'єму води;  $Q$ ,  $\text{м}^3 / \text{с}$  – витрати води;  $H$ ,  $\text{м}$  – робочий напір;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії турбіни.

Потужність та частота обертання гідротурбіни визначають розрахункову потужність генератора, його масу, габаритні розміри та вартість. Ці параметри пов'язані між собою співвідношенням [6]

$$\frac{d^2 \cdot l_\delta \cdot \omega}{S} = k_p \frac{1}{A \cdot B_\delta}, \quad (2)$$

де  $d$ ,  $\text{м}$  – внутрішній діаметр статора електричної машини;  $l_\delta$ ,  $\text{м}$  – розрахункова довжина повітряного проміжку;  $S$ ,  $\text{ВА}$  – розрахункова повна потужність;  $\omega$ ,  $\text{с}^{-1}$  – частота обертання;  $A$ ,  $\text{Н}$  – лінійне навантаження;  $B_\delta$ ,  $\text{Тл}$  – магнітна індукція в повітряному проміжку;  $k_p$ ,  $\text{м}^2 \text{Тл}$  – коефіцієнт пропорційності.

Об'єм генератора, що характеризується добутком  $d^2 l_\delta$ , визначається частотою обертання  $\omega$  за відносно постійних значеннях розрахункової потужності та електромагнітних навантажень. Завдяки чому швидкохідні гідротурбіни дозволяють використовувати генератори з відносно невеликими масогабаритними показниками та низькою вартістю.

Рівняння руху системи «гідротурбіна – генератор» має вигляд

$$M_t = M_g + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

де  $M_t$ ,  $\text{Н} \times \text{м}$  – механічний момент гідротурбіни;  $M_g$ ,  $\text{Н} \times \text{м}$  – момент опору генератора,  $J$ ,  $\text{кг} \times \text{м}^2$  – момент інерції.

Статична стійкість системи та похибка стабілізації частоти її обертання визначаються сумарним коефіцієнтом саморегулювання

$$e_\Sigma = e_g - e_t, \quad e_g = \frac{dM_g}{d\omega} \cdot \frac{M_{gn}}{\omega_n}, \quad e_t = \frac{dM_t}{d\omega} \cdot \frac{M_m}{\omega_n}, \quad (4)$$

де  $e_g$ ,  $e_t$ ,  $\text{Н}^2 \times \text{м}^2 / \text{с}^2$  – коефіцієнти саморегулювання генератора та гідротурбіни відповідно;  $M_{gn}$ ,  $M_m$ ,  $\text{Н} \times \text{м}$  – номінальні моменти генератора та гідротурбіни;  $\omega_n$ ,  $\text{с}^{-1}$  – номінальна частота обертання. Для стійкої роботи системи сумарний коефіцієнт саморегулювання повинен мати додатне значення.

Розрахунок та оптимізація описаних вище параметрів дають змогу підвищувати енергоефективність обладнання мікростанції, проте також це можна робити за допомогою методів керування параметрами системи та у разі використання технічних засобів, що дозволять покращити якість регулювання електричних і технологічних параметрів із забезпеченням заданих вимог до електромагнітної сумісності з навантаженням. В сучасних умовах інтеграції енергосистеми України в Європейську

особливо виникає потреба у підвищенні енергетичної ефективності та зменшенні енерговитрат на виробництво одиниці електроенергії та збільшенні технологічної ефективності, тобто в істотному підвищенні її якості. Значення сумарних гармонійних спотворень (*THD*) струмів, що передаються в навантаження і безпосередньо впливають на якість електроенергії, не повинні зазвичай перевищувати 5%. Наявність в системі мікростанції значної кількості різних напівпровідникових перетворювачів та споживання виробленої електроенергії нелінійними споживачами (різного типу навантажень) унеможлиблює дотримання нормативних вимог до якості електроенергії [7] без спеціальних пристроїв, які б покращували параметри електромагнітної сумісності. Відомі технічні рішення базуються в основному на використанні пасивних або активних фільтрів, що характеризуються різними властивостями, які пов'язані зокрема з частотою перетвореної активним фільтром потужності, рівнем приглушення вищих гармонік струму, встановленою потужністю реактивних елементів, можливістю їх застосування для групи нелінійних споживачів. Створення спеціальних пристроїв та використання різних топологій фільтрів, що забезпечують узгодження мікростанцій з навантаженням, передбачає вибір раціональних структур фільтрів та, за потребою, проведення оптимізації їхніх елементів в залежності від заданих показників якості з урахуванням параметрів системи електропостачання і навантаження. Хоча існує багато топологій фільтрів, пасивні фільтри типу *L* і *LCL* є найбільш часто використовуваними топологіями в мережевих системах, основною перевагою яких є простота та надійність, проте вони можуть мати достатньо великі масогабаритні параметри для отримання кращого рівня фільтрації, а тому і високу вартість за достатньо слабкому фільтруючому ефекті. Задля усунення наведених недоліків пропонується використовувати гібридні фільтри [8, 9]. На рис. 1 зображена схема трифазного гібридного фільтра, що складається з паралельного активного (АФ) та послідовного пасивного (ПФ) фільтрів. Така конфігурація гібридного фільтра працює головним чином так, що основну частку фільтрування струму, що споживається навантаженням, виконує пасивна частина гібридного фільтра, а активна його частина розраховується на значно меншу частину потужності ( $I_{a\phi} \ll I_{n\phi}$ ), чим в індивідуальному виконанні, та відфільтровує струм вже достатньо близької до синусоїди форми до будь-яких низьких значень *THD*.

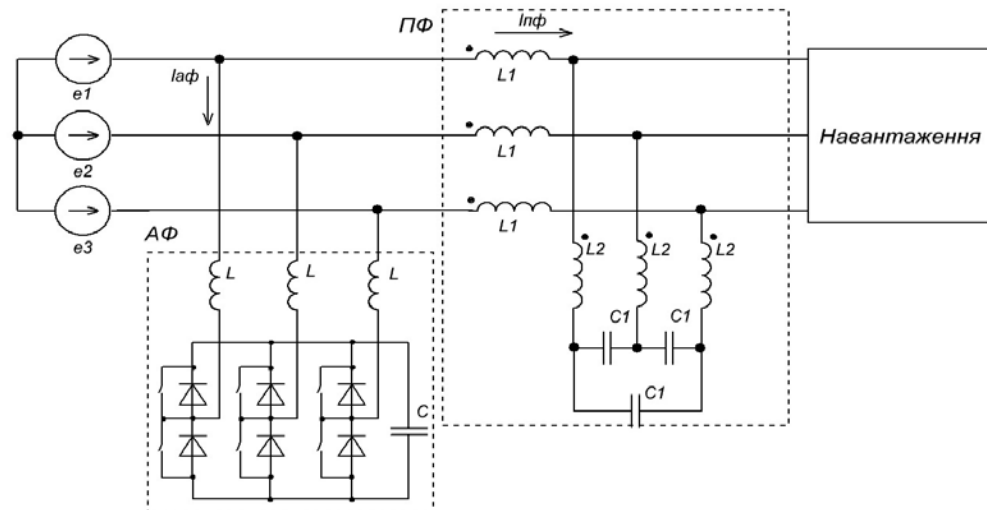


Рис. 1

Значним кроком в розвитку автоматизації систем керування стала інтелектуалізація керування системами електроживлення, де окрім класичних методів регулювання параметрами системи, застосовуються інтелектуальні методи [10], використання яких надає можливість підтримувати задану стабільність та якість вихідних параметрів системи незалежно від характеру та зміни навантаження і впливу зовнішніх умов.

На рис. 2 зображено функціональну схему живлення обмотки збудження автономної мікрогідроелектростанції, яка включає наступні елементи: гідрогенератор (обмотка збудження, складова частина генератора) та регулюючі пристрої (контролери або системи автоматичного регулювання, які контролюють потужність і напругу, що надходить до обмотки збудження, задля оптимізації роботи

генератора в різних умовах). Ця схема впливає на ефективність та стабільність роботи мікростанції, дозволяючи забезпечити постійне живлення обмотки збудження незалежно від умов роботи станції. Сучасні технічні засоби автоматичного керування технологічними процесами розробляються таким чином, щоб сприяти підвищенню ефективності керування технологічними об'єктами з якісним регулюванням [11, 12], проте цьому перешкоджають чинники, що впливають на систему регулювання: нестабільність параметрів об'єкта керування в процесі роботи та вимоги до якості регулювання, які постійно змінюються. Задля подолання таких недоліків пропонується розробити нову концепцію побудови гібридного керування мікростанції, де будуть використовуватися дані, отримані під час реалізації класичного алгоритму, і використовуватимуться в подальшому для формування бази правил при синтезі і моделюванні нечіткої моделі.

До сучасних систем пред'являються підвищені вимоги, викликані необхідністю забезпечення адекватної підтримки заданого режиму регулювання параметрами за точній та миттєвій реакції виконавчого органу системи регулювання на порушення системи живлення під впливом зовнішніх факторів. Тому прийняття рішення керування має виконуватися, виходячи з всебічного аналізу параметрів електричної мережі. Правильна організація структури та взаємодії всіх елементів нечіткої системи з урахуванням вхідних параметрів впливу та аналізом властивостей і законів функціонування кожного компонента є запорукою прийняття успішного рішення керування силовим виконавчим органом. Рішення керування повинне прийматися, виходячи з всебічного аналізу, взаємозв'язок повинен формуватися на етапі розробки концепції побудови всіх складових на основі моделювання: як нечіткого логічного контролера, так і всієї системи в цілому.

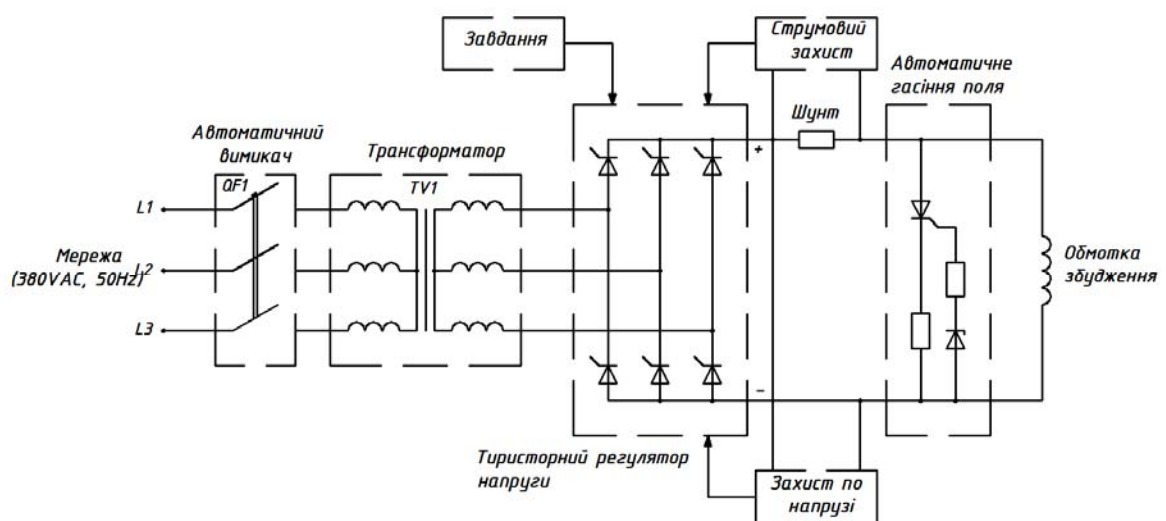


Рис. 2

Гібридну структуру необхідно розглядати як систему обробки та взаємодії даних, що складається з двох рівнів. Перший рівень представлений традиційним формально-логічним мисленням і заснований на методах класичної теорії керування. На другому рівні використовується нечітке моделювання, яке формує керування на основі нечіткої логіки з метою отримання якісного керуючого впливу на об'єкт за зміни його параметрів і дає можливість разом з отриманими результатами першого рівня досліджувати різні аспекти невизначеності. Дворівневе позиціонування дає змогу розглядати загальну структуру системи обробки даних з різних сторін, водночас взаємодія елементів (компонентів) структури носить не тільки механічний або електричний характер, а й інформаційний, що є важливим атрибутом сучасних організаційно-технічних систем. Аналіз розробок гібридних систем керування дає змогу зробити висновок про те, що застосовані в межах гібридних систем моделі реалізуються окремо залежно від поставленої мети. Зокрема, в [11] була запропонована гібридна система живлення обмоток електромагнітного сепаратора роторного типу, з урахуванням неповної визначеності параметрів навантаження, яка заснована на спільному використанні класичного і нечіткого регуляторів.

Таке уявлення має ряд недоліків. Нечіткі системи в порівнянні з традиційними системами мають кращі перешкодозахищеність, швидкодію і точність за рахунок більш адекватного опису середовища функціонування і здатні в певний момент доповнити або замінити їх. Однак нестабільність і

великий обсяг контрольованих і регульованих параметрів призводить до зниження якості регулювання, навіть у разі використання нечіткої системи. Основним фактором, що впливає на якість регулювання, є те, що формування бази правил (бази знань) для нечіткого регулятора відбувається експертним шляхом. При цьому необхідно враховувати компетентність і професіоналізм експерта в даній області. Задля подолання таких недоліків пропонується використовувати знання (дані), отримані під час реалізації класичного алгоритму керування і використання їх для формування бази правил при синтезі і моделюванні нечіткої моделі. Таким чином, гібридна система може бути представлена у вигляді блок-схеми на рис. 3. Ідея нової концепції побудови гібридного керування автономною мікростанцією полягає у формуванні структури знань системи на базі вже попередньо відомих даних, але вже з урахуванням можливих нових змінних з використанням інтелектуальних підходів для автоматичного прогнозу варіювання змінними без участі експертної оцінки ситуації.

Вхідними даними можуть бути фактично будь-які параметри системи, але зазвичай, такими є напруга генератора або частота напруги в автономній мережі. Як вже зазначалося, перевагою запропонованої гібридної моделі є те, що вона дає змогу здійснювати регулювання не тільки основного параметра, а й вводити будь-яку кількість додаткових каналів, наприклад, керувати силовими ключами активної частини гібридного фільтра (рис. 1), що дозволяє оптимізувати та підвищити енергоефективність системи в цілому. Під час регулювання головного параметру можливо враховувати, в тому числі, рівняння руху (3) та статичної стійкості (4) чи враховувати будь-які зовнішні збурення. На сьогоднішній день реалізація алгоритмів керування в системах генерації [1, 3, 4] здійснюється шляхом використання регуляторів з лінійними неперервними класичними пропорційно-інтегрально-диференціальними законами. Але за відсутності повної та достовірної інформації параметрів мережі призводить до ускладнення структури регулятора, труднощів його налагодження та експлуатації. У разі використання лінійних регуляторів у системах генерації з нестационарними процесами, що призводять до нелінійної зміни параметрів регулювання, виникає необхідність вирішення задач визначення та багаторазового коригування коефіцієнтів, зменшення динамічної похибки та тривалості перехідних процесів. Запропонована гібридна система дає можливість позбутися багаторазового коригування коефіцієнтів керування та забезпечити якість параметрів генератора, в тому числі напруги, струму, частоти, незалежно від нелінійності і можливих флуктуацій навантаження та мережі в цілому.

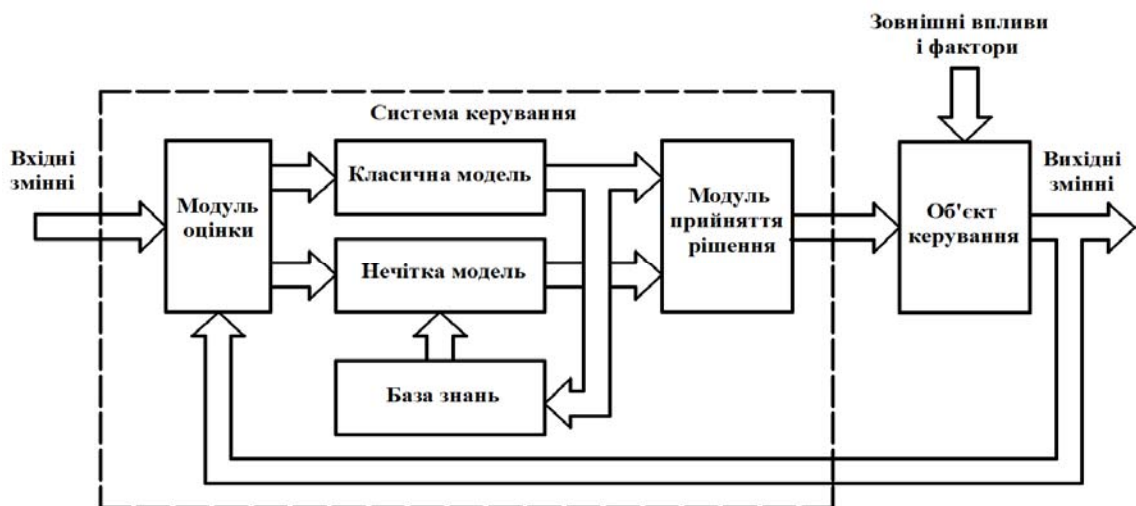


Рис. 3

**Висновки.** Запропонована концепція побудови гібридної системи керування мікрогідроелектростанцією, де окрім застосування класичних законів використовується нечітка логіка, що дає змогу завдяки здатності адаптації до зміни режимів роботи мережі та зовнішніх умов, покращити якість регулювання параметрів. Крім того, для забезпечення заданих показників якості генерованої напруги та струму, тобто електромагнітної сумісності, та, у підсумку, підвищення енергоефективності системи в цілому, запропоновано використання гібридних фільтрів, побудованих на основі комбінованої пасивної та активної схемотехніки.

Роботу виконано за державною науково-дослідною темою «Розробити засоби та алгоритми керування напругою, струмом і частотою в гібридних системах живлення електротехнологічних установок при неповній визначеності параметрів навантаження» («База-П9»), державний реєстраційний номер 0122U001808 та науковим проектом «Розвиток методів і засобів підвищення ефективності та резильєнтності локальних децентралізованих електроенергетичних систем в Україні» («Резильєнтність-24») за договором №19/01-2024(5) від 19.02.2024 р.

1. Васько П.Ф., Вербовий А.П., Ібрагімова М.Р., Пазич С.Т. Гідроаккумуляційні електростанції – технологічна основа інтеграції потужних вітро- та фотоелектричних станцій до складу електроенергетичної системи України. *Гідроенергетика України*. 2017. № 1-2. С. 20-25.
2. 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> (дата звернення 01.04.2024)
3. Goel P.K., Singh B., Murthy S.S., Kishore N. Autonomous hybrid system using SCIG for hydro power generation and variable speed PMSG for wind power generation. *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Taipei. 2009. Pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2009.5385678>.
4. Мазуренко Л.І., Василів К.М., Джура О.В., Коцюруба А.В. Імітаційна модель та алгоритм керування автономною гідровітровою системою електроживлення. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 1. С. 17-26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.017>.
5. 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](https://energypedia.info/images/4/4a/Part_2_guide_on_how_to_develop_a_small_hydropower_plant_final-21.pdf) (available at 01.04.2024)
6. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. *Энергия*. 1980. 496 с.
7. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). ДСТУ EN 50160:2023
8. Губаревич В.М., Маруня Ю.В. Однофазний гібридний фільтр для децентралізованих систем електропостачання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. № 59. С. 99-103. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.099>.
9. Волков І.В., Подольний С.В., Маруня Ю.В. Порівняльний аналіз пасивних, активних та гібридних фільтрів гармонік струму для частотно-регульованого електроприводу. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С. 40-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.040>.
10. Кирик В.В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво Політехніка. 2019. 224 с.
11. Зайченко О.А., Рижков О.М., Гаврилюк С.І. Гібридна система живлення обмоток електромагнітного сепаратора роторного типу за неповної визначеності параметрів навантаження. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. № 62. С. 41-47. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.041>.
12. Стяжкін В.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.І., Теряев В.І., Красношапка Н.Д. Комбіноване керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени суднової радіолокаційної станції з нечітким регулятором швидкості. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 3. С. 60-67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.060>.

## CONCEPT OF BUILDING A HYBRID CONTROL SYSTEM FOR A MICROHYDROELECTRICAL PLANT

**О.А. Zaichenko<sup>1</sup>, Yu.V. Marunia<sup>1</sup>, O.M. Ryzhkov<sup>1</sup>, S.I. Gavryluk<sup>1</sup>, O.I. Homicky<sup>2</sup>, O.O. Kharchenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,  
e-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net).

<sup>2</sup>Private Enterprise «PROMENERIA»,  
Shkilna, 11/18, Buchach, Ternopil reg., 48400, Ukraine.

<sup>3</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,  
Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

*Methods of increasing the energy efficiency of micro-hydroelectric power plants are considered in the work. A new hybrid concept of building a control system is proposed, which combines classical control laws and fuzzy logic. This makes it possible to improve the quality of the regulation of the parameters of the generated electricity regardless of changes in network operation modes and external conditions. It is shown that the use of hybrid filters will allow to increase the electromagnetic compatibility and, as a result, the energy efficiency of the system as a whole. References 12, figures 3.*



**Keywords:** hybrid automatic control system, fuzzy logic, autonomous micro-hydroelectric power plant, energy efficiency.

1. Vasko P.F., Verbovyi A.P., Ibrahimova M.R., Pazich S.T. Hydro-storage power plants are the technological basis for the integration of powerful wind and solar power plants into the power system of Ukraine. *Hydroenerhetykar Ukrainy*. 2017. No 1-2. Pp. 20-25. (Ukr)
2. Vovchak, V., Teslenko, O., Samchenko, O. (2018). Small hydropower industry of Ukraine. Analytical review. Vol. I. URL: <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES1.pdf> (available at 01.04.2024) (Ukr)
3. Goel P.K., Singh B., Murthy S.S., Kishore N. Autonomous hybrid system using SCIG for hydro power generation and variable speed PMSG for wind power generation. 2009 *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Taipei. 2009. Pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2009.5385678>.
4. Mazurenko L.I., Vasylov K.M., Jura O.V., Kotsyruba A.V. Simulation model and control algorithm of an autonomous hydro-wind power supply system. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 17-26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.01.017> (Ukr)
5. 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](https://energypedia.info/images/4/4a/Part_2_guide_on_how_to_develop_a_small_hydropower_plant-final-21.pdf) (accessed at 01.04.2024)
6. Kopylov I.P. Design of electric machines. Energy. 1980. 496 p. (Rus)
7. Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks (EN 50160:2022, IDT). DSTU EN 50160:2023 (Ukr)
8. Gubarevich V.M., Marunya Yu.V. Single-phase hybrid filter for decentralized power supply systems. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2021. No 59. Pp. 99-103. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.099>. (Ukr)
9. Volkov I.V., Podolnyi S.V., Marunya Yu.V. Comparative analysis of passive, active and hybrid filters of current harmonics for a frequency-regulated electric drive. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 40-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.03.040>. (Ukr)
10. Kirik V.V. Mathematical apparatus of artificial intelligence in electric power systems. Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, Polytechnic Publishing House. 2019. 224 p. (Ukr)
11. Zaichenko O.A., Ryzhkov O.M, Gavrilyuk S.I. Hybrid power supply system for the windings of the rotor-type electromagnetic separator with incomplete determination of the load parameters. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2022. No 62. Pp. 41-47. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.041>. (Ukr)
12. Styazhkin V.P., Zaichenko O.A., Gavrilyuk S.I., Teryaev V.I., Krasnoshapka N.D. Combined control of the gearless arc stator electric drive of the ship's radar station antenna with a fuzzy speed controller. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2023. No 3. Pp. 60-67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2023.03.060>. (Ukr)

Надійшла 30.04.2024