

*Прилуцький Є.В.*

Українська інженерно-педагогічна академія

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ МІКРОГІДРОЕЛЕКТРОСТАЦІЙ ПІД ЧАС ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ НА АВТОНОМНІ МЕРЕЖІ

*У статті проведений аналіз проблем роботи мікрогідроелектростанцій (мікроГЕС) під час роботи на автономні електричні мережі, проведене дослідження енергетичних характеристик роботи мікроГЕС під час роботи на автономні електричні мережі. Розподіл навантаження між генераторами електростанцій залежить від значень коефіцієнтів саморегулювання приводних гідротурбін і діапазону зміни еквівалентного навантаження станції. Похибка стабілізації напруги паралельно працюючих асинхронних генераторів визначається відхиленням еквівалентного навантаження від номінальних значень і в загальному випадку відповідає аналогічним значенням для автономних станцій.*

**Ключові слова:** енергозбереження, гідроенергетика, енергетичні характеристики, автономні енергетичні установки, енергоефективність, нетрадиційна енергетика, енергетика України.

**Постановка проблеми.** Принципово процес перетворення механічної енергії потоку води в електричний струм може здійснюватися за допомогою досить широкого набору пристроїв, у тому числі і не призначених спеціально для застосування в мікроГЕС. Проблема полягає в оптимізації цього перетворення з метою отримання якнайкращих споживчих і експлуатаційних властивостей енергоустановок.

У гідроелектростанціях класу «мікро» спостерігається тенденція до деякого ускладнення електричної частини установок, яка здебільшого здійснює одночасно і функції стабілізації виробленої електроенергії за рахунок відповідного спрощення гідротехнічного устаткування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Необхідність пошуку альтернативних джерел енергії зумовлена вичерпністю паливних корисних копалин і антиекологічним характером їх використання, обмеженістю гідроресурсів та загрозою затоплення території, відсутністю достатніх гарантій повної безпеки атомних електростанцій. Питання екології належать до глобальних проблем людства, але в кожному окремо взятому регіоні вони мають свої особливості.

Одним зі способів підвищення ефективності мікроГЕС є їх об'єднання в АСЕП. Включення декількох станцій на паралельну роботу дає змогу повторно використовувати енергію водяного потоку, а збільшення числа споживачів вирівнює графік навантаження енергосистеми.

Процес включення мікроГЕС на паралельну роботу не відрізняється від загальноприйнятого [2, 4]:

- напруга генератора, що включається, має бути рівна напрузі вже працюючого генератора;
- частоти генераторів мають бути однаковими;
- чергування фаз генераторів має бути однаковим;
- напруги працюючих генераторів, що включаються, мають збігатися за фазами.

Ці вимоги мають строго виконуватися для синхронних машин. Включення асинхронних генераторів на паралельну роботу допускає великі відхилення напруги і частоти від ідеальних умов. Процес синхронізації асинхронних генераторів при цьому спрощується і знижується час на проведення операції. Для асинхронних генераторів з нерегульованим ємкісним збудженням коефіцієнт саморегулювання перебуває в межах 0,1...0,3. Коефіцієнт саморегулювання відцентрових насосів, що працюють у турбінному режимі, становить  $e_r = -(2,5 \dots 6,5)$ , що забезпечує великий запас стійкості автономних мікроГЕС і систем електропостачання з декількох установок, що працюють на загальне навантаження. Вимоги максимального спрощення конструкції мікроГЕС і її обслуговування зумовлюють вибір саме асинхронних електричних машин для побудови локальної електричної мережі.

**Постановка завдання.** У роботі проведений аналіз проблем мікроГЕС під час роботи на автономні електричні мережі, проведене дослідження енергетичних характеристик роботи мікроГЕС під час роботи на автономні електричні мережі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Під час об'єднання декількох мікроГЕС у

локальну електричну мережу виникає додаткова проблема рівномірного завантаження гідроагрегатів, що працюють на загальне навантаження. На великих ГЕС навантаження між агрегатами зазвичай розподіляють за допомогою регулювання потужності приводних двигунів. У мікроГЕС з нерегульованими турбінами стабілізувати робочий режим енергосистеми можна тільки з боку навантаження.

Розглянуті вище автобаластні системи стабілізації автономних мікроГЕС дають підставу припустити можливість їх застосування у разі побудови АСЕП. Створення уніфікованої конструкції мікроГЕС, здатної працювати як в автономному режимі, так і у складі локальної електричної мережі, дає безперечні переваги для гнучкішого вибору можливого варіанту електропостачання з урахуванням географічних особливостей місця розташування станцій, типу і характеру навантажень, вимог до якості електроенергії, що генерується, і так далі.

Можливі два основні варіанти побудови АСЕП на основі автобаластних систем стабілізації.

У першому варіанті гідроагрегати  $T_1 - G_1, T_2 - G_2 \dots T_n - G_n$  працюють на загальне навантаження  $H$  (рис. 1).

Регулятор баластного навантаження РБН перерозподіляє струм між корисним  $H$  і баластним навантаженням БН так, щоб сумарний струм, що віддається генераторами, був приблизно постійним. За такої схеми включення регулятор баластного навантаження аналогічний регуляторам для автономних режимів, і тому можуть використовуватися струмові і частотні схеми стабілізації параметрів. Розподіл навантаження між генераторами в загальному випадку залежатиме тільки від співвідношення їх внутрішніх опорів і похибки стабілізації еквівалентного навантаження всієї системи.

Інший варіант паралельного включення мікроГЕС передбачає використання індивідуальних автобаластних систем. Цей варіант легко отримати шляхом простого об'єднання автономних станцій, що діють (рис. 2).

Проведені дослідження показали, що забезпечити стійкий режим роботи АСЕП за такої побудови досить складно. Відмінності в потужностях баластних навантажень, коефіцієнтах посилення, постійних часу і в інших параметрах стабілізуючих систем і гідроелектроагрегатів приводять до змін сумарного навантаження АСЕП у значно ширших межах, ніж потрібно для стабілізації робочих режимів станції.

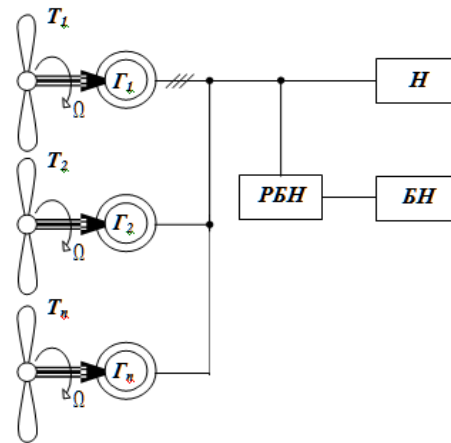


Рис. 1. Структурна схема автономної системи електропостачання з одним регулятором баластного навантаження

Перспективним способом підключення індивідуальних регуляторів баластних навантажень є модифікація першого варіанту побудови АСЕП (рис. 2).

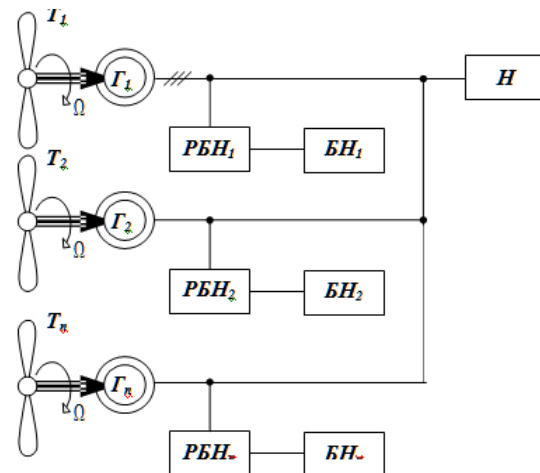


Рис. 2. Структурна схема автономної системи електропостачання з індивідуальними регуляторами баластного навантаження

Особливістю такої схеми є можливість гнучкішого регулювання потужності баласту. Якщо поєднувати фазове регулювання з дискретним включенням дозованих ступенів баластного навантаження, то фазове регулювання здійснюватиметься тільки на одному ступені баластного навантаження, тоді як решта ступенів комутуватиметься тиристорними ключами.

Застосування в АСЕП асинхронних генераторів з ємкісним збудженням обмежує можливості з регулювання збудження. При цьому величина напруги безпосередньо залежить від можливого діапазону зміни еквівалентного навантаження станції.

На рис. 3 наведена структурна схема автономної системи електропостачання з багатоступінчастим регулятором баластного навантаження.

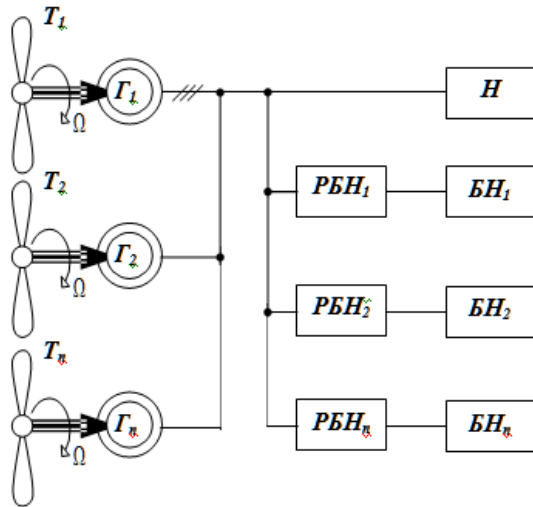


Рис. 3. Структурна схема автономної системи електропостачання з багатоступінчастим регулятором баластного навантаження

На рис. 4 наведені розрахункові криві зміни вихідних електричних параметрів АСЕП, побудованої на базі двох гідроагрегатів рівної потужності, за зміни корисного навантаження від холостого ходу до номінального значення. Номінальний коефіцієнт потужності корисного навантаження = 1,0.

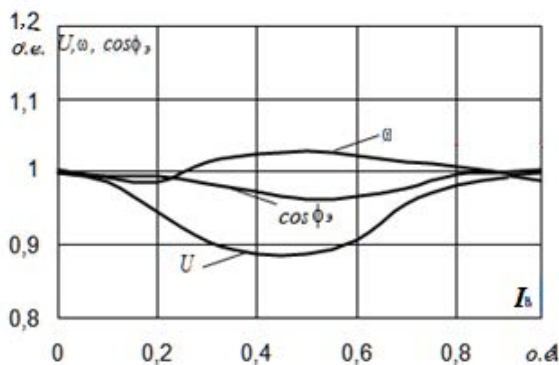


Рис. 4. Залежність вихідних параметрів АСЕП  $\cos \phi$  від струму корисного навантаження ( $\cos \phi = \cos \phi_b = 1,0$ )

Коефіцієнти саморегулювання гідротурбін рівні  $e_{r1} = e_{r2} = -5,45$ . Як регулятор використовувалися біполярні осередки тиристорів, залежність кутів управління тиристорами яких описується виразом:

$$\alpha = \pi \frac{I}{I_{ном}}, \text{ рад}$$

де  $I, I_{ном}$  – поточне і номінальне значення струму корисного навантаження.

З рис. 4 видно, що найбільші відхилення вихідних параметрів щодо номінальних значень мають місце за 50% навантаження АСЕП. Пояснюється це тим, що в цьому режимі еквівалентне навантаження має яскраво виражений активно-індуктивний характер з мінімально можливим значенням  $\cos \phi$ . Реактивна енергія, що виробляється батареєю конденсаторів, витрачається при цьому не тільки на збудження генератора, але і на покриття індуктивною складовою частиною струму еквівалентного навантаження. За незмінної величини ємкості конденсаторів, що збуджують, відбувається зменшення струмів генераторів, що намагнічують, що приводить до падіння напруги в мережі. Це викликає зменшення струму корисного навантаження, яке не повною мірою компенсується струмом баластного навантаження. В результаті сумарний гальмівний момент генераторів зменшується, і гідроагрегати розганяються. Виходить замкнута система регулювання з позитивним зворотним зв'язком.

Похибка стабілізації в такому разі становить  $\pm 12,1\%$  для напруги і  $\pm 3,5\%$  – для частоти щодо номінальних значень.

Ослабити позитивний зворотний зв'язок дає змогу введення в закон управління вентилями регулятора корекції по напрузі:

$$\alpha = \pi \frac{I}{I_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}}{U} \cdot \text{рад}$$

Похибка стабілізації напруги при цьому зменшується по частоті від значень  $\pm 9,0\%$  до значень  $\pm 2,5\%$ .

Введення каналу регулювання збудження генераторів може підвищити точність стабілізації напруги в АСЕП. Але можливості з регулювання напруги асинхронних машин сильно обмежені. У разі використання джерелом реактивної потужності напівпровідникових перетворювачів відбувається значне ускладнення і дорожчання установки. Конденсатори з нелінійною ємкістю (варіконди) мають значно гірші масогабаритні показники порівняно зі звичайними і обмежений діапазон робочих температур. До того ж їхні параметри сильно залежать від постійної і змінної складових частин напруги, що негативно позначається у разі їх спільної роботи з регуляторами тиристорів в якірному ланцюзі генератора.

Ефективніший спосіб регулювання напруги асинхронного генератора шляхом підмагнічування спинки статора. Для цього на статорі електричної машини укладається додаткова обмотка постійного струму. У разі зміни струму підмагнічування міняється ступінь насичення сердечника статора і відповідно положення кривої намагнічування. Зазвичай

струм підмагнічування максимальний у режимі холостого ходу і зменшується зі збільшенням навантаження. Як один з варіантів формування струму підмагнічування можливе використання постійного складника струму баластного навантаження. Очевидно, що цей спосіб регулювання напруги асинхронного генератора вимагає спеціальної конструкції електричної машини, значно ускладнює і здорожчує загальну схему установки.

Спосіб штучного формування механічної характеристики генератора для підвищення точності стабілізації, використовуваний в автономних мікроГЕС на базі синхронного генератора, у такому разі ефекту не дає, оскільки за одноканального регулювання забезпечити незмінність немає можливості.

На рис. 5 представлені експериментальні залежності зміни вихідних електричних параметрів мікроГЕС, побудованої на основі асинхронної машини 4А112М4У3 ( $P=5,5$  кВт, ККД=0,855,  $\cos\phi_{\text{ном}}=0,85$ ), з приводом від двигуна постійного струму, жорсткість механічної характеристики якого відповідає  $e_{\tau} = -3,75$ . Потужність корисного і баластного навантажень дорівнювала 4,5 кВт, регулювання баластного навантаження здійснювалося вручну за допомогою біполярних осередків тиристорів шляхом подачі замикаючої напруги на схему порівняння. Величина ємкості збудливих конденсаторів, сполучених у зірку, становила 101 мкФ/фазу.

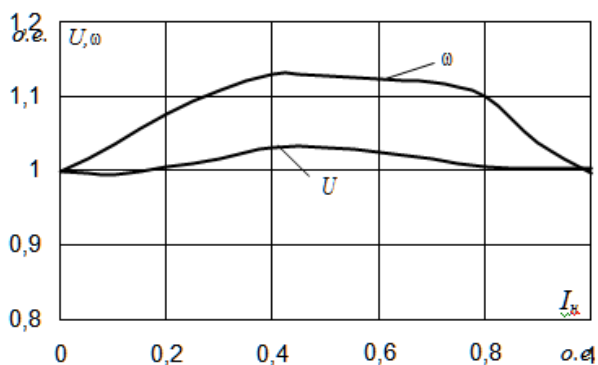


Рис. 5. Вихідні параметри АСЕП за оптимального закону управління тиристорами РБН

Оптимальний закон управління тиристорами регулятора в експерименті формувався за умови мінімально можливого відхилення величини напруги від номінального. При цьому вдається забезпечити стабілізацію напруги з похибкою не більш  $\pm 3\%$ , проте відхилення частоти обертання генератора зростає до 14%. Одним з чинників, що роблять істотний вплив на відхилення величини і характеру еквівалентного навантаження від номінальних значень (відповідно величини і частоти

напруги, що генерується), є величина баластного опору. На рис. 6 показані залежності відхилення параметрів напруги, що генерується, і коефіцієнта потужності еквівалентного навантаження від величини корисного навантаження. Найбільш характерними для оцінки якості регулювання параметрів мікроГЕС є режим холостого ходу, коли станція працює тільки на  $R_{\sigma}$ , і режими, близькі до 50% навантаження, що відповідає максимальній погрішності стабілізації еквівалентного опору. У цьому прикладі АСЕП побудована на базі двох асинхронних генераторів однакової потужності 5,5 кВт, коефіцієнти саморегулювання приводів однакові і рівні  $e_{\tau 1} = e_{\tau 2} = -5,45$ , номінальний коефіцієнт потужності корисного навантаження  $\cos\phi_n = 0,8$ . Баластне навантаження чисто активне  $\cos\phi_{\sigma} = 1,0$ .

Величина баластного опору вибиралася з міркувань рівності активної потужності в номінальному режимі і режимі холостого ходу. Змінна величина корисного активно-індуктивного навантаження викликає зміну коефіцієнта потужності еквівалентного навантаження від  $\cos\phi_n = 0,8$  до  $\cos\phi_{\sigma} = 1,0$ . Оскільки величина збудливих ємкостей генераторів у всіх режимах залишається незмінною, струми генераторів у режимі холостого ходу зростають більш ніж на 20% порівняно з номінальними. Для обмеження струмових перевантажень якірних обмоток генераторів, що працюють на активно-індуктивне навантаження, доцільно зменшувати завантаження машин у номінальному режимі на 15...20%, тобто величина баластного опору має вибиратися на 20...25% більше номінального опору корисного навантаження.

Важливою особливістю паралельної роботи асинхронних генераторів з приводом від гідротурбін сумарної потужності є залежність розподілу завантаження між ними від жорсткості механічних характеристик.

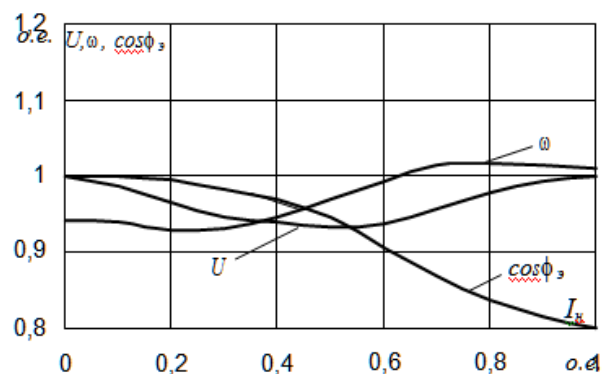


Рис. 6. Залежність вихідних параметрів АСЕП від струму корисного навантаження ( $\cos\phi_n = 0,8$ ;  $\cos\phi_{\sigma} = 1,0$ )



Як приклад розглянемо випадок, коли потужності турбін у номінальному режимі рівні, але їх коефіцієнти саморегулювання різні. Цьому відповідають залежності  $M_{mi} = f(\Omega_i)$ , представлені на рис. 7. Якщо нехтувати ковзанням генераторів, то можна вважати, що гідроагрегати мають однакову частоту обертів. Тоді в номінальному режимі, відповідному на рис. 7 значенню  $\Omega_n$ , моменти, що розвиваються турбінами, рівні  $M_1 = M_2 = M_n$ .

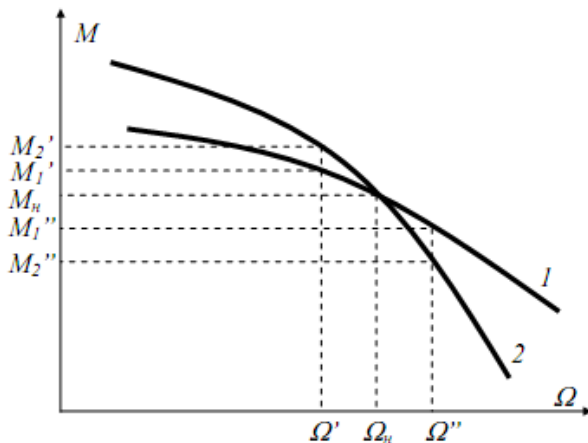


Рис. 7. Розподіл навантаження між двома паралельно працюючими гідроагрегатами за зміни частоти обертів

Тоді для нового значення частоти обертання різниця між моментами турбін становитиме:

$$\Delta M = |\Delta \Omega \cdot (e_{m1} - e_{m2})|$$

У разі зміни навантаження цієї системи моменти приводних двигунів також змінюються. Це приводить до зсуву робочих точок на характеристиках гідротурбін. Величину зміни моментів кожного гідроагрегату можна визначити за формулами:

$$\Delta M_1 = M_n \pm \Delta \Omega \cdot \text{tg} \gamma_1$$

$$\Delta M_2 = M_n \pm \Delta \Omega \cdot \text{tg} \gamma_2,$$

де  $\gamma_1, \gamma_2$  кути нахилу дотичних до механічних характеристик турбін у номінальній точці.

За цієї формулою можна приблизно оцінити розподіл навантаження між енергоустановками залежно від похибки стабілізації частоти обертання АСЕП. Наприклад, для генераторів однакової потужності, що працюють від гідротурбін, різниця в коефіцієнтах саморегулювання яких становить  $\Delta e = 3,0$ , а максимальна похибка ста-

білізації частоти обертання  $\Delta \omega = 5\%$ , нерівномірність завантаження становитиме 15%.

Відзначимо, що найбільш небезпечним режимом АСЕП з погляду завантаження генераторів є зменшення частоти обертання порівняно з номінальною. Оскільки зниження частоти обертання пов'язане зі збільшенням сумарного навантаження паралельно працюючих генераторів, велика різниця в коефіцієнтах саморегулювання приводних турбін може привести до значного перевантаження обмоток електричної машини по струму. Для виключення подібних випадків велике значення має правильний вибір величини баластного опору, за допомогою якого можна зміщувати регульовальну характеристику еквівалентного навантаження, забезпечуючи найбільш переважні статичні режими роботи АСЕП у всьому діапазоні зміни корисного навантаження.

Очевидно, що для забезпечення рівномірного розподілу навантаження між паралельно працюючими генераторами необхідно вибирати гідродвигуни з близькими коефіцієнтами саморегулювання, а величину баластних опорів з урахуванням характеру зміни корисного навантаження і наведеними вище рекомендаціями.

У разі застосування частотних схем регулювання для стабілізації режимів паралельно працюючих асинхронних генераторів параметри стабілізуючих систем можуть вибиратися відповідно до рекомендацій для аналогічних систем автономних мікроГЕС. Особливістю ж роботи АСЕП з асинхронними генераторами буде те, що частота напруги, що генерується, відрізнятиметься від частот обертання роторів електричних машин на величину ковзання.

**Висновки.** Аналіз режимів роботи станцій з асинхронними генераторами мікроГЕС на автономній мережі дає змогу зробити такі висновки:

1. Розподіл навантаження між генераторами електростанцій залежить від значень коефіцієнтів саморегулювання приводних гідротурбін і діапазону зміни еквівалентного навантаження станції.

2. Похибка стабілізації напруги паралельно працюючих асинхронних генераторів визначається відхиленням еквівалентного навантаження від номінальних значень і в загальному випадку відповідає аналогічним значенням для автономних станцій.

#### Список літератури:

1. Абдрахманов Р.С., Переведенцев Ю.П. Возобновляемые источники энергии. Казань : Изд-во Казанского ун-та, 1992. 134 с.
2. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанция. Опубл. в Б.И. Бюлл. № 17, 1987

3. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Динамика микрогидроэлектростанции с автобалластной стабилизацией напряжения. *Электротехника*, 1989, № 10. С. 9–12.

4. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 199 с.

### **АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАЦИЙ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ НА АВТОНОМНЫЕ СЕТИ**

*В статье проведен анализ проблем работы микрогидроэлектростанций при работе на автономные электрические сети, проведено исследование энергетических характеристик работы микроГЭС при работе на автономные электрические сети. Распределение нагрузки между генераторами электростанций зависит от значений коэффициентов саморегулирования приводных гидротурбин и диапазона изменения эквивалентной нагрузки станции. Погрешность стабилизации напряжения параллельно работающим асинхронных генераторов определяется отклонением эквивалентной нагрузки от номинальных значений и в общем случае соответствует аналогичным значениям для автономных станций.*

**Ключевые слова:** *энергосбережение, гидроэнергетика, энергетические характеристики, автономные энергетические установки, энергоэффективность, нетрадиционная энергетика, энергетика Украины.*

### **THE ASSAYING OF OPERATION MODES OF MICRO HYDRO POWER PLANTS IN PARALLEL OPERATION ON AN OFFLINE NETWORK**

*The article analyzes the problems of microhydroelectric power plants when working on Autonomous electrical networks, the study of the energy characteristics of the micro-hydroelectric power when working on Autonomous electrical networks. Load distribution between power plant generators depends on the values of the self-regulation coefficients of the drive turbines and the range of variation of the equivalent load of the station. The error of voltage stabilization of parallel operating asynchronous generators is determined by the deviation of the equivalent load from the nominal values and generally corresponds to the same values for Autonomous stations.*

**Key words:** *energy saving, hydropower, energy characteristics, Autonomous power plants, energy efficiency, unconventional energy, energy of Ukraine.*