

УДК 621.311.212.001

М.Р.Ібрагімова (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

## Визначення проектних параметрів малої ГЕС за регулювання потужності по водотоку

*Обґрунтовано вибір проектної потужності та кількості агрегатів малої ГЕС за регулювання потужності по водотоку та природоохоронних обмежень на використання води для виробництва електроенергії.*

**Ключові слова:** водотік, гідроагрегат, електроенергія, забезпеченість, імовірність, мала гідроелектростанція, потужність.

*Обоснован выбор проектной мощности и количества агрегатов малой ГЭС при регулировании мощности по водотоку и природоохранных ограничений на использование воды для производства электроэнергии.*

**Ключевые слова:** водоток, гидроагрегат, электроэнергия, обеспеченность, вероятность, малая гидроэлектростанция, мощность.

**Постановка питання.** Україна у 2011 р. приєдналася до Європейського енергетичного співтовариства, взявши на себе зобов'язання привести національну законодавчу базу у відповідність із правовими стандартами Європейського Союзу. Сьогодні особливе місце у довгостроковій політиці енергетичної галузі відведено розвитку відновлюваних джерел енергії. Європейські тенденції сучасного розвитку малої гідроенергетики відображені в "Керівних принципах розвитку гідроенергетики", ухвалених Міжнародною комісією із захисту річки Дунай [1]. Їх головним завданням є зменшення екологічної шкоди від нових проектів у гідроенергетиці. Документ надає можливість раціонального планування розвитку гідроенергетики на національному та регіональному рівні. Задачі екологічної безпеки та стійкого розвитку (заміщення традиційних викопних видів палива, декарбонізація тощо) стимулюють розвиток малої гідроенергетики як однієї з найбільш ефективних екологічно чистих енерготехнологій.

На території України станом на 2015 рік знаходяться в експлуатації біля 120 малих ГЕС [2] сумарною потужністю близько 83 МВт, середньорічний обсяг виробництва електроенергії яких складає близько 250 тис. МВт·год/рік. У подальшому розвитку вітчизняної малої гідроенергетики визначальними мають бути принципи використання гідроенергетичних ресурсів, що забезпечують екологічну безпеку функціонування станції

без змін гідрологічного режиму водотоку. Всі гідротехнічні споруди у більшій чи меншій мірі впливають на водний режим річки. Проте, на відміну від великих ГЕС, що зумовлюють значні структурні зміни гідрологічного режиму річки, робота малих ГЕС, що працюють по водотоку, сприяє збереженню біорізноманіття та річкової гідробіоти.

У подальшому висвітленні матеріалів під гідроелектростанцією, що працює по водотоку, розуміється станція, у якій відсутнє регулювальне водосховище, або регулювальні можливості водосховища не можуть бути використані, виходячи з наявної водогосподарської обстановки чи стану гідротехнічних споруд. Експлуатаційний режим ГЕС, що працює по водотоку, та її потужність повністю визначаються притоком (надходженням) води до створу станції. На сучасному етапі розвитку малої гідроенергетики відновився інтерес до створення малих ГЕС із регулюванням потужності по водотоку завдяки їх екологічності. Цей режим роботи станції надає можливість практично не спотворювати природний гідрологічний режим та біологічний стан русла річки нижче створу.

Попередні дослідження питання регулювання потужності малих ГЕС по водотоку були присвячені в основному автоматизації процесів регулювання [3, 4]. На сьогодні набуває актуальності питання визначення раціональної величини проектної потужності та кількості агрегатів малої ГЕС

за регулювання потужності по водотоку та природоохоронних обмежень на використання води для виробництва електроенергії.

**Вихідні положення.** Вибір раціональних проектних параметрів малої ГЕС доцільно виконувати згідно з рекомендаціями Британської гідроенергетичної асоціації [5] за результатами розрахункових досліджень для наступного ряду витрат води:

$$Q^m = [1,3Q_{cp}; Q_{cp}; 0,75Q_{cp}; 0,5Q_{cp}; 0,33Q_{cp}], \quad (1)$$

де  $Q^m$  – проектні витрати води малої ГЕС, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{cp}$  – середньобагаторічна витрата води досліджуваного створу, м<sup>3</sup>/с.

Теоретичні положення розрахунку енергетичних показників малої ГЕС за регулювання потужності по водотоку та природоохоронних обмежень на використання води для виробництва електроенергії були розглянуті авторами у публікації [6] для випадку  $Q^m = Q_{cp}$ . Для оцінки ефективності роботи станції застосовано ймовірнісний підхід, що дозволив визначити необхідні параметри малої ГЕС у функції витрат стоку створу. Розрахункові дослідження ґрунтуються на використанні трипараметричного гамма-розподілу витрат води річкового стоку у формі Крицького-Менкеля, що знайшов широке застосування в практиці гідрологічних досліджень, зокрема, при визначенні гідроенергетичного потенціалу малих водотоків [7, 8]. Функція забезпеченості розподілу визначається у вигляді залежності  $p(k_p, C_V, C_S)$ , що зазвичай задається у табульованому вигляді [9], де позначено:  $p$  – забезпеченість витрати води;  $C_V$  – коефіцієнт варіації;  $C_S$  – коефіцієнт асиметрії;  $k_p$  – модульний коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$k_p = Q_p / Q_{cp}, \quad (2)$$

де  $Q_p$  – витрата води із забезпеченістю  $p$ , м<sup>3</sup>/с.

**Основні розрахункові співвідношення.** Для рекомендованого ряду проектних витрат води створу (1) модульний коефіцієнт витрат стоку заданого рівня забезпеченості  $k_p^m$  набуває значень наступного ряду:

$$k_p^m = [1,3; 1; 0,75; 0,5; 0,33], \quad (3)$$

де  $m$  – індекс, що відповідає значенню відповідного модульного коефіцієнта, тобто  $k_p^{1,3} = 1,3$ ,  $k_p^{0,75} = 0,75$  тощо.

Аналогічним чином введемо й інші позначення розрахункових величин. Витрати води окремого агрегату у складі станції визначаються так:

$$Q_i^m = \frac{k_p^m}{n} \cdot Q_{cp}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість агрегатів у складі ГЕС;  $i$  – порядковий номер гідроагрегату.

Тривалість роботи  $i$ -го агрегату в складі станції:

$$T_i^m = T(p_i^m - p_{\min}), \quad (5)$$

$$p_i^m = f\left(\frac{i}{n} \cdot k_p^m\right),$$

де  $T$  – розрахунковий період часу (місяць, рік тощо), год;  $p_i^m$  – забезпеченість витрати води  $i$ -го гідроагрегату при обраній проектній витраті води станції.

Відповідно і природоохоронні обмеження на використання стоку води [5] набувають вигляду:

$$p_{\min} < p_i^m \leq p_{\max}. \quad (6)$$

Значення забезпеченості  $p_i^m$  відповідає пуску  $i$ -го агрегату в складі станції і згідно [5] не перевищує 90%. Зупинка відповідного  $i$ -го гідроагрегату обмежується витратами стоку, що відповідають рівню забезпеченості 10%. Пуск кожного наступного агрегату відбувається при досягненні відповідної величини розрахункових витрат стоку (рис. 1). Приклад графічного визначення рівнів забезпеченості витрат води створу станції для випадку трьох агрегатів у складі малої ГЕС показано на рис. 1.

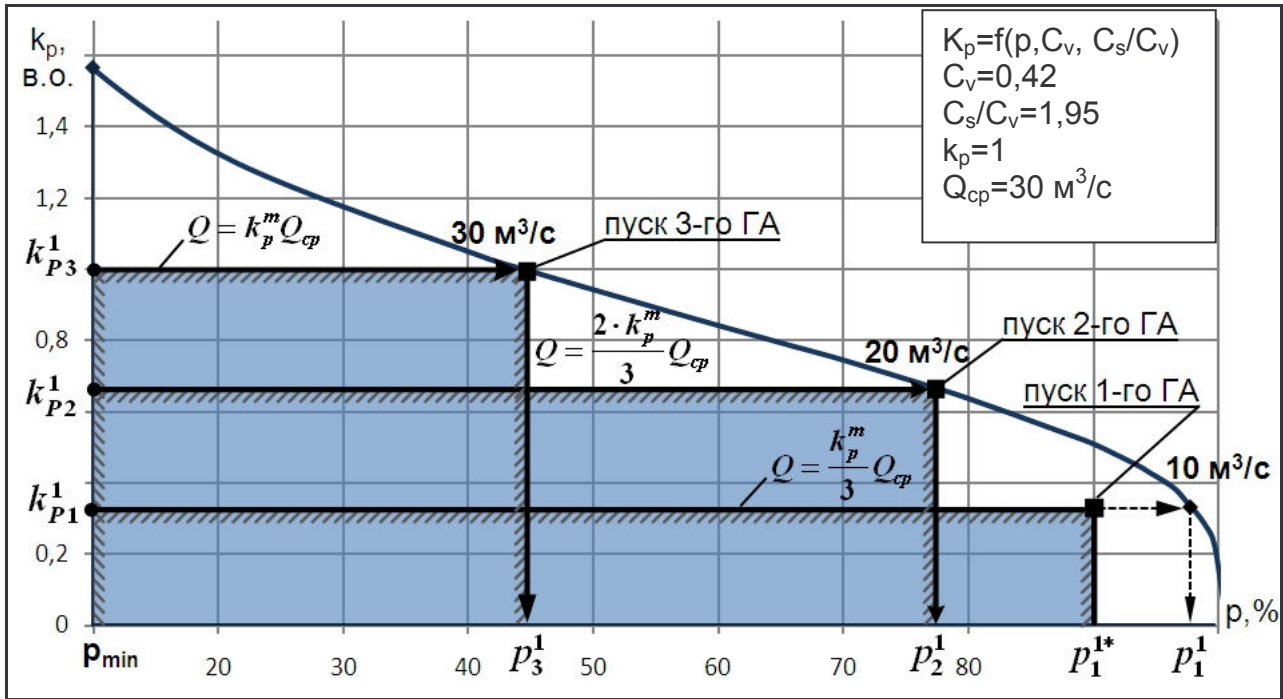


Рис. 1. Визначення рівнів забезпеченості витрат води агрегатів станції.

Введемо модульний коефіцієнт витрати води *i*-го агрегату станції:

$$k_{pi}^m = \frac{i}{n} k_p^m. \tag{7}$$

Модульний коефіцієнт витрати води *i*-го агрегату станції визначається кількістю працюючих у певний момент часу агрегатів. Наприклад, модульний коефіцієнт витрати води другого гідроагрегату  $k_{p2}^m$  характеризується витратами станції, що забезпечують роботу двох гідромашин з *n*-ої кількості агрегатів у складі ГЕС і т.д. За таблицями ординат кривих забезпеченостей [9] для кожного значення модульного коефіцієнта  $k_{pi}^m$  визначається рівень забезпеченості витрат води відповідного агрегату  $p_i^m$ . Так, рівень забезпеченості  $p_1^1$  (рис. 1) відповідає витраті води, достатній для функціонування тільки першого агрегату. Для варіанту малої ГЕС у складі 3-х агрегатів за даного режиму експлуатації лише одного агрегату витрата води відповідно становитиме:

$$Q = \frac{1}{3} Q^m = \frac{k_p^m}{3} Q_{cp}. \tag{8}$$

При збільшенні притоку води у створі станції і досягненні значення витрат, достатніх для фун-

кціонування 2-х агрегатів у складі ГЕС, вмикається другий агрегат. Таким чином, рівень забезпеченості  $p_2^1$  витрат води, що гарантують роботу 2-х гідроагрегатів, відповідатиме моменту пуску 2-го агрегату і характеризуватиме його режим роботи. Витрати води в даному випадку дорівнюватимуть:

$$Q = \frac{2}{3} Q^m = \frac{2k_p^m}{3} Q_{cp}. \tag{9}$$

Аналогічно відбувається пуск наступних агрегатів. Зауважимо, що згідно з природоохоронними обмеженнями на використання стоку води у випадку, коли  $p_i^m$  перевищує 90% ( $p_1^1 > 90\%$ , рис. 1), пуск відповідного агрегату відбувається тільки при досягненні витрат води, що відповідають рівню забезпеченості 90% ( $p_1^{1*}$ , рис. 1). Відповідно до цих обмежень повинна виконуватись зупинка всіх агрегатів за витрат води, що перевищують значення витрат забезпеченістю 10%.

Подальші дослідження будуть спрямовані на отримання результатів щодо визначення доцільної величини номінальної потужності станції, раціональної кількості агрегатів у складі ГЕС, річного обсягу виробництва електроенергії, три-

валості роботи та числа годин використання встановленої потужності станції для рекомендованого ряду проектних витрат води (1). Розрахункові формули для визначення проектних параметрів набувають наступного вигляду.

Потужність окремого гідроагрегату  $N_i^m$ , кВт та його річний виробіток електроенергії  $W_i^m$ , кВт·год/рік за висоти напору станції  $H$ , м визначаємо наступним чином:

$$N_i^m = 7 \cdot Q_i^m \cdot H, \quad (10)$$

$$W_i^m = N_i^m \cdot 8760 (p_i^m - 0,1). \quad (11)$$

Потужність та річний обсяг виробництва електроенергії малою ГЕС у цілому:

$$N_{ГЕС}^m = n \cdot N_i^m, \quad (12)$$

$$W_{ГЕС}^m = N_i^m \cdot 8760 \left( \sum_{i=1}^n p_i^m - n \cdot 0,1 \right). \quad (13)$$

Додатково розглянемо також наступні характеристики ефективності роботи малої ГЕС:

- тривалість роботи станції, год:

$$T_i^m = 8760 (p_i^m - 0,1), \quad (14)$$

$$T_{ГЕС}^m = \max \{ T_1^m, T_2^m, \dots, T_i^m \},$$

- число годин використання встановленої потужності станції, год:

$$T_{II}^m = \frac{W_{ГЕС}^m}{(n \cdot N_i^m)}. \quad (15)$$

**Розрахункові результати.** Розрахункові дослідження виконувались для варіантів станції у складі 1, 2, 3 та 4-х агрегатів однакової потужності за витрат води досліджуваного створу, що кратні ряду модульних коефіцієнтів (3) і пропорційні середній багаторічній витраті стоку величиною 30 м<sup>3</sup>/с. За напір станції була прийнята питома величина 1 м, а середньозважені значення коефіцієнтів варіації та асиметрії дорівнювали 0,42 та 0,82 в.о. (басейновий район р. Південний Буг).

У табл. 1 наведено результати розрахункових досліджень визначення потужності та обсягу виробництва електроенергії агрегатами малої ГЕС, а також станцією в цілому.

Для порівняльного аналізу ефективності роботи окремих гідроагрегатів та ГЕС у цілому отримані результати було подано у відносних одиницях. За базову величину використано результати для варіанту станції з одним агрегатом для випадку  $k_p^m = 1$ .

Таблиця 1. Результати визначення параметрів малої ГЕС

| Кількість агрегатів |                  | Обсяг виробництва електроенергії, МВт·год/рік |       |       |       |       | Потужність ГЕС, кВт  |      |       |       |       |
|---------------------|------------------|---|-------|-------|-------|-------|----------------------|------|-------|-------|-------|
|                     |                  | Модульний коефіцієнт                          |       |       |       |       | Модульний коефіцієнт |      |       |       |       |
|                     |                  | 1,3   | 1     | 0,75  | 0,5   | 0,33  | 1,3                  | 1    | 0,75  | 0,5   | 0,33  |
| 1                   | ГЕС              | 276   | 638   | 823   | 736   | 486   | 273                  | 210  | 157,5 | 105   | 69,3  |
| 2                   | ГЕС              | 963   | 1055  | 963   | 736   | 486   | 273                  | 210  | 157,5 | 105   | 69,3  |
|                     | 1 <sup>III</sup> | 824,9   | 735,8 | 551,9 | 367,9 | 242,8 | 136,5                | 105  | 78,75 | 52,5  | 34,65 |
|                     | 2 <sup>III</sup> | 137,9   | 318,9 | 411,3 | 367,9 | 242,8 | 136,5                | 105  | 78,75 | 52,5  | 34,65 |
| 3                   | ГЕС              | 1109  | 1117  | 1010  | 736   | 486   | 273                  | 210  | 157,5 | 105   | 69,3  |
|                     | 1 <sup>III</sup> | 637,7   | 490,6 | 367,9 | 245,3 | 161,9 | 91                   | 70   | 52,5  | 35    | 23,1  |
|                     | 2 <sup>III</sup> | 379,8   | 413,5 | 367,9 | 245,3 | 161,9 | 91                   | 70   | 52,5  | 35    | 23,1  |
|                     | 3 <sup>III</sup> | 91,9  | 212,6 | 274,2 | 245,3 | 161,9 | 91                   | 70   | 52,5  | 35    | 23,1  |
| 4                   | ГЕС              | 1181  | 1169  | 1020  | 184,0 | 486   | 273                  | 210  | 157,5 | 105   | 69,3  |
|                     | 1 <sup>III</sup> | 478,3   | 367,9 | 275,9 | 184,0 | 121,4 | 68,25                | 52,5 | 39,38 | 26,25 | 17,33 |
|                     | 2 <sup>III</sup> | 412,5   | 367,9 | 275,9 | 184,0 | 121,4 | 68,25                | 52,5 | 39,38 | 26,25 | 17,33 |
|                     | 3 <sup>III</sup> | 221,3   | 274,2 | 262,0 | 184,0 | 121,4 | 68,25                | 52,5 | 39,38 | 26,25 | 17,33 |
|                     | 4 <sup>III</sup> | 68,9  | 159,4 | 205,6 | 184,0 | 121,4 | 68,25                | 52,5 | 39,38 | 26,25 | 17,33 |

На рис. 2 наведено результати розрахунку продуктивності малої ГЕС за різних варіантів компоновання станції агрегатами та за різних проектних витрат води. Характер зміни кривих, представлених на рис. 2, свідчить, що реалізація малої ГЕС за витрат води менше половинного значення середньобаторічних витрат стоку створу станції, тобто при  $k_p^m \leq 0,5$ , виявляється неефективною. Це пояснюється введенням природоохоронних обмежень на використання води для виробництва електроенергії, оскільки дані обмеження встановлюють можливість використання водотоку тільки в межах витрат стоку, що відповідають забезпеченості 10-90%. Таким чином, при будівництві ГЕС за малих проектних витрат величиною, удвічі меншою за значення середньобаторічних витрат води створу станції, збільшення кількості агрегатів у складі малої ГЕС не дає очікуваного збільшення сумарного обсягу виробництва електроенергії. Варіант ГЕС із одним агрегатом виявляється найменш ефективним за всіх розглянутих значень проектних витрат станції. Значне збільшення продуктивності досягається для варіантів станції у складі 2, 3 чи 4-х агрегатів. При цьому найвища продуктивність досягається за проектних витрат станції, рівних середньобаторічним витратам стоку:  $k_p^m = 1$ . Зауважимо, що для варіантів ГЕС у складі більш ніж 3-х агрегатів спостерігається незначне зростання продуктивності і раціональність введення наступних агрегатів повинна розглядатися при врахуванні відповідного збільшення капітальних затрат, тобто в результаті проведення техніко-економічного аналізу.

Для порівняльного аналізу досліджуваних варіантів малих ГЕС і відповідного визначення раціональних проектних параметрів станції на рис. 3 представлено суміщені графіки залежності обсягу виробництва електроенергії від номінальної потужності станції  $W_{ГЕС}^m = f(N_{ГЕС}^m)$  у двох варіаціях: 1) сімейство кривих  $W_{ГЕС}^m = f(N_{ГЕС}^m)$  для окремих випадків проектних витрат малої ГЕС відповідно до рекомендованого ряду (1); 2) сімейство кривих  $W_{ГЕС}^m = f(N_{ГЕС}^m)$  за варіантів станції у складі 1, 2, 3 та 4-х агрегатів. Для кожного варіанту компоновання малої ГЕС за наведеним графіком можливо встановити раціональне значення проектних витрат води створу станції. Так, для ГЕС із одним встановленим агрегатом максимально ефективним виявляється варіант за проектних витрат води створу станції, кратних 0,75 значення середньобаторічних витрат досліджуваного водотоку, тобто при  $k_p^m = 0,75$ . Також зауважимо, що станція у складі одного агрегату, проектувана на витрати води, удвічі менші від величини середньобаторічних витрат  $k_p^m = 0,5$ , виявляється більш ефективною, ніж аналогічна станція за витрат, рівних середньобаторічним  $k_p^m = 1$ . Мала ГЕС у складі 2 та 3-х агрегатів досягає найбільшого виробітку електроенергії за витрат, рівних середнім багаторічним витратам стоку ( $k_p^m = 1$ ). Даний графік ілюструє недоцільність будівництва малої ГЕС за витрат, що перевищують значення середньобаторічних.

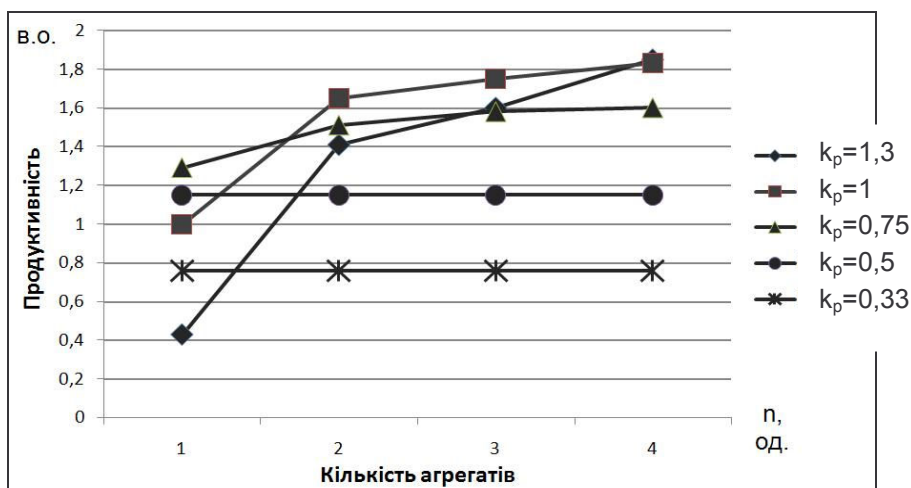


Рис. 2. Продуктивність малої ГЕС.



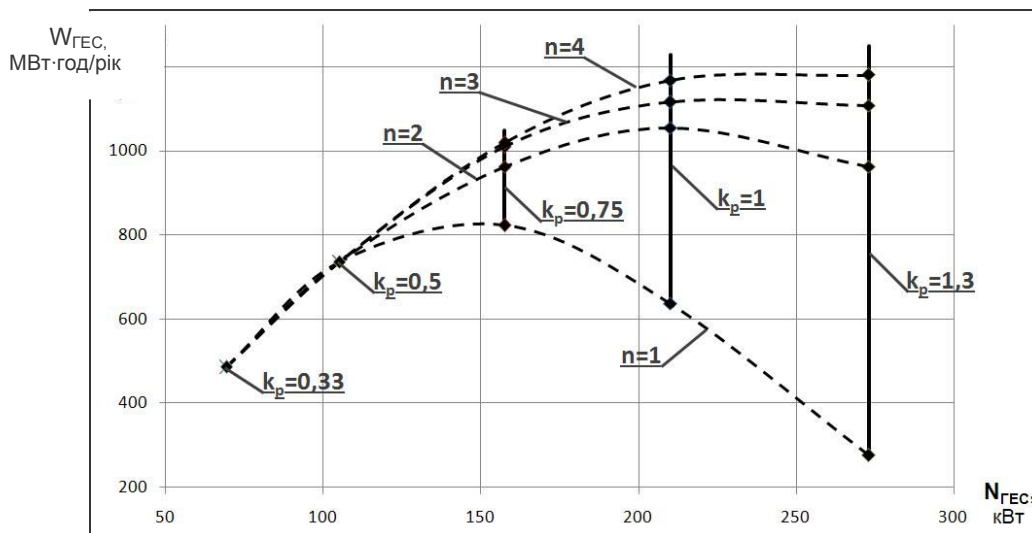


Рис. 3. Графік залежності обсягу виробництва електроенергії від потужності ГЕС.

Результати розрахунку показників ефективності роботи малої ГЕС, а саме тривалості роботи станції та числа годин використання встановленої потужності ГЕС для рекомендованого ряду витрат води (1) за різних варіантів компонування станції, наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Показники ефективності роботи малої ГЕС

| Кількість агрегатів | Число годин використання встановленої потужності ГЕС, год/рік |      |      |      |      | Тривалість роботи станції, год/рік |      |      |      |      |
|---------------------|---|------|------|------|------|------------------------------------|------|------|------|------|
|                     | Модульний коефіцієнт  |      |      |      |      | Модульний коефіцієнт               |      |      |      |      |
|                     | 1,3   | 1    | 0,75 | 0,5  | 0,33 | 1,3                                | 1    | 0,75 | 0,5  | 0,33 |
| 1                   | 1010  | 3037 | 5223 | 7008 | 7008 | 1010                               | 3037 | 5223 | 7008 | 7008 |
| 2                   | 3527  | 5023 | 6115 | 7008 | 7008 | 6044                               | 7008 | 7008 | 7008 | 7008 |
| 3                   | 4064  | 5318 | 6413 | 7008 | 7008 | 7008                               | 7008 | 7008 | 7008 | 7008 |
| 4                   | 4326  | 5569 | 6473 | 7008 | 7008 | 7008                               | 7008 | 7008 | 7008 | 7008 |

**Висновки.** За регулювання потужності малої ГЕС по водотоку та врахування природоохоронних обмежень на використання води для виробництва електроенергії раціональним варіантом малої ГЕС за величиною річного обсягу виробництва електроенергії можна вважати станцію у складі 3-х агрегатів з проектними витратами води, рівними значенню середньообагаторічної витрати досліджуваного створу. У даному випадку число годин використання встановленої сумарної потужності гідроагрегатів очікується на рівні 5300 год/рік, а тривалість роботи станції протягом року становитиме біля 7000 год/рік.

1. *Guiding Principles on Sustainable Hydropower* [Електронний ресурс] // International Commission for the Protection of the Danube River. – Режим доступу: <http://www.icpdr.org/main/activities-projects/hydropower>

2. Реєстр об'єктів електроенергетики (альтернативні джерела енергії) [Електронний ресурс] // НКРЕКП. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=11992>

3. *Киселев Г.С.* Автоматическое регулирование мощности гидроэлектростанций по водотоку. – М.: "Энергия", 1973. – 121 с.

4. *Буачидзе С.Р.* Многоагрегатные автоматические гидроэлектростанции, работающие по водотоку // Автоматика и телемеханика. – 1952. – №2. – Т. 13. – С. 158–168.

5. *A Guide to UK Mini-Hydro Developments* [Електронний ресурс] // British Hydropower Association. 2012. – Режим доступу: [www.british-hydro.org](http://www.british-hydro.org)

6. *Васько П.Ф., Ібрагімова М.Р.* Енергетична ефективність гідроагрегатів у складі малої гідроелектростанції за регулювання її потужності по водотоку // Відновлювана енергетика. – 2015. – №4. – С. 44–49.

7. *Мороз А.В.* Метод аналітичного визначення гідроенергетичного потенціалу створу малої річки на основі лінеаризації імовірнісного розподілу витрат води // Відновлювана енергетика. – 2014. – №4. – С. 69–74.

8. *Мороз А.В.* Властивості та особливості застосування імовірнісного трипараметричного гамма-розподілу для визначення технічного гідроенергетичного потенціалу малої річки // Відновлювана енергетика. – 2014. – №2. – С. 72–78.

9. *Дружинин В.С., Сикан А.В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие. Направление "Гидрометеорология". Специальность "Гидрология". – СПб.: изд. РГГМУ, 2001. – 170 с.