

DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-61-70
УДК 621.22.018.8

АНАЛІЗ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ ГЕНЕРАТОРІВ НА МІНІ ГЕС

© Мезеря А.Ю., Придворов С.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Мезеря Андрій Юрійович (Mezeria Andrii): ORCID: 0000-0003-2946-9593; mezzera@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Придворов Сергій Сергійович (Pridvorov Serhii): ORCID: 0009-0004-5164-4997; spridv@ukr.net, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті наведено результати аналізу якісних показників (аналіз техніко-економічних показників) використання різних типів генераторів на гідроелектростанціях малої потужності (до 800 кВт). Показано енергетичний потенціал малих та міні ГЕС України на малих річках та використання водотоків систем технічного водопостачання, а також першочерговий економічно доцільний та екологічно безпечний потенціал. Проведено аналіз техніко-економічних характеристик синхронних електродвигунів, асинхронних електродвигунів та електродвигунів постійного струму, що використовуються як генератори на ГЕС малої потужності. До таких показників відносяться: вартісні характеристики відповідного обладнання у розрізі встановленої потужності, масогабаритні показники та термін окупності при повноцінній роботі ГЕС (число годин використання встановленої потужності не менше 4000). Встановлено, що використання асинхронних електродвигунів з ємнісним збудженням як генератор є найбільш перспективним рішенням, так як підвищується стійкість роботи електроприводів механізмів і підвищується якість енергії, вирівнюється несиметрія лінійних і фазних напруг, не вносяться спотворень у форму кривої лінійних і фазних напруг, складних автоматичних систем синхронізації, не потрібний захист від коротких замикань, підвищується надійність експлуатації ГЕС. Встановлено, що недостатньо вивченим питанням у цьому напрямі можна віднести фізичні процеси самозбудження асинхронного генератора та процес самозбудження. Визначено недоліки використання різних типів генераторів та методи їх усунення. При розрахунку вартості генераторів було проведено аналіз вартісних показників обладнання основних провідних виробників України та низки зарубіжних фірм. Ціни на генератори визначалися шляхом знаходження середнього значення різних типів генераторів від різних виробників. Наведено результати аналізу техніко-економічних характеристик різних типів генераторів, залежно від потужності. Показано критичну потужність, що визначає оптимальність вибору з точки зору економіки. Ціни на генератори визначалися шляхом знаходження середнього значення різних типів генераторів від різних виробників. Наведено результати аналізу техніко-економічних характеристик різних типів генераторів, залежно від потужності. Показано критичну потужність, що визначає оптимальність вибору з точки зору економіки.

Ключові слова: міні ГЕС, електродвигун, електрогенератор, техніко-економічні характеристики, строк окупності, якісні показники.

Mezerya A.Y., Pridvorov S.S. Analysis of qualitative indicators of the use of different types of generators at mini HPP.

The article presents the results of the analysis of qualitative indicators (analysis of technical and economic indicators) of the use of various types of generators at low power hydroelectric power plants (up to 800 kW). The energy potential of small and mini HPPs of Ukraine on small rivers and the use of watercourses of technical water supply systems as well as the primary economically viable and environmentally safe potential are shown. The analysis of the technical and economic characteristics of synchronous electric motors, asynchronous electric motors and DC electric motors used as generators at low-power HPPs has been carried out. These indicators include the cost characteristics of the relevant equipment in terms of installed capacity, weight and size indicators and the payback period for the full operation of the HPP (the number of hours of use of the installed capacity is at least 4000). It has been established that the use of asynchronous electric motors with capacitive excitation as a generator is the most promising solution, since the stability of the operation of electric drives of mechanisms increases and the quality of energy increases, the asymmetry of linear and phase voltages is leveled, and distortions are not introduced into the shape of the curve of linear and phase voltages, there is no need to use complex automatic synchronization systems, protection against short circuits is not required, and the reliability of HPP operation is increased. It has been established that the physical processes of self-excitation of an asynchronous generator and the process of self-excitation can be attributed to an insufficiently studied issue in this direction. The disadvantages of using various types of generators and methods for their elimination are determined. This study focuses on the cost analysis of generators by examining the cost indicators of major manufacturers in Ukraine and several foreign companies. The prices of generators were determined by calculating the average value across different types and manufacturers. The research presents the results of an analysis of the technical and economic characteristics of various generator types based on their power ratings. Furthermore, the critical power threshold is identified, which determines the optimal selection of generators from an economic standpoint. The findings of this analysis provide valuable insights into the cost considerations and technical performance of generators, aiding in informed decision-making for optimal generator selection in terms of economic efficiency.

Keywords: mini HPP, electric motor, electric generator, technical and economic characteristics, payback period, indications. quality indicators.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

В останні роки у всьому світі приділяється велика увага розвитку установок перетворення відновлюваних видів енергії на електричну, децентралізацію та створення самозабезпечених енергорайонів. При цьому аварії, катастрофічні за економічними збитками і навіть небезпечні з точки зору обороноздатності країни землетрусу мають локальні наслідки. Відновлюються сотні раніше необґрунтовано занедбаних міні ГЕС та будуються нові на гідротехнічних спорудах об'єктів неенергетичного призначення, до яких належать водонапірні вежі, зрошувальні системи сільського господарства, водокачки та ін.

Енергетичний потенціал малих та міні ГЕС України на малих річках оцінюється, без урахування мікро ГЕС (мГЕС) та використання водотоків систем технічного водопостачання, у 2300-2400 МВт (12,0-12,5 млрд. кВт·г), а першочерговий економічно доцільний та екологічно безпечний потенціал становить 600-700 МВт (3-7 млрд. кВт·год).

Виходячи з цього, Держкоменергозбереженням України було розроблено, а Верховною Радою України прийнято Закон України «Про альтернативні види рідкого та газового палива», в якому визначено правові, соціальні, економічні, екологічні та організовані принципи виробництва та споживання альтернативних видів рідкого та газового палива на основі залучення нетрадиційних джерел та видів енергетичної сировини.

Позитивним моментом є те, що вперше в Україні ухвалено законопроект, який на державному рівні сприяє розвитку використання нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВІЕ). Підготовлено до ухвалення Верховною Радою України також і проект Закону України «Про альтернативні джерела енергії».

Потрібно узагальнення отриманого досвіду відновлення та експлуатації цих ГЕС. На мініГЕС та мГЕС потужністю до 800 кВт при роботі в потужних електроенергетичних системах (ЕЕС) з надійним зв'язком, найпростішим і найдешевшим є альтернативний варіант – використання насосів замість гідротурбін, а замість синхронних генераторів – асинхронні електродвигуни як генератори. Вони характеризуються більш простими експлуатаційними характеристиками, автоматизацією та захистом, мають високі надійнісні показники роботи електричного обладнання. Експлуатаційного персоналу потрібно менше та нижчої кваліфікації. Найменше простоїв у ремонті, що в результаті компенсує деяке зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) агрегатів ГЕС. Аналіз особливостей використання асинхронних генераторів на мГЕС і присвячена справжня робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Раніше, до 60-х років минулого століття, у СНД було збудовано близько 10 000 мГЕС. На початку 80-х років працювало лише близько 1000 мГЕС. Багато хто з них вимагав капітального ремонту, реконструкції із заміною турбін, генераторів, трансформаторів, апаратури автоматичного управління [3, 4].

Останніми роками асинхронні генератори (АГ) дедалі ширше застосовуються для мікро ГЕС фірмами України, Німеччини, Великобританії, США, Японії та інших країн. Ці машини характеризуються простою і міцною конструкцією, малим числом робочих частин, що є, як правило, стандартними з великою гнучкістю в умовах повної автоматизації, надійністю в роботі відносно низькою вартістю, кращими, ніж у синхронних генераторів, масогабаритними показниками. Однак, АГ на міні та малих ГЕС з одиничною потужністю 100 кВт і вище, на сьогоднішній день застосовуються рідко, і питання це до кінця не вивчене.

Питанням удосконалення систем управління мГЕС присвячено велику кількість робіт. Велика увага приділяється удосконаленню ПД-регуляторів, що дозволяють підвищити якість регулювання, зокрема якість електроенергії, що виробляється, а саме, стабільність частоти електричного струму [5-8]. Удосконалюються математичні моделі систем регулювання гідрогенераторами (гідротурбінами) [9], а також моделі фізичних процесів, що протікають [10-12], що дозволяє враховувати різні фактори і підвищувати якість регулювання гідротурбін. Розробляються енергозберігаючі системи керування гідроагрегатами, що дає значний економічний ефект за рахунок зниження втрат енергії в режимах нормальної експлуатації [13] та системи прецизійного керування на основі вирішення зворотних завдань динаміки [14], що дозволяють значно підвищити якість регулювання гідроагрегатів (набір потужності, перехідні процеси і т.д.) і підвищити стабільність частоти струму, що виробляється [15]. Однак більшість наукових рішень спрямовані на гідротурбіни великої та середньої потужності, і питання якості регулювання та оптимальний вибір обладнання для мГЕС залишаються актуальними. З цією метою розглянуто електродвигуни Харківського електромеханічного заводу ХЕМЗ, синхронні двигуни фірми Endress, синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. Однак більшість наукових рішень спрямовані на гідротурбіни великої та середньої потужності, і питання якості регулювання та оптимальний вибір обладнання для мГЕС залишаються актуальними. З цією метою розглянуто електродвигуни Харківського електромеханічного заводу ХЕМЗ, синхронні двигуни фірми Endress, синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. Однак більшість наукових рішень спрямовані на

гідротурбіни великої та середньої потужності, і питання якості регулювання та оптимальний вибір обладнання для мГЕС залишаються актуальними. З цією метою розглянуто електродвигуни Харківського електромеханічного заводу ХЕМЗ, синхронні двигуни фірми Endress, синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз техніко-економічних характеристик електродвигунів різних типів, які можуть бути використані як генератори на міні- та мікроГЕС з метою визначення критерію оптимальності вибору типу.

Виклад основного матеріалу

Застосування асинхронних генераторів у складі автономного енергокомплексу обґрунтовано з таких причин:

- застосування асинхронних генераторів підвищує стійкість роботи електроприводів механізмів та підвищує якість енергії;
- асинхронні генератори вирівнюють несиметрію лінійних та фазних напруг, а також несиметрію струмів навантаження;
- асинхронні генератори при паралельній роботі з мережею не вносять спотворень у форму кривої лінійних і фазних напруг, а, навпаки, покращують її за рахунок демпфування зовнішніх гармонійних складових струму та напруги, створюваних насиченими дроселями, трансформаторами, перетворювачами на випрямлячах та тиристорах, ін;
- у разі паралельної роботи електроагрегатів із асинхронними генераторами відпадає необхідність застосування складних автоматичних систем синхронізації;
- асинхронні генератори не вимагають захисту від коротких замикань, тому що в цьому режимі він втрачає збудження, що рівносильне його відключенню від мережі;
- асинхронні генератори відрізняються простотою конструкції та надійністю в експлуатації.

При встановленні асинхронних генераторів на ГЕС, які працюють на досить потужну електроенергетичну систему, їхнє збудження забезпечується енергосистемою. Слід лише врахувати, що асинхронний генератор для своєї роботи вимагає частоту обертання на 2-3% вище за синхронну, при цьому ковзання в генераторному режимі:

$$S_z = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 0$$

теоретично може змінюватися в межах $0 > S > -\infty$. Однак на практиці висока швидкість неприпустима як за умов механічної міцності, так і з міркувань обмеження втрат.

Основною особливістю, яка підвищує вартість АГ, є необхідність встановлення батареї конденсаторів у разі високих вимог з боку системи до компенсації реактивної потужності (див. рис. 1).

Крім того, слід враховувати, що напруга асинхронного генератора змінюється від навантаження (на 18% від холостого ходу до повного навантаження). На рис. 2 показана зовнішня характеристика асинхронного генератора де значення напруги та потужності навантаження P дано у відносних одиницях.

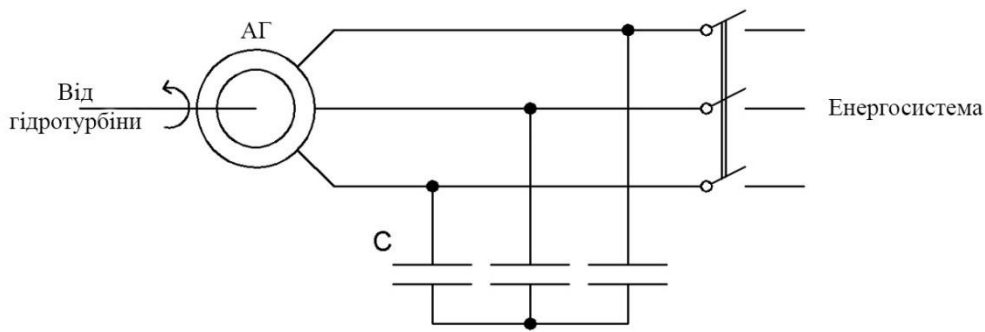


Рис. 1 – Схема конденсаторного збудження асинхронного генератора

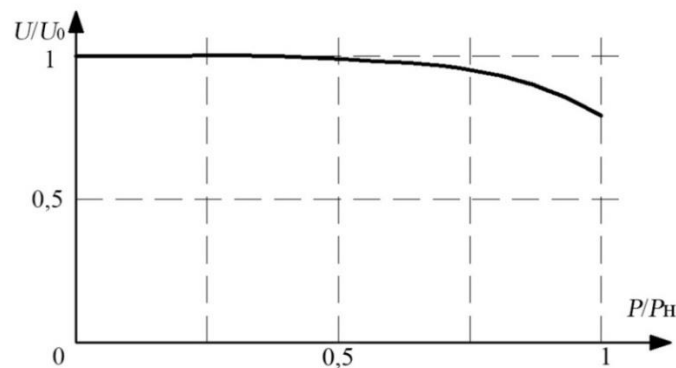


Рис. 2 – Зовнішня характеристика асинхронного генератора

Разом з тим АГ мають велику потужність самозбудження та ускладнюють регулювання вихідної напруги. Необхідну для утворення магнітного поля, що обертається, реактивну потужність асинхронний генератор споживає з мережі, навантажуючи додатковим реактивним струмом синхронні машини, які включені в мережу паралельно з ним. Це споживання реактивної потужності є основним недоліком асинхронних генераторів, що перешкоджає його поширенню.

Реактивна енергія для намагнічування, що використовується невеликими асинхронними генераторами, практично не обтяжлива для потужних ЕЕС. У ряді випадків при надмірній реактивній енергії (наприклад, при недовантажених довгих лініях повітряного зв'язку в системі) споживання її асинхронними двигунами навіть корисно. Якщо ЕЕС потребує компенсації, то встановлюється нерегульована або регульована батарея конденсаторів.

Щоб уникнути стрибків збільшення напруги при аварійному відключенні та розгоні асинхронних генераторів із підключеними конденсаторами, рекомендується:

- якщо мГЕС працює автономно, то під час пуску агрегату конденсатори (нерегульовані автоматично) вмикати до вимикача, а після прийняття навантаження перемикаєти у бік споживача (після вимикання);
- при схемі постійної роботи мГЕС в енергосистемі конденсатори повинні бути підключені з боку ЕЕС, тобто. після вимикачів генераторів.

До недостатньо вивчених питань можна віднести фізичні процеси самозбудження асинхронного генератора працюючого автономне навантаження, оскільки процес самозбудження залежить тільки від параметрів мережі, а й від конструктивних особливостей генератора.

Такий стан проблеми, швидше за все, пов'язаний з переважним використанням дотепер асинхронних машин як двигуна, з розробкою для нього теорії, розрахункових методик та проектування, а для генераторного режиму ці машини проектувалися досить

рідко. До того ж статичні конденсатори, які застосовуються як джерела реактивної потужності необхідної для процесу збудження, є дуже чутливими до значних змін напруги, що може призвести до виходу їх з ладу. Тому ще однією проблемою, що потребує вивчення, є дослідження аварійних режимів роботи асинхронних генераторів та розробка автоматичних систем регулювання для забезпечення заданих параметрів роботи МГЕС.

Протягом останніх років, як у нашій країні, так і за кордоном, теоретичні дослідження та практичний досвід показують перспективи застосування на малих та міні гідроелектростанціях самозбуджувальних асинхронних генераторів як автономні джерела електроенергії малої потужності (до 1000 кВт).

Застосування АГ тривалий час стримувалося в основному з двох причин: через відсутність малогабаритних силових конденсаторів, що забезпечують збудження генератора та компенсацію реактивної потужності навантаження, а також через складність стабілізації вихідної напруги.

На відміну від синхронних генераторів, які застосовуються на потужних ГЕС, асинхронні генератори не схильні до небезпек випадання з синхронізму. Однак асинхронні генератори не набули широкого поширення, що пояснюється рядом їх недоліків у порівнянні з синхронними генераторами.

Одним із суттєвих недоліків асинхронних генераторів є значна реактивна потужність, що споживається ними з мережі. Величина цієї потужності пропорційна намагнічує струм I_0 і може досягати 50% і більше від номінальної потужності машини [1]

З цього випливає, що для роботи 2-3 асинхронних генераторів необхідно використовувати один синхронний генератор такої потужності, що і потужність одного асинхронного генератора.

Якщо ж асинхронні генератори працюють паралельно загальну мережу з кількома синхронними генераторами, то велика величина реактивної потужності збудження асинхронних генераторів значно знизить коефіцієнт потужності всієї електричної мережі.

Асинхронний генератор може й автономних умовах, тобто. без включення до спільної мережі. Але в цьому випадку для отримання реактивної потужності, необхідної для намагнічування генератора, використовується батарея конденсаторів, що включені паралельно навантаженню на висновки генератора.

Поряд з технічними та експлуатаційними характеристиками генераторів, одним з основних критеріїв вибору типу генератора для гідроелектростанції малої потужності є також і вартісні показники генераторів та супутніх їх пристроїв (системи збудження та стабілізації напруги та частоти). Особливо це актуально при реконструкції, модернізації та відновленні існуючих, але перебувають в аварійному стані міні та малих ГЕС. Так як витрати на реконструкцію гідротехнічних споруд, будівлі станції та головної електричної схеми, практично не відрізняються і мало залежать від типу гідрогенератора, то вирішальним значенням при порівнянні техніко-економічних показників, буде вибір типу гідрогенератора (синхронний, асинхронний або генератор постійного струму) .

При розрахунку вартості генераторів було проведено аналіз вартісних показників обладнання основних провідних виробників України та низки зарубіжних фірм. Ціни на генератори визначалися шляхом знаходження середнього значення різних типів генераторів від різних виробників. Варто зауважити, що цінова політика різних виробників відрізняється в межах 3-5%, що робить нашу вибірку репрезентативною.

При розрахунку вартості враховувалися системи збудження синхронних генераторів (СГ), конденсаторні батареї асинхронних генераторів (АГ), необхідних для самозбудження, а також генератори постійного струму (ГПТ) без урахування інвертора, вартість якого становить залежно від типу та потужності близько 50% вартості ДПТ.

На рис. 3. представлена графічна залежність ринкової вартості генераторів різних типів залежно від своїх потужності. Ціна електричних машин вказана в умовних одиницях, де 1у.о.=2грн.

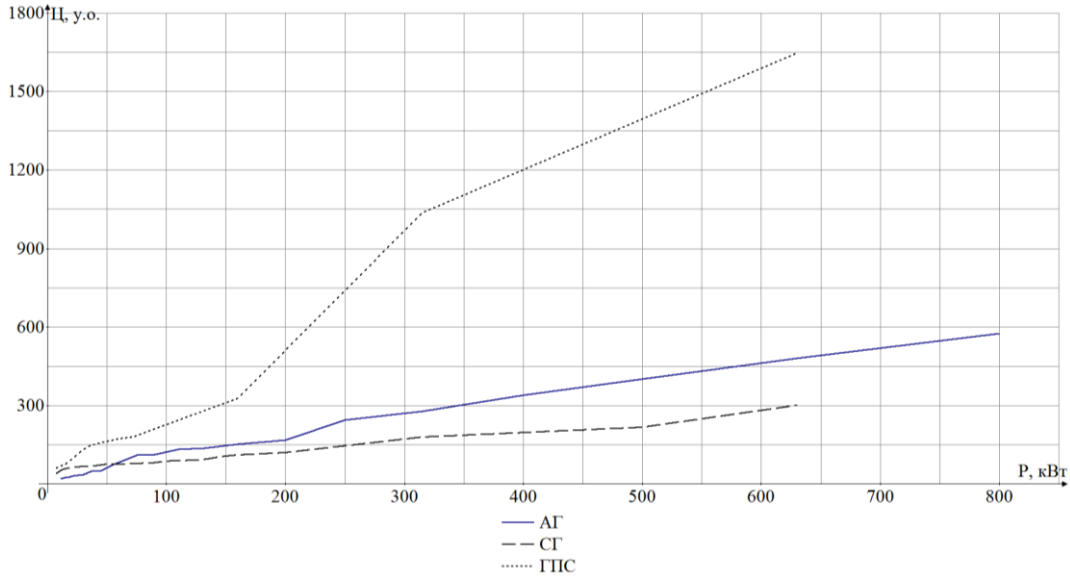


Рис. 3 – Залежність вартості генераторів від їхньої потужності

Аналіз цього економічного порівняння показує, що застосування ГПТ є найменш виправданим і підтверджується відсутністю даних генераторів на станціях типу, що розглядається. Особливо це буде проявлятися, якщо врахувати вартість інверторів та додаткових фільтрів, що згладжують для забезпечення необхідної якості електроенергії.

На рис. 4. показаний фрагмент вище наведеної залежності для діапазону малих потужностей. Звідси видно, що використання АГ економічно виправдане за потужності генератора ~ 50 кВт, за більшої потужності економічно виправдано СГ. У літературі найбільш доцільним з техніко-економічних міркувань рекомендується застосовувати асинхронні генератори потужністю трохи більше 20 кВт. На нашу думку дана різниця в потужностях АГ, рекомендованих до застосування пов'язана з тим, що останнім часом проблема з громіздкими і дорогими конденсаторами збудження відійшла на другий план, оскільки створені високоефективні плівкові конденсатори серії K78-17, що самовідновлюються, які за своїми техніко-економічними показниками перевершують конденсатори попередніх серій. Таке якісне поліпшення характеристик конденсаторів створило передумови для розширення сфери

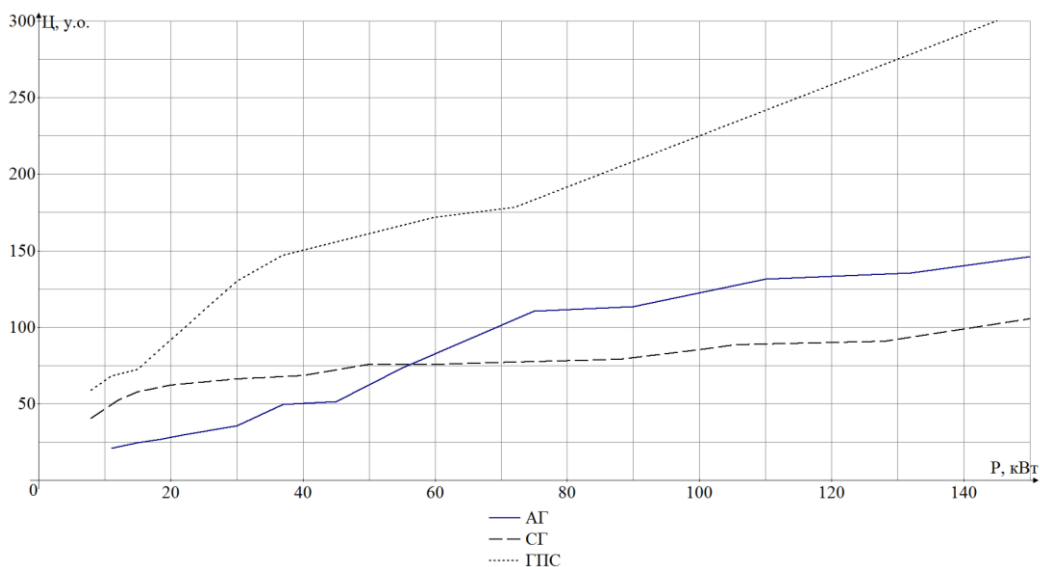


Рис. 4 – Фрагмент залежності вартості генераторів від їхньої потужності

застосування АГ з конденсаторним самозбудженням. Даний графік підтверджує тенденцію використання АГ на вітроенергетичних установках, де за малих потужностей вітроагрегату АГ перевищують СГ за низкою техніко-економічних показів.

Характер залежності вартості генераторів від потужності пояснюється залежністю маси генераторів від потужності (див. рис. 5). На малих потужностях маси СГ більше, так як якір СГ цих потужностях більше ротора АГ через полюсності. На великих потужностях площа рамки РО АГ повинна бути великою для створення необхідного магнітного потоку, що забезпечує задану потужність. У зв'язку з цим розміри ротора АГ значно перевищують розміри якоря СГ, де такої залежності немає, а розмір машини визначаються струмами статора. Значення потужності, коли маси СГ і АГ рівні, становить близько 90 кВт.

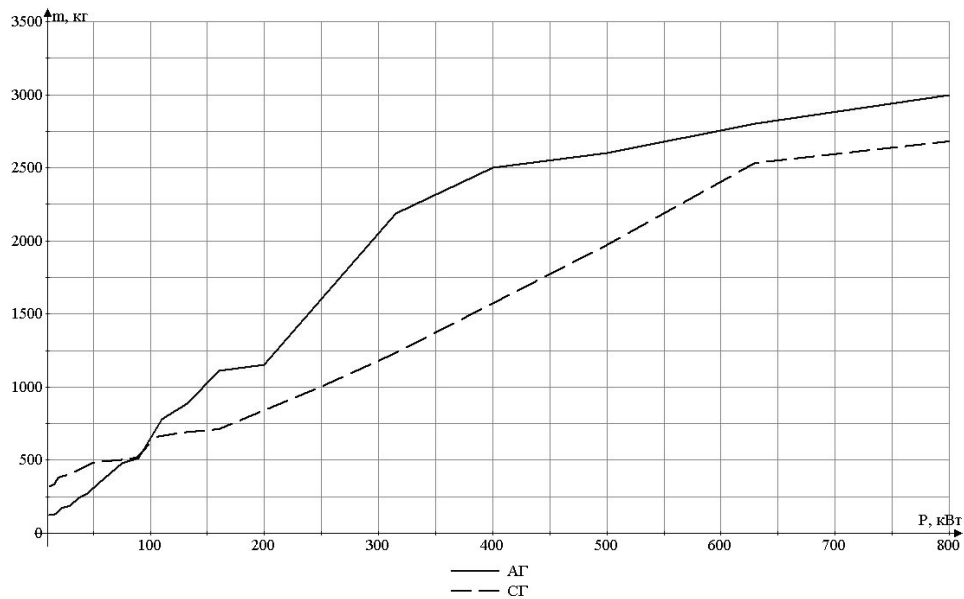


Рис. 5 – Залежність маси генераторів від їхньої потужності

Визначено орієнтовні терміни окупності для синхронних та асинхронних генераторів, показані на рис. 6.

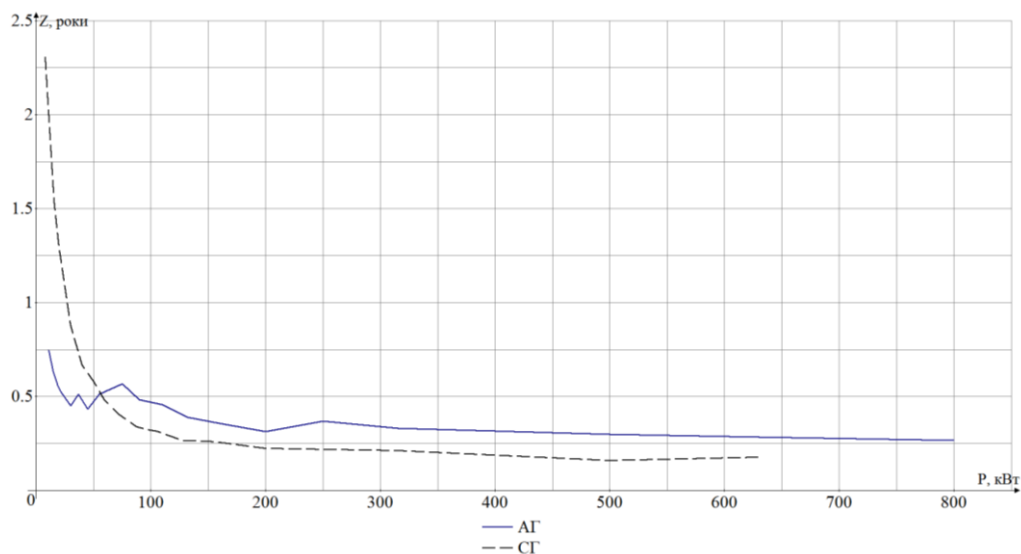


Рис. 6 – Термін окупності синхронних та асинхронних генераторів

Даний розрахунок носить суто економічний характер і не враховує технічних особливостей роботи АГ та СГ в автономному режимі та на мережу, що необхідно враховувати за повного техніко-економічного аналізу. Для остаточної відповіді на питання про доцільність застосування АГ для мГЕС необхідно провести повне порівняння технічних характеристик АГ і СГ у різних режимах роботи генераторів. Сюди відноситься зміна напруги та частоти на виході генератора при пульсаціях витрати та напору на мГЕС, а також при режимних змінах витрати. Це питання вимагає ретельного опрацювання, так як на мГЕС малої потужності може бути використаний спрощений регулятор, у зв'язку з чим точність підтримки частоти обертання гідроагрегату та його потужності нижче, ніж у великих ГЕС.

Висновки

Узагальнюючи результати проведеного аналізу можна відзначити, що питання використання асинхронних генераторів, або асинхронних двигунів як генератори на міні ГЕС, вимагають подальшого вивчення з детальним опрацюванням методик і теорій роботи АГ у нормальних, аварійних та перехідних режимах при автономній роботі та роботі на БЕС. Поряд з цим, у літературі відсутні чіткі рекомендації та критерії вибору типу генератора на мГЕС (синхронні або асинхронні) залежно від потужності та положення мГЕС в БЕС. Вирішення вищевказаних завдань дозволить підвищити техніко-економічні показники мГЕС, знизити капітальні витрати і собівартість електроенергії, що виробляється, що, зрештою, призведе до більш ефективного використання відновлюваних джерел енергії.

Вибір типу генератора, а отже і вартість капітальних вкладень, є визначальним при проектуванні, реконструкції та відновленні малих та мікро ГЕС.

Генератори постійного та їх системи стабілізації напруги та частоти є найбільш дорогими та є економічно невиправданими для застосування на малих та мікро ГЕС.

Використання АГ економічно виправдане за потужності генератора до ~50 кВт, за більшої потужності економічно виправдано СГ.

Значення потужності, коли маси СГ і АГ рівні, становить близько 90 кВт.

Список використаних джерел:

1. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1: Ветроэлектрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
2. Програма розвитку нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії та малої гідро- і теплоенергетики, складова частина Національної енергетичної програми України до 2010р. / Держкоженергрозбереження. – Київ, 1997.
3. Поярков М. Ф. Сельские электрические станции и подстанции. – М. : Гос. изд-во сельхоз. лит., 1954. – 400 с.
4. Малая гидроэнергетика / Л. П. Михайлов, Б. Н. Фельдман, Т. К. Марканова и др. – М. : Энергоиздат, 1989.
5. Ang K. H. PID control system analysis, design, and technology / Ang K. H., Chong G., Li Y. // *IEEE Trans. on Control Syst. Tech.* – 2005. – Vol. 13, № 4. – Pp. 559-576.
6. Лурье З. Я. Оптимизация параметров ПИД-регулятора системы управления частотой вращения ротора гидротурбины / З. Я. Лурье, В. Н. Дмитерко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Энергетические и технологические процессы и оборудование. – 2003. – № 9.
7. Astrorn K. J. Advanced PID control / Astrorn K. J., Hagglund T. // *ISA. The Instrumentation, Sysytem, and Automation Society.* – 2006. – 460 p.
8. Li Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art / Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. // *IEEE Control Systems Magazine.* – 2006. Feb. – Pp. 41-54.
9. Жерняк А. П. Компьютерная система регулирования скорости гидротурбины / А. П. Жерняк, З. Я. Лурье, В. Н. Дмитерко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Технологии в машиностроении. – 2001. – № 7.
10. Zwart P. J. Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics / Zwart P. J., Gerber A. G., Belamri T. A. // *ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow (Yokohama, Japan, May 30 -June 3,2004).* – Yokohama, 2004. – Paper No. 152.
11. Влияние колебаний напора на точность регулирования параметров гидротурбин / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Д. В. Ириков, В. Е. Мельников // *Східно-Європейський журнал передових технологій.* – 2014. – № 3/2 (69). – С. 41-43.

12. Канюк Г. И. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. – Харьков : Точка, 2016. – 332 с.

13. Прецизионные системы энергосберегающего автоматического регулирования турбогенераторных установок электрических станций / Г. И. Канюк, Е. Н. Близначенко, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников, И. А. Бабенко. – Харьков : Точка, 2015. – 126 с.

14. Канюк Г. И. Прецизионные системы автоматического регулирования гидротурбины / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія “Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування”*. – 2015. – №17(1126). – С. 91-96.

Reference:

1. Krivcov, VS, Olejnikov, AM & Jakovlev AI 2003, *Neischerpaemaja jenergija. Kn. 1: Vetrojelektrogeneratory, [Inexhaustible Energy. Volume 1: Wind Power Generators]*, *Nac.ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t»*, Sevast. nac. tehn. un-t, Har'kov, Sevastopol'.

2. Derzhkomenerhrozberzhennia 1997, *Prohrama rozvytku netradytsiinykh i vidnovliuvalnykh dzherel enerhii ta maloi hidro- i teploenerhetyky, skladova chastyna Natsionalnoi enerhetychnoi prohramy Ukrainy do 2010r.*, [The Program for the development of non-traditional and renewable energy sources and small hydro and thermal power, a component of the National Energy Program of Ukraine until 2010.], Kyiv.

3. Pojarkov, MF 1954, *Sel'skie jelektricheskie stancii i podstancii, [Rural power plants and substations]*, Gos. izd-vo sel'hoz. lit., Moskva.

4. Mihajlov, LP, Fel'dman, BN & Markanova, TK 1989, *Malaja gidrojenergetika, [Small hydropower]*, Jenergoizdat, Moskva.

5. Ang, KH & Chong, GLiY 2005, 'PID control system analysis. design and technology', *IEEE Trans. on Control Syst. Tech.*, Vol.1, no. 4, Pp. 559-576.

6. Lurye, ZYa & Dmiterko, VN 2003, 'Optimizatsiya parametrov PID-regulyatora sistemy upravleniya chas-totoy vrashcheniya rotora gidroturbiny', [Optimization of PID parameters of the hydraulic turbine rotor speed control system], *Vestnik NTU «KhPI»*. *Energeticheskiye i tekhnologicheskiye protsessy i oborudo-vaniye*, no 9.

7. Astrorn, KJ & Hagglund, T 2006, 'Advanced PID control' *ISA –The Instrumentation. Sysytem. and Automation Society*, 460 p.

8. Li, Y., Ang, KH & Chong, GCY 2006, 'Patents. Software. and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art' *IEEE Control Systems Magazine*, Feb, Pp. 41-54.

9. Zhernyak, AP, Lurye, ZY & Dmiterko, VN 2001, 'Kompyuternaya sistema regulirovaniya skorosti gidroturbiny', [Computer-controlled hydraulic turbine speed control system], *Vestnik NTU «KhPI»*. *Tekhnologii v mashinostroyenii*, no 7.

10. Zwart, PJ, Gerber, AG & Belamri, TA 2004, 'Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics' *ICMF 2004 In-ternational Conference on Multiphase Flow Yokohama. Japan. May 30 -June 3*, Paper no. 152.

11. Kanyuk, GI, Mezerya, AYU, Irikov, DV & Melnikov, VE 2014, 'Vliyaniye kolebaniy napora na tochnost regulirovaniya parametrov gidroturbin', [Influence of head fluctuations on the regulation accuracy of hydraulic turbines], *Skhidno-Evropeyskiy zhurnal peredovikh tekhnologiy*, no 3/2, Pp. 41-43.

12. Kanyuk, GI, Mezerya, AYU & Suk, IV 2016, *Metody i modeli energosberegayushchego upravleniya energeticheskimi ustanovkami elektro-stantsiy, [Methods and models for energy-saving control of power plants]*, Tochka, Kharkov.

13. Kanyuk, GI, Bliznichenko, EN, Mezerya, AYU, Melnikov, VE & Babenko, IA 2015, *Pretsizionnyye sistemy energosberegayushchego avtomaticheskogo regulirovaniya turbogeneratornykh ustanovok elektricheskikh stantsiy, [Precision systems of energy-saving automatic control of turbine-generator units of power plants]*, Tochka, Kharkov.

14. Kanyuk, GI, Mezerya, AYU & Melnikov, VE 2015, 'Pretsizionnyye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya gidroturbiny', [Precision automatic control systems], *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu “KhPI”*. *Seriya “Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya”*, no 17, Pp. 91-96.

Стаття надійшла до редакції 14 червня 2023 року