

**АНАЛІЗ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ АВТОНОМНИХ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З АСИНХРОННИМИ
ГЕНЕРАТОРАМИ**

В. М. Головка, доктор технічних наук, професор

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»,*

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

І. В. Косточка, аспірант

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»*

E-mail: golovkovm@ukr.net

Анотація. *Наведено аналіз сучасних досліджень, присвячених паралельній роботі автономних вітроенергетичних установок з асинхронними генераторами. Розглянуто переваги та обмеження використання асинхронних машин у складі децентралізованих енергосистем, зокрема простоту конструкції, надійність, економічність. Проаналізовано різні підходи до організації паралельної роботи, включно з особливостями забезпечення та підтримки самозбудження, застосуванням конденсаторних батарей, схемами підключення генераторів різної потужності та методами регулювання напруги і частоти. Окрему увагу приділено ролі математичного, імітаційного моделювання та експериментальних досліджень, що дозволяють оцінити ефективність систем при змінних режимах роботи. Також розглянуто перспективність застосування контролерів, зокрема з нечіткою логікою, для підвищення стабільності та ефективності роботи автономних енергосистем. За результатами аналізу визначено напрями подальших досліджень, зокрема необхідність комплексного врахування перехідних процесів, змін швидкості вітру та впливу характеристик навантаження на роботу паралельно з'єднаних генераторів.*

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, енергія вітру, вітроенергетична установка, асинхронний генератор, паралельна робота, автономна робота*

Актуальність. *Сучасні енергосистеми в світі перебувають на етапі переходу від централізованої моделі генерації до децентралізованої, що сприяє розвитку*

розподіленої генерації. Подібна модель енергосистеми має ряд переваг, таких як менші втрати на передачу електроенергії через зближення споживача з джерелом енергії, підвищена гнучкість системи, стійкість енергопостачання, особливо в умовах віддалених об'єктів [1, 2, 3]. Децентралізовані або розподілені енергосистеми дозволяють більш ефективно використовувати місцеві енергоресурси, сприяють демократизації енергопостачання та можуть забезпечити доступ до енергії для більш ніж одного мільярду людей у найближчі роки [4]. Крім того, перехід до такого типу енергосистеми позитивно впливає на рівень енергетичної небезпеки, забезпечуючи більший рівень автономності від централізованих мереж [5]. Істотним фактором, що сприяє розвитку такого типу енергосистем є застосування відновлюваних джерел енергії, що дозволяє зменшити негативні екологічні наслідки та не залежати від, наприклад, постачання певних паливних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним з ключових напрямків розвитку в рамках вищезгаданої тенденції є мала вітроенергетика. Вона характеризується порівняно низькими капітальними витратами, екологічністю та здатністю задовольняти локальні енергетичні потреби віддалених споживачів. Зростає кількість мікромереж, що включають вітроенергетичні установки малої потужності як локальні джерела електроенергії [6]. Подібні рішення особливо актуальні для регіонів з недостатньо розвиненою інфраструктурою або для споживачів, приєднання яких до централізованої системи економічно необґрунтоване [7].

У складі автономних вітроенергетичних установок (АВЕУ) використовуються різні типи генераторів, зокрема синхронні та асинхронні. Синхронні генератори забезпечують стабільні параметри генерованої електроенергії та можливість безпосереднього регулювання, проте потребують складних систем збудження та керування. На відміну від них, асинхронні генератори мають порівняно просту конструкцію, нижчу вартість та витрати на обслуговування, вищу надійність, що є вирішальними факторами для автономних систем із ускладненим доступом до інфраструктури [8].

Через поступове збільшення енергетичних потреб споживачів у розподілених енергосистемах, в тому числі без доступу до централізованої енергосистеми, постає необхідність збільшення генерованої потужності, що досягається зокрема збільшенням кількості генеруючих установок та забезпеченням їх паралельної роботи. Також така потреба може бути обумовлена наприклад наявністю одно- та трифазних споживачів. Ця публікація спрямована на систематизацію наявних досліджень, що стосуються паралельної роботи асинхронних генераторів у складі АВЕУ, та виявлення можливих недоліків та упущень, що потребують подальшого вдосконалення та розробки.

Мета дослідження – провести порівняльний аналіз сучасних досліджень, присвячених паралельній роботі вітроенергетичних установок в автономних енергосистемах.

Матеріали та методи дослідження. Використання АГ у складі ВЕУ пропонує низку переваг, таких як простота конструкції, надійність, більша захищеність від коротких замикань. Ці переваги АГ дозволяють розглядати їх як пріоритетну основу для живлення віддалених від енергосистеми споживачів у складі АВЕУ. У свою чергу, через зростання енергетичних потреб споживачів постає необхідність збільшення потужності автономних енергосистем, що досягається, зокрема, збільшенням кількості генераційних установок. Порівняно з паралельно працюючими синхронними генераторами (СГ), у асинхронних машин є ряд переваг, зокрема необов'язковість синхронізації, простіша будова системи збудження, стійкість до змін навантаження та швидкостей обертання роторів[12, 22, 25].

Більшість наявних досліджень присвячених роботі ВЕУ з АГ розглядає роботу енергоустановок приєднаних до централізованої енергосистеми [9, 10, 11, 12] або однієї ВЕУ автономно, без централізованої енергосистеми.

У [9] запропоновані еквівалентна схема та математична модель для одного та двох паралельно працюючих АГ з самозбудженням. Наведено систему рівнянь, розв'язання якої дозволяє побудувати вихідні характеристики для різних швидкостей обертання та різних значень ємності збудження. Також проаналізовано розподіл потужності між генераторами, що обертаються з різною швидкістю. До

аспектів, що потребують вдосконалення, можна віднести те, що розглянуто лише випадок для паралельної роботи двох генераторів однакової потужності, ідеалізованість середовища моделювання без врахування турбулентних коливань вітру, стрибків навантаження, тощо.

Ключовою відмінністю АГ від СГ є потреба у зовнішньому джерелі реактивної потужності. При роботі з мережею джерелом реактивної потужності для генератора виступає мережа. У системах, що працюють автономно від зовнішньої енергосистеми, як джерела реактивної потужності застосовують батареї конденсаторів, які забезпечують самозбудження АГ. На рис. 1 наведена стандартна спрощена схема підключення трифазного АГ до конденсаторів збудження та навантаження [23].

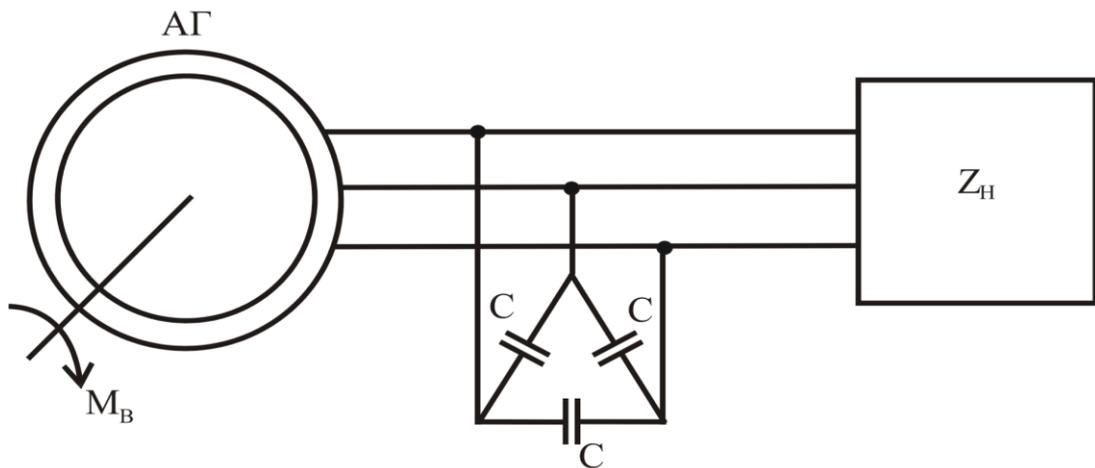


Рис. 1. Стандартна схема підключення асинхронного генератора.

Для підключення двох і більше АГ на паралельну роботу існує багато варіантів схем включення. Відмінності стосуються як підключення та розподілу між генераторами навантаження, так і конденсаторів збудження. На рис. 2 наведено найпоширенішу схему підключення двох АГ на паралельну роботу. Системи підключені таким чином мають такий алгоритм включення:

1. Генератори з'єднуються з узгодженим чергуванням фаз в спільній точці підключення.
2. До спільної точки підключення приєднується загальний парк конденсаторів збудження.
3. На генератори подається первинне спільне навантаження.

4. Після наближення генерованої напруги та частоти до номінальних значень на генератори подається основне спільне навантаження.

У цьому алгоритмі при незначних навантаженнях менш потужний АГ може переходити у режим двигуна через від'ємний коефіцієнт потужності.

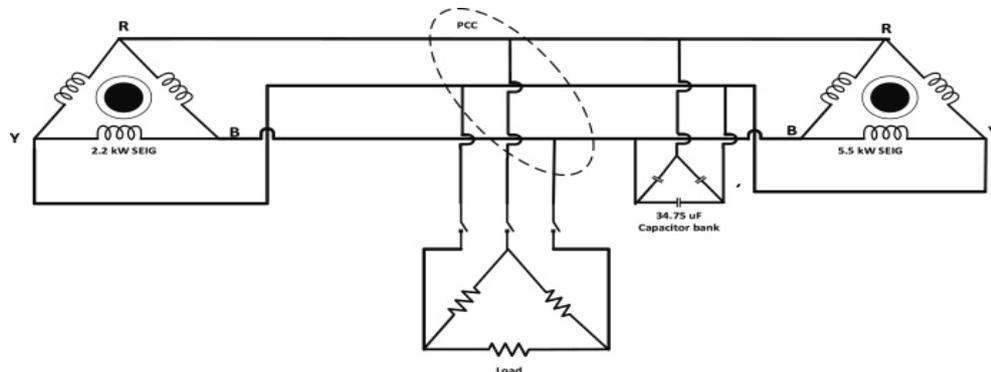


Рис. 2. Схема підключення асинхронних генераторів на паралельну роботу

Для систем з АГ різної потужності характерний перехід машин меншої потужності у режим двигуна в режимі холостого ходу та при незначних навантаженнях через від'ємний коефіцієнт потужності. Тобто менш потужний генератор виступає у ролі споживача для більш потужного. Для запобігання цього ефекту можуть застосовуватись первинні індивідуальні навантаження. У наведеному в [15] альтернативному алгоритмі включення двох АГ на паралельну роботу здійснюється так:

1. Генератори досягають номінальних швидкостей обертання.
2. На кожен генератор підключається індивідуальне первинне навантаження.
3. Регулюванням ковзання одного з генераторів вирівнюються їх напруги та частоти.
4. За допомогою блоку синхронізації машини вмикаються на паралельну роботу.
5. Після вирівнювання напруги та частоти на клеммах АГ вмикається основне навантаження.
6. Після ввімкнення основного навантаження, первинні навантаження можуть бути відключені.

На рис. 3 наведено схему підключення для вищезазначеного алгоритму. Ця схема забезпечує ефективне використання менш потужних генераторів у

паралельній системі, підвищуючи загальний ККД системи. Проте вона має ряд недоліків, зокрема потребує використання блоку синхронізації, двох індивідуальних систем збудження, виокремлення первинних індивідуальних навантажень для кожного генератора.

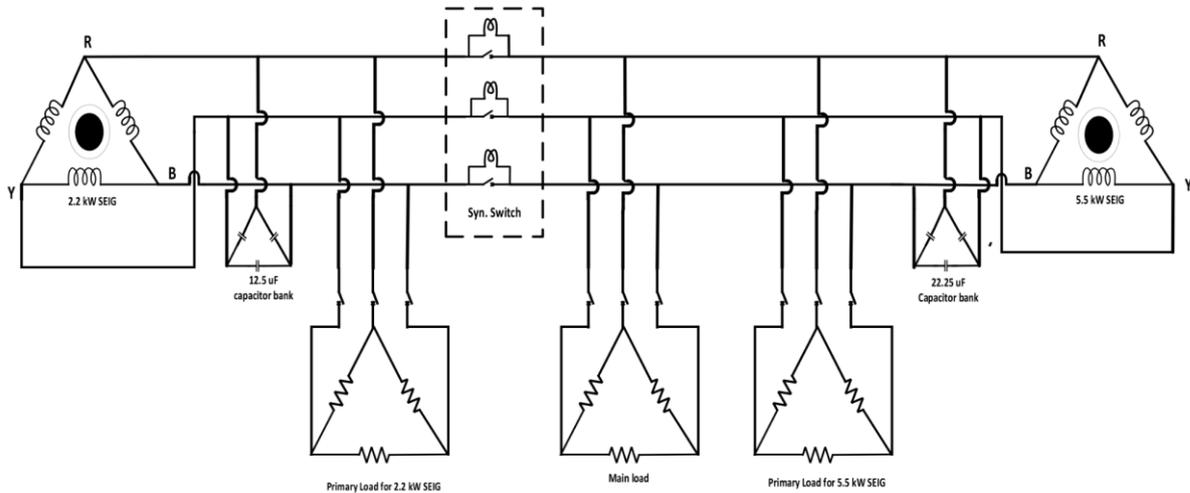


Рис. 3. Схема підключення асинхронних генераторів різної потужності на паралельну роботу з первинними індивідуальними навантаженнями

Однією з особливостей вищезгаданих досліджень є те, що робота АГ розглядається при фіксованих швидкостях обертання. Ця умова дещо ускладнює застосування отриманих результатів та підходів до АГ у складі ВЕУ. Істотним фактором що впливає на автономну роботу АГ у складі АВЕУ є мінливий характер вітрового потоку та постійна зміна швидкості вітру. Математичні та експериментальні моделі фіксують залежність величини мінімальної ємності для самозбудження від швидкості обертання ротора АГ. Ємність необхідна для самозбудження зменшується пропорційно зі збільшенням швидкості обертання [23]. Також встановлено, що при більш інтенсивному прискоренні самозбудження досягається на меншій швидкості обертання при фіксованій мінімальній ємності збудження. У табл. 1 наведено мінімальні значення ємності, за якої здійснювалося збудження АГ у [14], для трьох дослідів з різною інтенсивністю прискорення. Предметом майбутнього дослідження може бути зворотна залежність – зростання мінімальної ємності для підтримки збудження збудження при різній інтенсивності уповільнення обертання.

1. Залежність мінімальної ємності збудження від швидкості обертання, для трьох прискорень з різною інтенсивністю

C_min (μ F)	Low ramp up	Medium ramp up	Large ramp up
24.2	1420	1344	1300
26.5	1360	1240	1200
28.1	1320	1200	1170
30.2	1280	1170	1110
32.8	1240	1128	1090
34.8	1200	1104	1060
36	1188	1080	1038
38.88	1130	1040	992
42.3	1094	1000	940
44.8	1060	960	900
46.7	1040	920	860
48.2	1000	900	840
50.8	980	860	800
53.1	960	834	780
56.1	940	786	764
60.1	922	754	720
62.7	910	738	700
66.3	890	720	694

Оскільки в автономних системах єдиним або основним джерелом енергії для споживача є АГ, постає необхідність підтримки робочих параметрів максимально наближеними до номінальних значень. Вихідна напруга генераторів може бути регульованою шляхом приєднання до генераторів ємності збудження або ж зміною швидкості обертання ротору однієї або декількох паралельно працюючих машин. Математична модель та експериментальні дані наведені у [16] підтверджують, що при збільшенні навантаження для підтримки величини напруги має бути збільшена ємність збудження або швидкість обертання АГ. Вищезгадане дослідження також фіксує більш істотний вплив зміни швидкості АГ з короткозамкненою обмоткою ротора, порівняно з АГ з фазним ротором аналогічної потужності.

Існує взаємозв'язок між характером навантаження та необхідною зміною ємності або швидкості обертання. Таким чином при ємнісному навантаженні потребується менша зміна ємності та швидкості обертання, адже навантаження своєю ємністю компенсує реактивну потужність споживану генераторами. В свою чергу індуктивне навантаження потребує більшої зміни ємності збудження та швидкості обертання [16].

Графік зміни ємності збудження порівняно з графіком зміни швидкості обертання для підтримання певної величини генерованої напруги є більш пологим.

Виходячи з цього, запропоновано алгоритм регулювання вихідної напруги, який полягає у зміні ємності збудження між декількома фіксованими значеннями з подальшим більш точним регулюванням шляхом зміни швидкості обертання одного або обидвох АГ.

У деяких дослідженнях запропоновано математичні моделі для дослідження паралельної роботи автономних АГ у складі ВЕУ включно з перехідними процесами. Наприклад, у [18] наведена математична модель, що може екстраполюватися на будь яку кількість паралельно працюючих АГ з КЗ ротором різної потужності та інших параметрів. Наведені результати експериментальних досліджень та імітаційного моделювання системи з двох паралельно працюючих АГ у середовищі Matlab/Simulink дозволяють стверджувати про достатню точність наведеної моделі. Значною перевагою запропонованої моделі є можливість моделювання реальних сценаріїв роботи вітроелектричної станції такі як зміна швидкості вітру, зміни навантаження, включення додаткових АГ на паралельну роботу або ж навпаки їх відключення тощо. У майбутньому із застосуванням цієї ж моделі можливо дослідити значний спектр можливих сценаріїв роботи, як наприклад залежність робочих параметрів агрегатів від зміни ємності збудження.

Залежно від специфіки автономного споживача та відстані між ВЕУ та споживачем змінюється вплив опорів кабельних трас на роботу системи. Так наприклад при невеликих відстанях між генераторами та споживачем мають місце менші реактивні та активні опори кабельних трас, що може спричиняти більш інтенсивні зміни параметрів електроенергії при зміні режимів роботи, перемиканні навантаження, включенні на паралельну роботу тощо [21].

Одним з напрямів досліджень стосовно роботи ВЕУ у складі автономних систем є застосування контролерів різного типу. Контролери різного типу мають широкий спектр сценаріїв застосування, проте можуть мати значну вартість залежно від конструкції, що робить їх впровадження не завжди економічно доцільним. Такі пристрої можуть застосовуватись для вирішення різних задач, таких як:

- підтримка робочої напруги шляхом компенсації реактивної потужності;
- підтримка частоти за умови змінної швидкості вітру;

- розподіл активної та реактивної складових навантаження між паралельно працюючими генераторами;

У [26] запропонована модель контролеру напруги та частоти (Voltage Frequency Controller), який являє собою комбіноване рішення на основі статичного компенсатору реактивної потужності (STATCOM) та електронного контролеру навантаження (Electronic Load Controller). Він дозволяє стабілізувати параметри генерованої електроенергії, що змінюються при стрімких змінах навантаження. У [20] наведена модель електронного контролеру навантаження, проте вона обмежена специфікою міні-ГЕС, зокрема фіксованими швидкостями обертання.

Одним з підходів до підвищення ефективності паралельної роботи ВЕУ з АГ є застосування контролерів з нечіткою логікою (Fuzzy Logic Controllers). Ці контролери можуть керувати різними параметрами навантаження та паралельно працюючих АВЕУ, такими як активна та реактивна складові навантаження, кут атаки лопатей тощо [27].

Результати досліджень та їх обговорення. У табл.2 наведені результати порівняльного аналізу паралельної роботи вітроелектроустановок з асинхронними генераторами.

2. Перелік опрацьованих джерел та їх короткий опис

Джерело	Сутність роботи	Необхідні удосконалення
Wang and Chen [9]	Запропонована еквівалентна схема та математична модель двох паралельно працюючих асинхронних генераторів.	Не розглянуто роботу без мережі, аналіз обмежений двома генераторами однакової потужності.
Al-Senaidi et al. [10]	Проведено стаціонарний аналіз паралельної роботи АГ з різним та однаковим числом полюсів, запропонована математична модель для оцінки паралельної роботи, розглянуто вплив різних чинників на струми та напруги компонентів системи.	Аналіз обмежений стаціонарним режимом, не розглянуті перехідні процеси, можливі зміни навантаження та швидкостей обертання роторів.

Choudhary and Saket [11]	Проведено стаціонарний аналіз процесу самозбудження асинхронного генератора, запропонована математична модель для визначення граничних значень ємності, за якої досягається самозбудження.	Не розглянуто випадок з декількома генераторами.
Al-Bahrani and Malik [12]	Запропоновано математичну модель та експериментально досліджено паралельну роботу АГ з фазним та КЗ ротором. Досліджено залежність розподілу потужності між декількома АГ з фазним ротором від різниці у швидкостях обертання, зміни потужності навантаження та ємності збудження.	Не досліджено вищезазначені залежності для АГ з КЗ ротором.
Khelifi and Alshammari [13]	Запропонована модель трифазного асинхронного генератора з самозбудженням	Не розглянуто випадок з автономною або паралельною роботою даного типу АГ
Sibrahim et al. [14]	Запропонована математична модель та експериментально досліджено вплив зміни прискорення обертання на процес самозбудження.	Не розглянуто випадок з декількома генераторами з різним прискоренням обертання.
Rajak et al. [15]	Експериментально досліджено роботу двох АГ потужністю 2,2 та 5,5 кВт з двома різними схемами включення на паралельну роботу.	Не досліджено вплив зміни швидкостей обертання, експеримент обмежений двома АГ
Al-Bahrani and Malik [16]	Експериментально досліджено паралельну роботу автономних АГ з КЗ та фазним ротором, однакової потужності	Аналіз обмежений стаціонарним режимом, не розглянуті перехідні процеси.
Palle and Simoes [18]	Запропоновано математичну, імітаційну модель а також експериментально досліджено паралельну роботу автономних АГ у складі ВЕУ, включно з перехідними режимами, що може екстраполюватися на значну кількість АГ з різними параметрами	Досліджено невеликий перелік перехідних процесів при фіксованій ємності збудження, експеримент обмежений двома АГ.
Singh et al. [20]	Запропоновано модель контролеру напруги та частоти для паралельно працюючих автономних АГ у складі міні-ГЕС	Ефективність контролеру не підтверджена експериментально, модель обмежена специфікою міні-ГЕС
Watson and Milner [22]	Запропонована математична модель та експериментальне дослідження паралельної автономної роботи двох однофазних АГ при фіксованих швидкостях та ємності системи збудження, досліджено розподіл навантаження між двома паралельно працюючими АГ залежно від зміни навантаження.	Не досліджено вплив зміни швидкостей обертання та ємності збудження.
Марков, Поляков [23]	На імітаційній моделі досліджено збудження автономного АГ у складі ВЕУ, вплив взаємної індуктивності обмоток	Модель обмежена одним генератором.

	статора та ротора на самозбудження.	
Ghanim and Alsammak [27]	Запропонована математична та імітаційна моделі АГ у складі ВЕУ з контролером з нечіткою логікою	Модель обмежена одним генератором.

Висновки і перспективи. Асинхронні генератори є перспективною основою для побудови автономних вітроенергетичних систем завдяки їх простоті, надійності та низькій вартості. Паралельна робота асинхронних генераторів дозволяє підвищити потужність та гнучкість автономних енергосистем, проте супроводжується рядом технічних задач, серед яких, зокрема, забезпечення стабільності самозбудження, розподіл навантаження та уникнення переходу малопотужних машин у двигунний режим. Ефективність роботи систем залежить від раціонального вибору алгоритмів підключення та методів регулювання вихідних параметрів, що вимагає як математичного моделювання, так і експериментальної перевірки. Значний потенціал має застосування сучасних контролерів, зокрема з нечіткою логікою, які дозволяють оптимізувати розподіл активної та реактивної потужності, стабілізувати напругу і частоту при змінних режимах роботи. Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці універсальних моделей для аналізу багатомашинних систем з урахуванням впливу реальних вітрових умов, змін навантаження, а також на вдосконаленні систем керування автономними мікромережами.

Список використаних джерел

1. Talha Bin Nadeem, Mubashir Siddiqui, Muhammad Khalid, Muhammad Asif, "Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies", *Energy Strategy Reviews*, v. 48, 2023, 101096, ISSN 2211-467X.
2. Moses Jeremiah Barasa Kabey, Oludolapo Akanni Olanrewaju, "Decentralized and Distributed Power Generation", 4th Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2023.
3. James Henki, "Benefits of Distributed Renewable Energy Systems for Sustainable Power Generation", *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, v. 13, no. 4, 2023, 1000323.
4. Carlo Vezzoli et al., "Designing Sustainable Energy for All", *Green Energy and Technology*, Springer, Cham, 2018, ISBN 978-3-319-70222-3, pp. 23-39.
5. Hermanus, L., Rose Cirolia, L., "Distributed energy technologies, decentralizing systems and the future of African cities", *Environment & Urbanization*, v. 36, no. 1, 2024, pp. 53-68.

6. James Henki, "Benefits of Distributed Renewable Energy Systems for Sustainable Power Generation", *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, v. 13, no. 4, 2023, 1000323.

7. Shadreck M. Situmbeko, "Decentralised Energy Systems and Associated Policy Mechanisms – A Review of Africa", *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, v. 7, no. 3, 2017, pp. 98-116.

8. Prajzencanc Pawel, Christian Kreischer, "A Review of New Technologies in the Design and Application of Wind Turbine Generators", *Energies*, v. 18, no. 15, 2025, 4082.

9. Y. J. Wang, B. R. Chen, "Parallel Operation of Three-phase Self-excited Induction Generators Driven by Renewable Energy Sources", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 635, 012021.

10. Saleh AL-Senaidi, Abdulrahman Alolah, Majeed Alkanhal, "Parallel operation of three-phase self-excited induction generators with different numbers of poles", *Eng. Sci. and Tech., an International Journal*, v.25, 2022, 100988.

11. Rishikesh Choudhary, R.K. Saket, "A critical review on the self-excitation process and steady state analysis of an SEIG driven by wind turbine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 47, 2015, pp.344-353.

12. Abdallah H. Al-Bahrani, Nazar H. Malik, "Parallel Operation of Self-Excited Induction Generators", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, v. 6, issue 1, 1994, pp.79-96.

13. Mohamed Arbi Khlifi, Badr M. Alshammari, "Steady State Analysis of an Isolated Self-Excited Dual Three-Phase Induction Generator for Renewable Energy". *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, v.3, 2014, pp.191-198.

14. M. Sibrahim, S. Aissou, R. Rouas, S. Haddad, N. Benamrouche, "Experimental determination of minimum capacitor for self-excitation of induction generators", *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, v.15, 2024, pp.109-116.

15. Mrinal Kanti Rajak, Jotirmoy Samanta, Rajen Pudur, "A hardware-based novel approach for parallel operation of two differently rated SEIGs", *Results in Engineering*, v. 17, 2023, 100825.

16. A.H. Al-Bahrani, N.H. Malik, "Voltage control of parallel operated Self Excited Induction Generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 8, 1993, pp. 236-242.

17. V. Bhandari, R. Dahal, T. Toftevaag, L. Lindquist, J. Marvik, B. Adhikary, "Analysis of parallel operation of SEIGs with voltage based controller in mini-grid", 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), Kathmandu, Nepal, 2012, pp. 252-258.

18. B. Palle, M. G. Simoes, F. A. Farret, "Dynamic simulation and analysis of parallel self-excited induction generators for islanded wind farm systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 4, 2005, pp. 1099-1106.

19. A. H. Al-Bahrani, N. H. Malik, "Steady-state analysis of parallel-operated self-excited induction generators", *IEE Proceedings-C*, v. 140, no. 1, 1993, pp. 49-55.

20. B. Singh, G. Kasal, A. Chandra and K. Haddad, "Electronic Load Controller for a Parallel Operated Isolated Asynchronous Generator Feeding Various Loads," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, v. 3, no. 4, 2011, pp. 101-114.

21. Муха Микола Йосифович, Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових автономних електроенергетичних системах: дис. ... док. наук: 05.09.03, Львів, 2018, 404 с.
22. D. B. Watson, I. P. Milner, "Autonomous and Parallel Operation of Self-Excited Induction Generators", *International Journal of Electrical Engineering & Education*, v. 22, no. 4, 1985, pp. 365-374.
23. В. С. Марков, І. В. Поляков, "До процесу збудження асинхронних генераторів", *Вісник НТУ "ХПІ"*, Харків, 2015, № 5 (1114), сс. 62-66.
24. *Distributed Wind Market Report: 2024 Edition / Lindsay Sheridan, Kamila Kazimierczuk, Jacob Garbe, Danielle Preziuso, United States of America, US Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory, 2024, 60 p.*
25. W. Freitas, J. C. M. Vieira, A. Morelato, L. C. P. da Silva, V. F. da Costa and F. A. B. Lemos, "Comparative analysis between synchronous and induction machines for distributed generation applications", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 1, 2006, pp. 301-311.
26. Rajasekhara Reddy Chilipi, Bhim Singh, Srinivasa Murthy, "A New Voltage and Frequency Controller for Standalone Parallel Operated Self Excited Induction Generators", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, v. 13, no. 1, 2012, pp. 1-17.
27. Ammar Shamil Ghanim, Ahmed Nasser B. Alsammak, "Modelling and simulation of self-excited induction generator driven by a wind turbine", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, Vol. 6 No. 8, Energy-saving technologies and equipment.

References

1. Talha Bin Nadeem, Mubashir Siddiqui, Muhammad Khalid, Muhammad Asif (2023). "Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies", *Energy Strategy Reviews*, 48, 101096, ISSN 2211-467X.
2. Moses Jeremiah Barasa Kabey, Oludolapo Akanni Olanrewaju (2023). "Decentralized and Distributed Power Generation", 4th Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2023.
3. James Henki (2023). "Benefits of Distributed Renewable Energy Systems for Sustainable Power Generation", *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 13 (4), 1000323.
4. Carlo Vezzoli et al. (2018). "Designing Sustainable Energy for All", *Green Energy and Technology*, Springer, Cham, 2018, ISBN 978-3-319-70222-3, 23-39.
5. Hermanus, L., Rose Cirolia, L. (2024). "Distributed energy technologies, decentralizing systems and the future of African cities", *Environment & Urbanization*, 36 (1), 53-68.
6. James Henki (2023). "Benefits of Distributed Renewable Energy Systems for Sustainable Power Generation", *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 13 (4), 1000323.
7. Shadreck M. Situmbeko (2017). "Decentralised Energy Systems and Associated Policy Mechanisms – A Review of Africa", *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 7 (3), 98-116.

8. Prajzencanc Pawel, Christian Kreischer (2025). "A Review of New Technologies in the Design and Application of Wind Turbine Generators", *Energies*, 18 (15), 4082.
9. Y. J. Wang, B. R. Chen, "Parallel Operation of Three-phase Self-excited Induction Generators Driven by Renewable Energy Sources", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 635, 012021.
10. Saleh AL-Senaidi, Abdulrahman Alolah, Majeed Alkanhal (2022). "Parallel operation of three-phase self-excited induction generators with different numbers of poles", *Eng. Sci. and Tech., an International Journal*, 25, 100988.
11. Rishikesh Choudhary, R.K. Saket (2015). "A critical review on the self-excitation process and steady state analysis of an SEIG driven by wind turbine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 344-353.
12. Abdallah H. Al-Bahrani, Nazar H. Malik (1994). Parallel Operation of Self-Excited Induction Generators, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 6 (1), 79-96.
13. Mohamed Arbi Khelifi, Badr M. Alshammari (2014). "Steady State Analysis of an Isolated Self-Excited Dual Three-Phase Induction Generator for Renewable Energy". *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, 3, 191-198.
14. M. Sibrahim, S. Aissou, R. Rouas, S. Haddad, N. Benamrouche (2024). "Experimental determination of minimum capacitor for self-excitation of induction generators", *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 15, 109-116.
15. Mrinal Kanti Rajak, Jotirmoy Samanta, Rajen Pudur (2023). "A hardware-based novel approach for parallel operation of two differently rated SEIGs", *Results in Engineering*, 17, 100825.
16. A.H. Al-Bahrani, N.H. Malik (1993). Voltage control of parallel operated Self Excited Induction Generators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 8, 236-242.
17. V. Bhandari, R. Dahal, T. Toftevaag, L. Lindquist, J. Marvik, B. Adhikary (2012). "Analysis of parallel operation of SEIGs with voltage based controller in mini-grid", 2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), Kathmandu, Nepal, 2012, 252-258.
18. B. Palle, M. G. Simoes, F. A. Farret (2005). "Dynamic simulation and analysis of parallel self-excited induction generators for islanded wind farm systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(4), 1099-1106.
19. A. H. Al-Bahrani, N. H. Malik (2011). "Steady-state analysis of parallel-operated self-excited induction generators", *IEE Proceedings-C*, 140 (1), 49-55.
20. B. Singh, G. Kasal, A. Chandra and K. Haddad (2011). "Electronic Load Controller for a Parallel Operated Isolated Asynchronous Generator Feeding Various Loads," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 3 (4), 101-114.
21. Mukha, M. Y. (2018). *Dynamichna kompensatsiia reaktivnoi potuzhnosti v sudnovykh avtonomnykh elektroenerhetychnykh systemakh [Dynamic compensation of reactive power in ship autonomous power systems] (Doctoral dissertation, Lviv)*. 404.
22. D. B. Watson, I. P. Milner (1985). "Autonomous and Parallel Operation of Self-Excited Induction Generators", *International Journal of Electrical Engineering & Education*, 22 (4), 365-374.

23. Markov, V. S., & Polyakov, I. V. (2015). Do protsesu zbudzhennia asynkhronnykh heneratoriv [On the excitation process of asynchronous generators]. Visnyk NTU "KhPI", (5[1114]), 62–66. Kharkiv.

24. Distributed Wind Market Report: 2024 Edition / Lindsay Sheridan, Kamila Kazimierczuk, Jacob Garbe, Danielle Preziuso, United States of America, US Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory, 60.

25. W. Freitas, J. C. M. Vieira, A. Morelato, L. C. P. da Silva, V. F. da Costa and F. A. B. Lemos (2006). "Comparative analysis between synchronous and induction machines for distributed generation applications", IEEE Transactions on Power Systems, 21(1), 301-311.

26. Rajasekhara Reddy Chilipi , Bhim Singh, Srinivasa Murthy (2012). "A New Voltage and Frequency Controller for Standalone Parallel Operated Self Excited Induction Generators", International Journal of Emerging Electric Power Systems, 13 (1), 1-17.

27. Ammar Shamil Ghanim, Ahmed Nasser B. Alsammak (2020). "Modelling and simulation of self-excited induction generator driven by a wind turbine", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (8), Energy-saving technologies and equipment.

ANALYSIS OF PARALLEL OPERATION OF AUTONOMOUS WIND POWER PLANTS WITH ASYNCHRONOUS GENERATORS

V. Golovko. I. Kostochka

Abstract. *The article presents an analysis of modern studies dedicated to the parallel operation of autonomous wind energy systems with asynchronous generators. The advantages and limitations of using asynchronous machines in decentralized power systems are considered, particularly their simple design, reliability, and cost-effectiveness. Various approaches to organizing parallel operation are analyzed, including the features of ensuring and maintaining self-excitation, the use of capacitor banks, connection schemes for generators of different capacities, and methods of voltage and frequency regulation. Special attention is paid to the role of mathematical and simulation modeling, as well as experimental studies, which make it possible to evaluate the efficiency of systems under variable operating conditions. The prospects of applying controllers, especially those based on fuzzy logic, to enhance the stability and efficiency of autonomous power systems are also discussed. Based on the analysis, directions for further research are identified, particularly the need for a comprehensive consideration of transient processes, wind speed fluctuations, and the impact of load characteristics on the operation of parallel-connected generators.*

Key words: *renewable energy sources, wind energy, wind power plant, asynchronous generator, parallel work, autonomous work*