

**ПОПЕНКО КОСТЯНТИН ПЕТРОВИЧ** ✉ – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5251-1572>; e-mail: [kostiantyn.popenko@ieec.khpi.edu.ua](mailto:kostiantyn.popenko@ieec.khpi.edu.ua)

**ЗАГАЙНОВА ОЛЕКСАНДРА АНАТОЛІЙВНА** – кандидатка технічних наук, доцентка кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8558-3211>; e-mail: [zagaynova@gmail.com](mailto:zagaynova@gmail.com)

**ЛЕСНЯК ВЛАДИСЛАВ ІГОРОВИЧ** – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9919-7382>; e-mail: [Vladyslav.Lesniak@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Vladyslav.Lesniak@ieec.khpi.edu.ua)

**ВАРВ'ЯНСЬКА ВІКТОРІЯ ВІТАЛІЙВНА** – старша викладачка кафедри промислової і біомедичної електроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4962-6245>; e-mail: [Viktoria.Varvianska@khpi.edu.ua](mailto:Viktoria.Varvianska@khpi.edu.ua)

**ГЕРМАНЧУК ДМИТРО ДМИТРОВИЧ** – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: [Dmytro.Hermanchuk@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Dmytro.Hermanchuk@ieec.khpi.edu.ua)

## МЕТОДИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МАЛОСИГНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ В УМОВАХ ВИСОКОГО ПРОНИКНЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

Проведено уточнення межі та структури малосигнальної стійкості в загальній класифікації стійкості енергосистем. Запропоновано розширену класифікацію малосигнальної стійкості, що дозволяє більш точно та структуровано оцінювати реакцію енергосистеми на малі збурення в умовах високого проникнення відновлюваних джерел енергії. Нова класифікація допомагає систематизувати різні типи малосигнальних відхилень і визначити їхній вплив на статичну стійкість, що підвищує точність аналізу та полегшує вибір адекватного інструментарію для моделювання. Проведено детальний порівняльний аналіз сучасних підходів до моделювання статичної та малосигнальної стійкості, включно з класичними математичними методами, статистичними техніками та інструментами штучного інтелекту. Встановлено, що методи Стохастичного поверхневого відгуку, імітаційного моделювання Монте-Карло та глибинного навчання (Long Short-Term Memory, Convolutional Neural Network, Transformers) демонструють найвищу ефективність за умов зростання частки відновлюваних джерел енергії, оскільки здатні працювати з нелінійними режимами та невизначеністю, що притаманна таким системам. Застосування інтелектуальних методів у поєднанні з традиційними математичними моделями створює більш повну картину поведінки енергосистем за малих збурень та дозволяє отримати значно точніші результати оцінки стійкості. Запропонована класифікація малосигнальної стійкості разом із проведенням аналізом методів моделювання формує цілісний підхід, який може бути використаний для покращення діагностики, прогнозування та оцінювання стабільності сучасних енергосистем із високим рівнем інтеграції відновлювальних джерел.

**Ключові слова:** статична стійкість енергосистеми; малосигнальна стійкість; відновлювальні джерела енергії; електрична енергія; електрична мережа; моделювання малосигнальної та статичної стійкості.

**Вступ.** Перехід від генерації на основі викопного палива до відновлювальних джерел живлення (ВДЕ) зумовлений нагальною потребою зменшення викидів парникових газів і протидії зміні клімату [1]. Цю мету підтримує зобов'язання Європейського Союзу досягти щонайменше 42,5 % проникнення ВДЕ до 2030 року [2].

Попри позитивний екологічний ефект, така трансформація створює суттєві виклики, зокрема у сфері забезпечення стійкості енергосистеми [3, 4]. Мінливість та непередбачуваність виробітку ВДЕ збільшують невизначеність роботи системи, що може призвести до нестачі пропускну здатності мережі або недостатньої генерації для покриття навантаження в окремі моменти часу.

В таких умовах проблема забезпечення малосигнальної або малозбурювальної (статичної) стійкості (МС) стає критичною, оскільки навіть невеликі збурення можуть призвести до втрати синхронізму генераторів, зниження надійності електропостачання або навіть колапсу системи.

**Постановка проблеми.** Традиційна структура генерації, побудована на синхронних машинах із

природною інерцією, була основою класичних визначень малосигнальної стійкості [5] та методів її оцінювання. Проте збільшення проникнення ВДЕ, що здебільшого підключаються до мережі через перетворювальну техніку, призводить до суттєвих змін у характеристиках системи. Це проявляється у зменшенні інерційності, зниженні внеску у струм короткого замикання, появі швидких електронних процесів, та вад які не враховувалися у традиційних моделях.

У традиційних класифікаціях стійкості енергосистем поняття МС сформоване навколо поведінки синхронних генераторів у відповідь на малі збурення. Проте сучасні енергосистеми вже не відповідають умовам, для яких ці класифікації створювалися. Відсутність універсально визначених діапазонів МС для систем із високою часткою ВДЕ породжує неоднозначності в оцінці стійкості, виборі методів моделювання та інтерпретації результатів.

Велика кількість численних факторів, через які ВДЕ впливають на параметри МС ускладнює моделювання.

© К. П. Попенко, О. А. Загайнова, В. І. Лесняк, В. В. Варв'янська, Д. Д. Германчук, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*  
**Конфлікт інтересів:** Автори заявили про відсутність конфлікту

Залишається відкритим питання вибору оптимального підходу моделювання МС залежно від рівня проникнення ВДЕ. Для низьких рівнів достатні традиційні моделі синхронних генераторів, але при 40–60 % частці ВДЕ вони втрачають адекватність. Для дуже високого проникнення (понад 80 %) виникає потреба у моделюванні швидких електронних процесів, а у деяких випадках – у повному переході до Electromagnetic transient (EMT) моделювання або застосуванні систем на базі штучного інтелекту (ШІ) або машинного навчання (Machine Learning, ML) для прискореної оцінки стійкості.

Також існує невизначеність при моделюванні типів стійкості, де поняття МС окремо не виділено, а моделюється стійкість в цілому.

Таким чином, визначення узгодженого підходу до класифікації МС та узагальнення сучасних методів моделювання МС та встановленні критеріїв вибору між ними залежно від реального рівня інтеграції ВДЕ та типу стійкості до якого їх доцільно застосовувати потребують додаткових досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [5] були усунуті ключові суперечності у визначенні та класифікації стійкості енергосистем. У ній було уточнено саме поняття стійкості з огляду на практичне застосування та встановлено зв'язок із такими темами, як надійність та безпека системи. Водночас визначені типи стійкості – кутова стійкість ротора, напругова стійкість та частотна стійкість – потребували подальшого вдосконалення з огляду на зростання частки ВДЕ, що породило нові типи збурень, раніше не врахованих.

У роботі [6] запропоновано модифіковану класифікацію, що охоплює різноманітні проблеми стійкості, які виникають в енергосистемах із високою часткою ВДЕ. Ключовим фактором є широке впровадження перетворювальної генерації (СІG), тобто інверторів, що використовуються у ВДЕ. Оскільки реакція системи дедалі більше визначається швидкодіючими силовими електронними пристроями, вони істотно впливають на поведінку системи.

На відміну від класифікацій IEEE/CIGRE [5], в українських джерелах досі використовують терміни – «статична стійкість» і «динамічна стійкість». Зазвичай «статична стійкість» відповідає малосигнальній стійкості, тоді як «динамічна» стосується великих збурень (наприклад, коротких замикань).

Автори статті [7] представляють модифіковану класифікацію категорій стійкості для енергосистем з підвищеним проникненням ВДЕ, розрізняючи фундаментальну та не фундаментальну стійкість. Фундаментальний компонент стійкості включає стабільність напруги та частоти. Стійкість кута ротору в залежності від типу збурень автори відносять як до фундаментального так і до нефундаментального компоненту стійкості. Також до не фундаментальної стійкості відносять: субсинхронні, суперсинхронні коливання ( $S^2SO$ ) та високочастотні коливання. Вони поділяються на коливання між мережею та

генераторами та між генераторами в межах частотного діапазону стійкості 0.5 – 100 Hz для  $S^2SO$ .

Класифікація [7] поєднує традиційні та сучасні енергосистеми з великим проникненням ВДЕ.

У роботі [8], використовуються такі терміни:

- короткострокова стійкість – відповідає статичній стійкості та коливальній стійкості;
- первинне регулювання (секунди–хвилини) – частотна стійкість і міжзонні низькочастотні коливання;
- напругова стійкість (хвилини–години) – відповідає довгостроковій напруговій стійкості;

Категорії малозбурювальної кутової стійкості, короткострокової частотної стійкості та короткострокової малозбурювальної стійкості напруги об'єднані під терміном малосигнальна стійкість (МС), відповідно до IEEE/CIGRE (2004) [5].

В роботах [10, 14, 16] розглядається вплив ВДЕ на різні аспекти стабільності. Проте не виділений ступінь цього впливу. Моделювання різного типу стійкості розглянуто в роботах [5, 6, 10, 12–18].

Зазначені публікації демонструють паралельний розвиток трьох напрямів моделювання:

- лінійні аналітичні методи (аналіз власних значень, модальний аналіз), що зберігають актуальність для систем з помірною часткою ВДЕ;
- деталізовані нелінійні моделі та EMT-моделювання, необхідні при високому проникненні інверторних джерел;
- алгоритми ШІ та ML, що здатні забезпечувати прискорене прогнозування стійкості, класифікацію режимів та оцінювання ризиків у реальному часі.

Автори робіт [6, 10, 14] виокремлюють проблему відсутності узгоджених класифікацій МС для систем із високою часткою ВДЕ, що ускладнює інтерпретацію результатів та порівняння досліджень між різними методиками. Більшість робіт радше аналізує конкретні випадки чи модельні фрагменти систем, ніж пропонує універсальний підхід до визначення меж МС. У сучасних дослідженнях також підкреслюється складність коректного вибору математичної моделі залежно від рівня проникнення ВДЕ, технічної структури джерел та вимог до точності розрахунків.

Таким чином, огляд наявних публікацій демонструє активний розвиток методів аналізу МС, але водночас виявляє низку невирішених питань: відсутність стандартизованої класифікації МС для систем із великим проникненням ВДЕ; неоднозначність у виборі рівня деталізації моделей саме для МС та вибір необхідного програмного засобу для моделювання в залежності від рівня проникнення ВДЕ в систему.

**Мета статті.** Уточнити межі та структуру МС у сучасному контексті та сформувати узгоджену класифікацію для енергосистем з ВДЕ. Узагальнити сучасні методи моделювання МС із застосуванням як традиційних математичних методів, так і ШІ. Проаналізувати можливість застосування різних

методів моделювання, та програмних комплексів в залежності від рівня проникнення ВДЕ.

**Класифікації стійкості енергосистем та визначення малосигнальної стійкості.** Стійкість енергосистеми є багатовимірним поняттям, що охоплює реакцію електроенергетичної системи на різні типи збурень. На рис. 1 представлено систематизовану класифікацію, яка розділяє усі прояви стійкості на фундаментальні та нефундаментальні компоненти, що відповідає сучасним тенденціям у дослідженнях електроенергетичних систем із високою частотою перетворювальної генерації.

До фундаментальних компонентів стійкості відносять три класичні групи:

1. Стійкість частоти, що визначає здатність системи підтримувати частоту в умовах миттєвих або довготривалих збурень. Вона включає короточасні та довготермінові процеси.

2. Стійкість кута ротора, яка охоплює статичну та динамічну складові та описує взаємну синхронність генераторів. Традиційно вона була основним критерієм аналізу при оцінці поведінки синхронних машин.

3. Стійкість напруги, що включає реакцію системи на малі та великі збурення, а також коротко- та довготривалі процеси, пов'язані з регулюванням напруги, потоками потужності та поведінкою навантаження.

У той час як фундаментальні компоненти описують поведінку системи на основі низькочастотних електромеханічних процесів, нефундаментальні компоненти стійкості відображають вплив перетворювальної техніки, яка домінує у системах із високим проникненням ВДЕ. До таких компонентів належать:

- резонансна стійкість, пов'язана з електричними та торсійними коливаннями у діапазоні над- і субсинхронних частот;
- стійкість перетворювача, яка поділяється на процеси швидкої та повільної реакції, пов'язані з внутрішніми петлями керування їх інверторів;

У сучасних системах ця класифікація є важливою, оскільки поведінка перетворювальної генерації принципово відрізняється від синхронних машин та часто визначає динаміку цілої енергосистеми.

**Моделювання статичної стійкості.** Оскільки визначення МС є визначальною для запобігання коливальним режимам, втраті синхронізму та нестійкості напруги, коректне моделювання цих процесів є елементом управління енергосистемою. Цей розділ узагальнює та зіставляє сучасні методи моделювання малих збурень.

**Моделювання у просторі станів МПС** залишається одним з фундаментальних підходів до оцінки МС, оскільки дозволяє описати динаміку енергосистеми через систему диференціальних рівнянь та матриць станів.

У роботі [10] запропоновано стохастичну модель, у якій джерела ВДЕ, зокрема асинхронні вітрові турбіни, представляються як стохастичні збурення малих амплітуд. Це дозволяє кількісно оцінити вплив випадкових флуктуацій вітру на власні значення системи та визначити чутливість малосигнальних режимів до стохастичних процесів.

У публікації [11] представлено синхронну пару «двигун–генератор» (MGP), що використовується для підвищення статичної та перехідної стійкості систем з високим проникненням ВДЕ. Динаміка такої пари описується рівняннями станів синхронних машин, що дозволяє оцінювати їх вплив на демпфування електромеханічних коливань та стабілізацію режиму.

Моделі у просторі станів залишаються універсальним та фізично обґрунтованим інструментом, особливо для систем з низьким і середнім рівнем проникнення ВДЕ, де електромеханічні процеси все ще домінують.

**Передавальні функції** традиційно застосовуються для аналізу лінійних інваріантних у часі систем, включаючи локальні контури керування та взаємодію між генераторами та навантаженнями. Такий підхід ефективний для аналізу частотних характеристик та визначення меж стійкості.

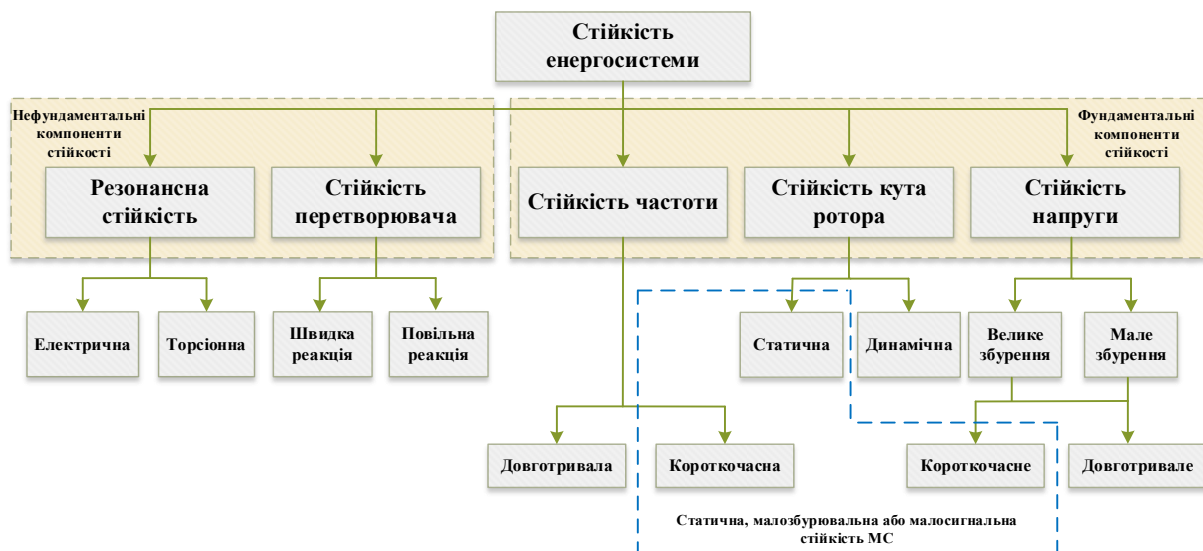


Рисунок 1 – Класифікація стійкості

У роботі [12] запропоновано уніфікований частотний підхід для оцінки стабільності багатьох мережних перетворювачів, який ґрунтується на матриці відношення імпедансів. Метод спирається на теорему Грегорішина і дозволяє визначити потенційні діапазони власних значень, що забезпечує достатній критерій стійкості інверторно-орієнтованих мереж.

У [13] проведено моделювання в часовій області для автономної гібридної мікромережі, що включає виробництво та накопичення енергії із ВДЕ. Аналіз показав здатність передавальних функцій ефективно описувати взаємодію між джерелами і навантаженнями, забезпечуючи оцінку малосигнальних режимів у відсутності великої синхронної генерації.

Перевагою методу передавальних функцій є можливість врахування високочастотної поведінки силових електроніки та аналізу резонансних явищ.

**Математичний аналіз** охоплює широкий спектр інструментів для оцінки МС, зокрема побудову P-U характеристик, аналіз режимів рівноваги та застосування чисельних методів для розв'язання рівнянь потоків потужності. Підхід залишається ключовим у визначенні граничних режимів напруги та ідентифікації станів, близьких до точок біфуркації.

Традиційним є застосування методу Ньютона-Рафсона [14], який дозволяє точно визначити сталий стан системи та аналізувати його чутливість до малих змін параметрів.

Динамічний математичний аналіз, що включає визначення власних значень та модальний аналіз, займає центральне місце у класифікації малосигнальних процесів.

Аналіз власних значень дозволяє безпосередньо оцінити стійкість системи, тоді як модальний аналіз дає змогу виявити частоти, демпфування та структуру власних мод.

У роботі [15] застосовано матрицю передавальних функцій мережі для спрощення аналізу стабілізаторів системи збудження. Власні значення були використані для ідентифікації критичних елементів системи та прогнозування режимів нестабільності.

Теорія збурень, застосована у [14], дозволила уточнити область стійкості системи в околі робочої точки та оцінити залежність стійкості від зміни ключових параметрів.

У [16] використано коефіцієнт синхронізуючого моменту як малосигнальний індикатор, що дозволяє оцінити здатність системи підтримувати синхронізм ротора при різних рівнях проникнення фотоелектричних установок.

У роботі [17] досліджено Small disturbance voltage stability (SDVS) індекси малосигнальної стабільності для різних топологій мереж, що дозволило визначити критичні конфігурації, чутливі до напруженості режиму.

**Статистичне моделювання** широко застосовується для аналізу та прогнозування поведінки

енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Дані методи дозволяють враховувати складну стохастичну природу ВДЕ без надмірних спрощень. Приклади застосування методів Монте-Карло та стохастичного поверхневого відгуку (SRSM), наведені у [18], дозволяють уникнути надмірного спрощення, водночас зберігаючи прийнятний баланс між точністю та обчислювальною складністю.

**Методи на основі ШІ** широко використовуються для аналізу МС в процесі оперативного керування енергосистем пов'язаний з розрахунком режимів, при якому необхідно аналізувати велику кількість інформації від моніторингових систем. Наявність даних про величину напруги, її модуль і кут, дозволяє ефективно класифікувати режими роботи за ступенем їхньої стійкості, використовуючи засоби теорії розпізнавання образів.

Класифікації режимів енергосистем відбувається з використанням штучних нейронних мереж – Artificial neural networks (ANN) та методу групового урахування аргументів (МГУА). Підхід дозволяє в режимі реального часу оперативно оцінювати МС поточного режиму. Перевагою є висока швидкість навіть для великих енергосистем, за умови достатньої повноти моделі. Основною складністю залишається необхідність врахування великої кількості варіантів топології мережі [14].

Ряд підходів, що включають використання Support Vector Machines (SVM), Random Forests, та k-Nearest Neighbors (k-NN) можуть бути застосованими для класифікації стану системи як стійкий/нестійкий [7].

Підходи Deep Machine Learning, як-от Long-Short-Term Memory (LSTM), convolutional neural network (CNN), transformer-based models (Transformers) використовуються для створення моделей, які здатні прогнозувати або класифікувати режими стійкості системи на основі вхідних параметрів (наприклад, стану системи, навантажень, виробництва ВДЕ чи погодних умов).

У табл. 1 підсумовані підходи, що ґрунтуються на моделюванні, з акцентом на типи стійкості, рівень проникнення ВДЕ, та інструменти, що можуть бути використані при моделюванні.

Додатково проаналізовані методи моделювання на основі ШІ – **Unsupervised learning**. Було визначено, що в даному типі машинного навчання здійснюються аналіз та класифікацію не маркованих даних без попередньо визначених результатів. На основі опублікованих досліджень [7], підходи ненаглядового навчання, застосовані для аналізу систем стабілізації електроенергетичних систем. Вони поділяються на дві основні групи: *кластеризаційні методи* та *автоенкодера*.

Варто підкреслити, що більшість робіт поєднують ненаглядові алгоритми з методами наглядового навчання, формуючи гібридні структури.

Таблиця 1 – Підсумок методів та інструментів для моделювання МС

Категорія	Метод	Тип стійкості	Рівень проникнення ВДЕ	Можливі інструменти моделювання	Джерело
Моделювання у просторі станів МПС	МПС неперервного часу	МС	Середній близько 50 %	MATLAB/Simulink, PSCAD/EMTDC	[10]
	МПС дискретного часу	МС	Середній–високий (>50 %)	PSCAD/EMTDC	[11]
Передавальні функції	Імпедансна мережна матриця	МС, резонансна стійкість SSO/SPO	Високий (кілька конвертерів)	MATLAB/Simulink	[12]
	Передавальна функція автономної гібридної фотоелектричної системи з накопичувачем енергії (time-domain)	МС	Помірний (~40 %)	Не зазначено	[13]
Математичний аналіз	P–U криві (статичний напружувальний аналіз)	Стійкість напруги	Помірний (~30 %)	MATLAB (Newton–Raphson), власні скрипти	[14]
	Eigenvalue & Modal Analysis	МС	Високий (>60 %)	DIgSILENT PowerFactory, PSCAD	[15]
	Коефіцієнт синхронізувального моменту	МС	Не зазначено	MATLAB/Simulink	[16]
	SDVS індекси	МС	Не зазначено	MATLAB/Simulink	[17]
Статистичне моделювання	SRSМ (стохастичні поверхневі відгук)	Стійкість напруги та частоти	"Значний"	MATLAB, Python	[18]
	Monte Carlo Simulation	Короткочасна стійкість напруги, МС	Дуже високий (до 100 %)	DIgSILENT PowerFactory, MATLAB	[18]
Методи на основі ШІ	ANN + МГУА	МС	Низький, до 25%	Python, DIgSILENT PowerFactory	[14]
	SVM, Random Forests, k-NN	Стійкість напруги та частоти	Низький, до 25%	Python, DIgSILENT PowerFactory	[7]
	Deep Learning (LSTM, CNN, Transformers)	МС	Високий	Python, PSD-BPA	[7]

Методи кластеризації використовуються для автоматичного групування подібних точок даних за спільними ознаками. Кластеризація дає змогу вибрати репрезентативні критичні режими, що використовуються для аналізу частотної стійкості. Фільтр створювався за допомогою методів наглядового навчання (Random Forest, та ANN), які класифікували небезпечні точки роботи. Після цього застосовувалась кластеризація для вибору найбільш репрезентативного сценарію.

Найменший індекс транзитної стійкості визначався шляхом імітації у часовій області.

Слід зазначити, що методи Unsupervised learning не підходять до моделювання МС через їх обмеженість у рівні проникнення ВДЕ в систему та застосування їх до моделювання перехідної частотної, напружової та резонансної стійкості.

**Висновки.** В роботі було запропоновано розширити поняття малосигнальної стійкості задля забезпечення більш повного аналізу енергосистем на малі збурення.

Проведений аналіз різних підходів до моделювання статичної стійкості в тому числі і за допомогою штучного інтелекту.

Методи SRSМ, Monte Carlo Simulation та Deep Learning (LSTM, CNN, Transformers) демонструють найбільші можливості з точки зору проникнення ВДЕ,

тому можуть вважатися найбільш перспективними для подальшого аналізу з точки зору малосигнальної стійкості.

Додатково з'ясовано, що методи Unsupervised learning не підходять до аналізу МС проте здатні застосовуватися для інших видів стійкості (перехідної).

Підходи на основі штучного інтелекту дедалі активніше застосовуються в сучасному аналізі стійкості енергосистем. Ці технології пропонують інструменти для оцінки стабільності в реальному часі, оптимізації керування та прогнозного аналізу, особливо в системах, де проникнення ВДЕ створює значну невизначеність.

Для подолання обговорених викликів на систему через проникнення ВДЕ, майбутні дослідження мають зосередитися на конкретних питаннях можливості застосування штучного інтелекту для покращення оцінки стабільності та керування в реальному часі у системах із високим рівнем ВДЕ а також на аналізі конкретних показників впливу ВДЕ на стійкість.

Перспективним є технологій які можливо застосувати для стабілізації системи з великою часткою ВДЕ. Сюди можна віднести дослідженню новітніх інверторів, що будуть підтримувати інерцію а як слідство і стійкість систем. А також технологій що можуть покращити параметри мережі і підвищити здатність інтегрувати та стабілізувати ВДЕ через впровадження віртуальної інерції.

## Список літератури

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable capacity statistics 2025. Abu Dhabi, 2025. URL: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>.
2. Renewable energy targets. *Energy - European Commission*. URL: [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en).
3. Sinsel S. R., Riemke R. L., Hoffmann V. H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 2271–2285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.
4. Control and stability of large-scale power system with highly distributed renewable energy generation: viewpoints from six aspects / Q.-H. Wu et al. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2023. Vol. 9, no. 1. P. 8–14. DOI: <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2022.08740>.
5. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions / P. Kundur et al. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004. Vol. 19, no. 3. P. 1387–1401. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2004.825981>.
6. Definition and classification of power system stability revisited & extended / N. Hatziaargyriou et al. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 36, no. 4. P. 3271–3281. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3041774>.
7. Power system stability with high penetration of renewable energy sources: challenges, assessment, and mitigation strategies / J. S. Ali et al. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 39912–39934. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3546491>.
8. Grebe E., Lösing M., Haubrich H.-J. Stabilitätsaspekte bei Ausdehnung von Verbundnetzen. 1996.
9. Moeller & Poeller Engineering (M.P.E.) GmbH, Pöller M. System stability in a renewables-based power system. Tübingen, 2024. 115 p. URL: [https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2023/2023-32\\_EU\\_System\\_stability/P14738\\_Agora\\_Stabilität\\_V7\\_Report\\_Poeller\\_Final.pdf](https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2023/2023-32_EU_System_stability/P14738_Agora_Stabilität_V7_Report_Poeller_Final.pdf).
10. Stochastic small-signal stability of power systems with wind power generation / B. Yuan et al. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015. Vol. 30, no. 4. P. 1680–1689. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2014.2353014>.
11. Wei S., Zhou Y., Huang Y. Synchronous motor-generator pair to enhance small signal and transient stability of power system with high penetration of renewable energy. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 11505–11512. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2017.2716103>.
12. Stability assessment for multiple grid-connected converters based on impedance-ratio matrix and Gershgorin's Theorem / Z. Zeng et al. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 138. P. 107869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107869>.
13. Lee D.-J., Wang L. Small-Signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: time-domain simulations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2008. Vol. 23, no. 1. P. 311–320. DOI: <https://doi.org/10.1109/tec.2007.914309>.
14. Забезпечення стійкості енергосистем та їх об'єднань: монографія / О. Ф. Буткевич та ін. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 320 с.
15. A stability analysis tool for bulk power systems using black-box models of inverter-based resources / D. Sun et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2023. Vol. 59, no. 6. P. 7318–7327. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2023.3301488>.
16. ALJowder F. Analysis of damping and synchronizing torques and transient stability of power system with PV power station operating in different control modes. *2024 12th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Setubal, Portugal, 27–29 May 2024. 2024. P. 647–653. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsmartgrid61824.2024.10578204>.
17. Huang W., Hill D. J., Zhang X. Small-Disturbance voltage stability of power systems: dependence on network structure. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. Vol. 35, no. 4. P. 2609–2618. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2019.2962555>.
18. Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities / X. Xu et al. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, no. 3. P. 3236–3245. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2784812>.

## References

1. International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable capacity statistics 2025,” Abu Dhabi, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>
2. “Renewable energy targets.” *Energy - European Commission*. [Online]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en)
3. S. R. Sinsel, R. L. Riemke, and V. H. Hoffmann, “Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 2271–2285, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>
4. Q.-H. Wu et al., “Control and stability of large-scale power system with highly distributed renewable energy generation: Viewpoints from six aspects,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 8–14, 2023, doi: <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2022.08740>
5. P. Kundur et al., “Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2004.825981>
6. N. Hatziaargyriou et al., “Definition and classification of power system stability revisited & extended,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.3041774>
7. J. S. Ali, Y. Qiblawey, A. Alassi, A. M. Massoud, S. M. Muyeen, and H. Abu-Rub, “Power system stability with high penetration of renewable energy sources: Challenges, assessment, and mitigation strategies,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 39912–39934, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3546491>
8. E. Grebe, M. Lösing, and H.-J. Haubrich, “Stabilitätsaspekte bei Ausdehnung von Verbundnetzen,” *VDE Berichte Nr. 1245*, 1996.
9. Moeller & Poeller Engineering (M.P.E.) GmbH and M. Pöller, “System stability in a renewables-based power system,” Tübingen, Report P14738, 2024. [Online]. Available: [https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2023/2023-32\\_EU\\_System\\_stability/P14738\\_Agora\\_Stabilität\\_V7\\_Report\\_Poeller\\_Final.pdf](https://www.agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2023/2023-32_EU_System_stability/P14738_Agora_Stabilität_V7_Report_Poeller_Final.pdf)
10. B. Yuan, M. Zhou, G. Li, and X.-P. Zhang, “Stochastic small-signal stability of power systems with wind power generation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 1680–1689, Jul. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2014.2353014>
11. S. Wei, Y. Zhou, and Y. Huang, “Synchronous motor-generator pair to enhance small signal and transient stability of power system with high penetration of renewable energy,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11505–11512, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2017.2716103>
12. Z. Zeng, J. Zhao, Z. Liu, L. Mao, and K. Qu, “Stability assessment for multiple grid-connected converters based on impedance-ratio matrix and Gershgorin's Theorem,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 138, Jun. 2022, Art. no. 107869, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107869>
13. D.-J. Lee and L. Wang, “Small-Signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part I: Time-domain simulations,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 311–320, Mar. 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2007.914309>
14. O. F. Butkevych et al. *Zabezpechennia stiiokosti enerhosystem ta yikh obiednan [Ensuring the stability of power systems and their interconnections]*. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. (in Ukrainian)
15. D. Sun, H. Liu, M. Gong, Z. Chen, and P. Hart, “A stability analysis tool for bulk power systems using black-box models of inverter-based resources,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 6, pp. 7318–7327, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2023.3301488>
16. F. ALJowder, “Analysis of damping and synchronizing torques and transient stability of power system with PV power station operating in different control modes,” in *2024 12th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Setubal, Portugal, May 27–29, 2024.

- IEEE, 2024, pp. 647–653, doi: <https://doi.org/10.1109/icsmartgrid61824.2024.10578204>
17. W. Huang, D. J. Hill, and X. Zhang, “Small-Disturbance voltage stability of power systems: Dependence on network structure,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 2609–2618, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2019.2962555>
18. X. Xu, Z. Yan, M. Shahidehpour, H. Wang, and S. Chen, “Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 3236–3245, May 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2784812>

Надійшло (received) 6.12.2025

UDC 621.31:621.355

**POPENKO KONSTIANTYN** ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5251-1572>; e-mail: [kostiantyn.popenko@ieec.khpi.edu.ua](mailto:kostiantyn.popenko@ieec.khpi.edu.ua)

**ZAGAYNOVA ALEKSANDRA** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8558-3211>; e-mail: [zagaynova@gmail.com](mailto:zagaynova@gmail.com)

**LESNIAK VLADYSLAV** – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9919-7382>; e-mail: [Vladyslav.Lesniak@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Vladyslav.Lesniak@ieec.khpi.edu.ua)

**VARVIANSKA VIKTORIA** – Senior Lecturer, Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4962-6245> e-mail: [Viktoria.Varvianska@khpi.edu.ua](mailto:Viktoria.Varvianska@khpi.edu.ua)

**GERMANCHUK DMYTRO** – Postgraduate Student of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; e-mail: [Dmytro.Hermanchuk@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Dmytro.Hermanchuk@ieec.khpi.edu.ua)

## METHODS OF CLASSIFICATION AND MODELING OF POWER SYSTEM SMALL-SIGNAL STABILITY UNDER HIGH RENEWABLE ENERGY PENETRATION

Has been carried out the refinement of the boundaries and structure of small-signal stability within the general classification of power system stability. An extended classification of small-signal stability is proposed, enabling a more precise and structured assessment of power system response to minor disturbances under high penetration of renewable energy sources. The new classification helps systematize various types of small-signal deviations and determine their impact on static stability, which improves analysis accuracy and facilitates the selection of appropriate modeling tools. A detailed comparative analysis of modern approaches to modeling static and small-signal stability has also been performed, including classical mathematical methods, statistical techniques, and artificial intelligence instruments. It has been established that Stochastic Response Surface methods, Monte Carlo simulation, and deep learning techniques (Long Short-Term Memory, Convolutional Neural Networks, Transformer-based models) demonstrate the highest effectiveness under increasing shares of renewable generation, as they can operate with nonlinear conditions and the inherent uncertainty of such systems. The integration of intelligent methods with traditional mathematical models creates a more comprehensive view of power system behavior under small disturbances and allows for significantly more accurate stability assessments. The proposed small-signal stability classification, together with the conducted analysis of modeling methods, forms a holistic approach that can be used to improve diagnostics, forecasting, and the assessment of stability in modern power systems with high penetration of renewable energy sources.

**Keywords:** static power system stability; small-signal stability; renewable energy sources; electrical energy; power grid; small-signal and static stability modeling.