

елементів двигуна. При цьому відповідні зміни часто не реєструються штатними системами самодіагностики, оскільки не виходять за межі встановлених порогових критеріїв.

Висновки

Таким чином, підвищення достовірності діагностики та ефективності технічного обслуговування двигунів внутрішнього згоряння потребує розширення діагностичних процедур за рахунок інтеграції інструментальних методів аналізу сигналів, візуальної оцінки стану механічних компонентів та урахування експлуатаційних факторів. Такий підхід відповідає сучасним концепціям превентивного та прогностичного технічного обслуговування, орієнтованого на раннє виявлення відхилень і попередження розвитку критичних несправностей.

Література

1. **Oryshenko S., Oryshenko V.** Machine Diagnostics in Mechatronic Systems: Analysis Methods and Intelligent Technologies. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*. 2025. Vol. 1 (64). P. 140–146. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4146>.
2. **Kalinin Y. et al.** Signal processing algorithm for predictive diagnostics of car transmissions using artificial intelligence. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2025. Vol. 1, iss. 20.

УДК 621.316

ОЦІНКА НЕОБХІДНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Семененко Юрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,
Український державний університет залізничного транспорту,
e-mail: slider2012slider@gmail.com, ORCID ID 0000-0001-9422-3528

Для досягнення максимальної ефективності під час формулювання задачі оцінювання стану в операційних системах електроенергетики, важливо максимально враховувати специфічні характеристики тих мереж, до яких вона застосовується. Будь-які спрощення, що вводяться в модель, а також обрана математичне представлення електроенергетичної системи (ЕЕС), не повинні суттєво спотворювати результати розрахунків порівняно з реальними параметрами режиму роботи досліджуваних мереж. Як зазначають автори роботи [2], у магістральних мережах найбільш поширеним підходом до формулювання задачі оцінювання стану є використання вузлових напруг як елементів вектору стану (або розрахункового вектору). Такий вибір пояснюється тим, що в цьому випадку система рівнянь містить мінімальну кількість невідомих величин, особливо враховуючи переважно кільцеву топологію цих мереж. Крім того,

однолінійна модель для вивчення режимів магістральних мереж набула популярності завдяки симетричності їх електричних режимів та рівномірному розподілу навантажень по фазах. Застосування такої моделі значно спрощувало обчислення, не призводячи до втрати точності результатів.

У табл. 1, наведено порівняльний аналіз ключових характеристик магістральних і розподільних мереж, які найбільше впливають на формулювання задачі оцінювання стану, а також на рішення щодо вибору між однолінійною чи трифазною моделлю.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз ключових характеристик магістральних та розподільних електромереж

Порівнювана характеристика	Магістральні мережі	Розподільні мережі
Розподіл навантажень по фазах	Навантаження в фазах розподілені симетрично. Це сприяє стабільності системи та зменшує втрати енергії, оскільки дозволяє уникнути перевантажень окремих фаз.	Навантаження в фазах часто значно нерівномірні, що призводить до асиметрії. Така особливість може спричинити додаткові втрати, нестабільність напруги та потребує спеціальних заходів для балансування, наприклад, через перерозподіл споживачів.
Параметри схеми заміщення	Для елементів мережі співвідношення R/X значно менше 1, вказує на домінування реактивного опору; Кожен об'єкт, стан якого критичний, оснащений телесигналами для моніторингу. Це полегшує оперативний контроль і швидке реагування на зміни, підвищуючи надійність великих енергосистем.	Для елементів мережі співвідношення R/X наближене до 1, так активний і реактивний опори є приблизно рівними; Елементи схеми заміщення відрізняються великою різноманітністю; Можуть бути присутні однофазні чи двофазні відгалуження; Не все обладнання має телесигналізацію стану. Така гетерогенність ускладнює моделювання, але відображає реальні умови локальних мереж, де економія на обладнанні є пріоритетом.
Конфігурація мережі	Мережа має складну замкнуту структуру з численними кільцями для резервування; Кількість вузлів у моделі коливається від 1 000 до 10 000. Це забезпечує високу надійність і гнучкість, дозволяючи перерозподіляти потоки енергії в разі аварій.	Переважно радіальна структура (у майбутньому можливий перехід до кільцевої для підвищення стійкості); Кількість вузлів у моделі може перевищувати 10 000. Така конфігурація простіша в управлінні, але вразливіша до локальних збоїв, тому потребує сучасних систем моніторингу для швидкого виявлення проблем.

Доступні вимірювання	Існує надлишок вимірювальної інформації для точного аналізу; Поширені вимірювання потоків/ін'єкцій потужності, модулів напруг; Зустрічаються векторні вимірювання; Вимірювання струмів і напруг нульової послідовності. Це дозволяє проводити глибокий аналіз режимів і прогнозувати потенційні ризики, забезпечуючи високий рівень безпеки.	Надлишок вимірювань може бути відсутнім, але активно впроваджуються смарт-лічильники та нові комплекси; Поширені вимірювання модулів струмів у гілках і вузлах, модулів лінійних і фазних напруг, струмів і напруг нульової послідовності; Починається активне впровадження вимірювань потужностей. З ростом цифровізації це покращить точність контролю, зменшуючи час на виявлення несправностей і оптимізуючи розподіл ресурсів.
Додатки для управління мережами	До систем EMS входять: Модулі для оцінювання стану, розрахунку усталених режимів, ВРДО (вихідного режиму динамічної оптимізації) та виведення обладнання в ремонт; Задачі контролю перетоків і параметрів електричного режиму; Комплекси для організації ремонтів; Задачі підтримки ринку електроенергії та потужності. Ці інструменти забезпечують комплексне управління великими системами, інтегруючи економічні та технічні аспекти.	У перспективі системи DMS включатимуть: Модулі для оцінювання стану, розрахунку усталених режимів, струмів короткого замикання, оптимізації режимів та визначення місця пошкодження; Комплекси для організації ремонтів; Визначення можливості підключення нових споживачів до вузла; Контроль напруг, струмових навантажень та інших обмежень. Розвиток таких систем дозволить ефективніше управляти локальними мережами, враховуючи зростання розподіленої генерації, як-от сонячні панелі, і забезпечуючи стаке енергопостачання.

Це порівняння підкреслює відмінності в структурі, навантаженнях та інших факторах, що робить його корисним інструментом для розуміння адаптації методів. Наприклад, магістральні мережі часто мають високу симетрію, тоді як розподільні – схильні до асиметрії через нерівномірне споживання енергії.

На основі цього аналізу стає очевидним, що моделі та методики оцінювання стану, які успішно працюють у магістральних мережах, не можна безпосередньо переносити на розподільні системи через їхні унікальні особливості. Класична формулювання задачі оцінювання стану на основі комплексів напруг, яка домінує в магістральних мережах, втрачає свої ключові переваги при адаптації до РС. Крім того, з порівняння випливає, що однолінійні моделі, широко використовувані в задачах магістральних мереж, непридатні для РС через асиметрію параметрів схем заміщення та, головне, нерівномірний розподіл навантажень по фазах. Це може призводити до

неточностей у прогнозуванні режимів, що критично для надійності енергопостачання.

Модель є фундаментальною складовою будь-якого об'єкта, чії властивості планується визначити за допомогою розрахунків. На ранніх етапах досліджень режимів роботи розподільних мереж переважно застосовувалася однолінійна модель, яка раніше стала стандартом у магістральних системах. Такий вибір значною мірою обумовлювався обмеженими обчислювальними ресурсами комп'ютерів минулих десятиліть, коли потужності були недостатніми для складніших обчислень.

Однак використання однолінійних моделей для вивчення режимів РС вимагало прийняття спрощень щодо симетричності електричних режимів та елементів мережі [3, 5]. Такі припущення часто ставали джерелом значних похибок у результатах розв'язання задач, спрямованих на визначення реального електричного режиму ЕЕС. Наприклад, ігнорування асиметрії могло спотворювати оцінки втрат енергії чи стабільності системи, що в сучасних умовах з великими обсягами даних та потужними комп'ютерами вже не є необхідним компромісом. Сьогодні ж перехід до трифазних моделей дозволяє точніше моделювати реальні умови, враховуючи варіативність навантажень і топологію мереж.

Як в Україні, так і в закордонних розподільних електричних мережах (РЕМ) енергетичні компанії докладають значних зусиль для досягнення симетричного розподілу навантажень по фазах, але це завдання залишається складним і часто невирішеним. За даними дослідження [4-6], у зарубіжних РЕМ ступінь асиметрії фазних навантажень може сягати до 17%. Крім того, в деяких зарубіжних енергосистемах розподільні мережі включають неповнофазні відгалуження, що ще більше посилює нерівномірність параметрів електричного режиму.

Це призводить до додаткових втрат енергії та ускладнює стабільність постачання, оскільки нерівномірність може спричинити перевантаження окремих ліній чи фаз. В Україні РЕМ, попри застосування ізольованої нейтралі та з'єднання обмоток трансформаторів за схемою "зірка-трикутник", асиметрія розподілу навантажень все одно зберігається. Така конфігурація з'єднання обмоток допомагає зменшити коефіцієнт асиметрії струмів нульової послідовності, але струми зворотної послідовності продовжують циркулювати в мережах, впливаючи на ефективність.

Українські РЕМ середнього класу напруги зазвичай не мають неповнофазних відгалужень. Проте деякі науковці розглядають перспективи впровадження такої конфігурації для оптимізації. Однофазні трансформатори також пропонуються в каталогах виробників, наприклад, масляні моделі типів ОМ, ОМП, ОМГ, призначені для напруг 6-10-35 кВ зі схемою з'єднання 1/1-0. Їхнє застосування поширене в промисловості та на транспорті [5], де економія ресурсів є пріоритетом.

У майбутньому такі трансформатори можуть принести значну економію при підключенні віддалених об'єктів з малою потужністю, як-от вишки

мобільного зв'язку чи фермерські господарства. Водночас їх використання суттєво посилює асиметрію електричного режиму, що вимагає ретельного моніторингу.

Якщо для оцінювання стану мережі з асиметричним режимом застосовується однолінійна модель, то отримане стан системи не відповідатиме найбільш ймовірному. Крім того, підзадачі оцінювання стану, такі як виявлення помилкових даних, також даватимуть неточні результати [1]. У недавніх публікаціях щодо оцінювання стану РЕМ переважно використовуються трифазні моделі, як впливає з аналізу літератури [6]. Це свідчить про еволюцію підходів, де акцент робиться на точності, особливо з урахуванням інтеграції відновлюваних джерел енергії.

На початкових етапах вивчення застосування методів оцінювання стану у РЕМ приймалося припущення про їхню переважно радіальну структуру [4]. У такій формулюванні пропонувалися методи оцінювання стану, які принципово відрізнялися від тих, що використовуються в магістральних мережах. З розвитком РЕМ стало зрозуміло, що їхня топологія поступово трансформуватиметься в кільцеву, забезпечуючи більшу надійність і резервування. Тому при створенні алгоритмів оцінювання стану для РЕМ не варто обмежуватися поточною радіальною структурою [3].

Потреба в оцінюванні стану для РЕМ зростатиме паралельно з їхнім удосконаленням, включаючи впровадження новітніх технологій по підвищенню безпеки експлуатації. Ключовим є те, щоб нові алгоритми враховували майбутні умови експлуатації, такі як інтеграція електромобілів чи систем зберігання енергії.

Застосування трифазних моделей вимагає перевірки сумісності з існуючими алгоритмами оцінювання стану. Крім того, необхідно оцінити придатність методів для виявлення помилок у вимірюваннях та стані елементів моделі мережі. У сучасних умовах ці методи можуть отримати нові припущення та обмеження, відмінні від тих, що застосовувалися для однолінійних моделей, і, можливо, потребуватимуть доопрацювання. Також актуалізується питання підвищення швидкості розв'язання задачі оцінювання стану, оскільки трифазні моделі значно збільшують обчислювальну складність. Для вирішення цього можна інтегрувати хмарні обчислення чи штучний інтелект, що дозволить обробляти великі обсяги даних у реальному часі.

Висновки

В роботі була проведена оцінка застосування моделей демонструє, що асиметрія в розподільних мережах є суттєвою проблемою в експлуатації, яка робить однолінійні моделі недостатньо точними для сучасних задач оцінювання стану. Перехід до трифазних моделей є необхідним кроком для підвищення точності розрахунків, особливо з урахуванням еволюції топології мереж та впровадження нових технологій. У майбутньому це дозволить ефективніше управляти ресурсами, зменшувати втрати та забезпечувати безперебійне постачання електроенергії.

Література

1. Семененко Ю. О. та ін. Аналіз причин неселективної дії захисту електромереж середньої напруги при однофазних замиканнях на землю. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2025. № 9 (212). С. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.09.02>.
2. Семененко Ю. О. та ін. Аналіз причин пошкодження повітряних ліній електропередачі в електромережах середньої напруги. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2025. № 11 (214). С. 17–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.11.02>.
3. Семененко Ю. О. та ін. Дослідження характеристик перехідного струму нульової послідовності в розподільних мережах середньої напруги з резонансно-заземленою нейтраллю. *Прогресивні технології засобів транспорту* : матеріали 3-ї міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 03–04 груд. 2025 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2025. С. 31–33.
4. Sereda O. G., Zhorniak L. B., Sereda O. G. Improving the protective properties of electrical equipment in low-voltage cabinets of complete transformer substations auxiliaries NPP. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2025. No. 2. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-4>.
5. Shao W. et al. Research on a Faulty Line Selection Method Based on the Zero-Sequence Disturbance Power of Resonant Grounded Distribution Networks. *Energies*. 2019. Vol. 12 (5). 846. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12050846>.
6. Liu K. et al. Faulty Feeder Identification Based on Data Analysis and Similarity Comparison for Flexible Grounding System in Electric Distribution Networks. *Sensors*. 2021. Vol. 21 (1). 154. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010154>.