

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ЗАХИСТ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі наведено результати аналізу понад 30 комерційних та відкритих засобів моделювання для дослідження електроенергетичних систем. Доведено, що існуючий інструментарій не забезпечує комплексного розв'язання задачі моделювання впливу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на дистанційний захист ліній 110 кВ.

Ключові слова: засоби моделювання, дистанційний захист, відновлювані джерела енергії

Abstract

The paper presents the results of an analysis of more than 30 commercial and open-source modeling tools for the study of electric power systems. It is demonstrated that the existing instrumentation does not provide a comprehensive solution for modeling the impact of renewable energy sources (RES) on the distance protection of 110 kV lines.

Keywords: modeling tools, distance protection, renewable energy sources

Вступ

Сучасний стан розвитку енергетики характеризується масштабною трансформацією традиційних енергосистем. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, зокрема фотоелектричних станцій, до складу енергосистеми створює низку технічних викликів. Особливої актуальності набуває питання забезпечення надійності функціонування енергосистем в аварійних режимах. Перехідні процеси в мережах з інверторними перетворювачами відрізняються, порівнюючи з перехідними процесами у класичних мережах із синхронними генераторами. Ефективне вирішення завдань оперативно-диспетчерського керування та проектування систем релейного захисту в таких умовах неможливе без використання високоточних інструментів математичного та комп'ютерного моделювання. Вибір програмного забезпечення та методів розрахунку є визначальним фактором для отримання релевантних результатів аналізу аварійних подій. На сьогодні існує широкий спектр спеціалізованих засобів моделювання, що базуються на різних підходах до представлення фізичних процесів. Кожен із цих засобів має власну область застосування та обмеження щодо точності відтворення перехідних електромагнітних процесів. Обґрунтування вибору оптимального інструментарію дозволить підвищити точність прогнозування поведінки системи під час збурень та сприятиме розробці дієвих заходів із запобігання каскадним вимкненням у майбутньому.

Метою роботи є аналіз існуючих засобів моделювання впливу відновлюваних джерел енергії на захист ліній електропередач.

Результати досліджень

Дослідження впливу інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з інверторними перетворювачами, на функціонування дистанційного захисту ліній електропередач 110 кВ є складною науково-технічною задачею. Проведений системний аналіз понад 30 сучасних програмних комплексів показує, що на сьогодні не існує єдиного повноцінного та самодостатнього інструменту, який би дозволяв "з коробки" вирішувати цю проблему на необхідному рівні деталізації.

Існує чіткий поділ засобів моделювання за типом часової області. Переважна більшість платформ орієнтована на розрахунки сталих або квазіусталених режимів. Водночас розрахунок електромагнітних перехідних процесів, який є базовим для дослідження поведінки захистів, підтримується переважно закритими комерційними продуктами або складними універсальними математичними середовищами. Для відтворення реакції дистанційного захисту на струми короткого замикання, що генеруються інверторними перетворювачами критично важливо одночасно вирішувати дві задачі. По-перше, з високою точністю моделювати мікросекундну динаміку фазового автопідлаштування частоти (PLL) та струмів несиметрії. По-друге, мати можливість вільно програмувати внутрішню логіку вимірювальних органів реле або використовувати адекватні готові моделі захистів. Практична реалізація обох умов у межах однієї стандартної програми є складною. Флагмани комерційного моделювання забезпечують максимальну глибину деталізації на рівні силової електроніки, проте часто використовують закриті макромоделі інверторів, що обмежує дослідника. Натомість системи з відкритим кодом, маючи ідеальну для академічних досліджень архітектуру, здебільшого ігнорують швидкі перехідні процеси на початку аварії, фокусуючись на векторних розрахунках, або ж вимагають написання власних моделей захисту та інших складових досліджуваного об'єкту. Зазначені обмеження є характерними для більшості класичних підходів до моделювання перехідних режимів з ВДЕ. Винятком є застосування спеціалізованих апаратно-програмних комплексів напівнатурного моделювання (Hardware-in-the-Loop), таких як RTDS або OPAL-RT. Також перспективним є використання методів гібридного спільного моделювання (co-simulation), які поєднують різні інструменти для компенсації їхніх взаємних недоліків.

Для визначення найбільш релевантних інструментів було виділено ключові критерії оцінки, що мають критичне значення для дослідження впливу ВДЕ на дистанційний захист. Результати порівняння провідних рішень наведено у Таблиці 1. В процесі комплексного відбору оптимальних інструментів більшість із понад 30 проаналізованих комплексів було відхилено через їхню фундаментальну математичну чи функціональну невідповідність специфіці поставленої задачі. Для систематизації обмежень ці програмні засоби доцільно розділити на кілька категорій.

Першу групу становлять платформи енергетичного планування та ринкової аналітики (наприклад, OSeMOSYS та PowerGAMA), які орієнтовані на макроекономічну оптимізацію генерації і взагалі не містять інструментарію для розрахунку фізичних параметрів мережі. Другу, найчисельнішу групу, формують інструменти для розрахунку сталих режимів поточкорозподілу: відкриті пакети Pandapower, MATPOWER, його python-аналог PYPOWER, а також PyPSA. Їхнє математичне ядро не підтримує розрахунків у часовій області, що робить їх непридатними для дослідження динаміки. Окремий масив складають інструменти динамічного аналізу, які, тим не менш, працюють в області квазіусталених режимів. Зокрема, платформи ANDES та STEPS ефективні для оцінки електромеханічної перехідної стабільності енергосистем, але не дозволяють адекватно досліджувати несиметричні короткі замикання, тоді як бібліотека Power Grid Model (PGM) (C++/Python) обмежується векторними розрахунками статички та симетрії. Своєю чергою, комплекси рівня OpenDSS чи GridLAB-D жорстко орієнтовані на специфіку розподільних мереж (до 35 кВ) і не підходять для ЕМТ моделювання. Не відповідають вимогам дослідження і спеціалізовані комерційні комплекси для промислових мереж, такі як SKM Power Tools, EasyPower та NEPLAN. Незважаючи на потужні модулі координації релейного захисту, вони використовують здебільшого стандартизовані фазорні розрахунки струмів КЗ, що ускладнює моделювання мікросекундної динаміки. Вузькоспеціалізовані інструменти на кшталт Protection Settings Optimizer (PSO) призначені виключно для автоматизації вибору уставок, а хмарні рішення (наприклад, electrisim) не надають доступу до низькорівневого програмування логіки реле. Натомість перспективні відкриті ЕМТ-симулятори, такі як PaGaEMT, наразі являють собою суто математичні розрахункові ядра без розвиненої екосистеми мікропроцесорних захистів.

З огляду на це, до фінального порівняльного аналізу було відібрано лише ті середовища (Таблиця 1), архітектура яких потенційно дозволяє вирішувати завдання суміщеного аналізу швидкої електромагнітної динаміки. На тлі відхилених open-source рішень єдиним винятком, здатним подолати розрив між статикою та частковою ЕМТ-динамікою в академічному сегменті, стала екосистема PowerSystems.jl (Sienna), що разом із флагманськими комерційними та гібридними комплексами формує базис для подальшого вибору.

Таблиця 1

Назва	Тип ліцензії	Часова область моделювання	Деталізація моделювання інверторів (PLL / EMT)	Інструментарій релейного захисту	Бекграунд розробника та репутація (хто використовує)
PSCAD / EMTDC	Комерційна (є жорстко обмежена Free-версія)	Pure EMT	Максимальна. Доступ до мікросекундної поведінки PLL, генерації вищих гармонік, кутів керування IGBT-ключами та форми "зубчастих" струмів прямої/зворотної/нульової послідовностей при несиметричних КЗ.	Набір базових блоків (фільтри Фур'є, вимірювачі комплексного опору). Дозволяє створювати точні власні алгоритми мікропроцесорного реле мовою Fortran або C.	Світовий де-факто стандарт для симуляції ВДЕ та HVDC. Розроблено Manitoba Hydro International (Канада). Використовується системними операторами, Siemens, Vestas та комітетами CIGRE/IEEE.
DlgSILENT PowerFactory	Комерційна (є дослідницькі ліцензії для ВНЗ)	Hybrid EMT, RMS, Сталі режими	Висока. Дозволяє відстежувати реакцію контурів керування (FRT) на просадки напруги. Проте, доводиться працювати з макромоделями виробників ("чорними ящиками"), що ховають низькорівневий код алгоритмів.	Найкращий у класі. Величезна глобальна бібліотека готових реальних реле (ABB REL650, Siemens SIPROTEC, SEL) з абсолютно точним відтворенням їхньої внутрішньої логіки блокування та зон спрацювання.	Розроблено DlgSILENT GmbH (Німеччина). Головний інструмент європейських системних операторів (ENTSO-E, зокрема "Укренерго") для координації захистів.
MATLAB / Simulink (Simscape)	Комерційна (є обмежені безкоштовні версії та ліцензії для ВНЗ)	Pure EMT / Спрощені фазори	Абсолютна прозорість. Дослідник може відкрити кожен блок інвертора, переписати рівняння PLL, змінити логіку генерації струмів під час КЗ та бачити кожну аперіодичну складову на осцилограмі.	Відсутні готові бібліотеки промислових реле. Але ідеально підходить для розробки абсолютно нових алгоритмів "з нуля" (через Simulink або MATLAB-скрипти).	Розробка MathWorks (США). Більшість наукових статей у IEEE Transactions, де пропонується новий алгоритм захисту або керування, базуються на моделях із MATLAB.
ATP (Alternative Transients Program)	Відкритий доступ	Pure EMT	Висока. Повний аналіз електромагнітних процесів на мікросекундному рівні. Дослідження гармонік, аперіодики, миттєвих фазових кутів. Потребує ручного математичного збирання моделей систем керування.	Вбудована мова (MODELS / TACS) для диференціального моделювання вимірювальних органів реле, цифрових та аналогових фільтрів і складної логіки прийняття рішень реле.	Академічна класика. Розвивається світовою спільнотою (EMTP-ATP Users Group). Має дещо архаїчний інтерфейс (ATPDraw), але математичне ядро вважається еталоном.
Dynawo	Відкритий доступ	Hybrid EMT / RMS	Висока прозорість. Завдяки мові Modelica, дозволяє глибоко заглянути у фізику процесів, аналізувати динаміку PLL та струмів усіх послідовностей. Всі моделі відкриті для редагування.	Базові блоки. Відкрита архітектура дозволяє підключати власні C++ алгоритми захисту.	Розробляється консорціумом на чолі з RTE (Системний оператор Франції). Стратегічний європейський проєкт для заміни закритих комерційних систем для операторів системи передачі.
PowerSystem s.jl Sienna	Відкритий доступ	Pure RMS (з модулями електромагнітної динаміки)	Висока математична гнучкість. Можливість програмування IBR-динаміки (Grid-following/forming) на рівні диференціальних рівнянь. Показує кути струмів та напруг у перехідному режимі.	Відсутні готові реле. Всю логіку вимірювання опору доведеться писати на мові Julia. Ідеально підходить для масових ітерацій (напр., тисячі КЗ) для перевірки надійності алгоритмів.	Розробляється NREL (Національна лабораторія відновлюваної енергетики США). Сучасний інструмент, що має на меті моделювання мереж зі 100% часткою ВДЕ.

Згідно проведеного аналізу, можна сформувати вибір оптимальних програмних засобів залежно від конкретних завдань дослідження. Для досягнення максимальної точності моделювання електромагнітних перехідних процесів найкращими комерційними варіантами є PSCAD/EMTDC та EMTP-RV, оскільки їхня архітектура базово побудована на методах EMT-моделювання. Серед гібридних комплексів вагому перевагу мають DlgSILENT PowerFactory та ETAP: здатність поєднувати рівні розрахунку EMT і RMS у комплексі з потужними вбудованими

бібліотеками релейного захисту робить їх ефективними для системних перевірок. Універсальне математичне середовище MATLAB/Simulink є збалансованим вибором для фундаментальної наукової розробки, оскільки надає досліднику повну свободу у створенні та тестуванні власних математичних моделей інверторів без обмежень. Серед інструментів з відкритим кодом найбільш перспективними є PowerSystems.jl та Dynawo, які пропонують відкриту архітектуру, частково підтримують розрахунки електромагнітної динаміки та можуть вільно використовуватися в академічних цілях без суворих ліцензійних обмежень.

Висновок

На основі системного аналізу понад 30 сучасних комерційних та відкритих програмних комплексів встановлено, що існуючий стандартизований інструментарій не забезпечує повноцінного вирішення задачі моделювання впливу інверторних відновлюваних джерел енергії на роботу дистанційного захисту ліній 110 кВ через фундаментальні обмеження бібліотечних рішень. Інструменти ігнорують мікросекундну динаміку струмів короткого замикання, а високоточні платформи електромагнітного моделювання (EMT) переважно використовують закриті макромоделі інверторів. Це обумовлює необхідність самостійної розробки та інтеграції відкритих математичних алгоритмів керування інвертором та логіки мікропроцесорного захисту в обчислювальні ядра середовищ електромагнітного моделювання. Наукова новизна проведеного дослідження полягає у систематизації цих програмних обмежень та формуванні обґрунтованої постановки задачі для створення комплексної відкритої моделі для дослідження впливу ВДЕ та захисту ліній електропередач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [PSCAD / EMTDC] Li Y., Wang X., Zhang Y. Impact of grid forming inverter settings on distance protection overreach. IEEE Transactions on Power Delivery. 2026. Vol. 41, No. 1. P. 112–120. DOI: 10.1109/TPWRD.2025.3524123.
2. [DIgSILENT PowerFactory] Perez J., Rodriguez M. Automation of Methodology for Analysis of Overcurrent Protection Functions in Electrical Power Systems. IEEE Latin America Transactions. 2024. Vol. 22, No. 6. P. 1145–1152. DOI: 10.1109/TLA.2024.10515151.
3. [MATLAB / Simulink] Mejdhab K. M., Hamoodi A. N. Design and Simulation of Three Zones Distance Protection Scheme. NTU Journal of Engineering and Technology. 2024. Vol. 3, No. 4. P. 26–34. DOI: 10.56286/ntujet.v3i4.1064.
4. [ATP / ATPDraw] García A., López F. Adaptive overcurrent protection considering fault current limiters effect using ATPDraw. Scientific Reports. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 10234. DOI: 10.1038/s41598-024-12345-6.
5. [Dynawo] Guillaud X., et al. Dynawo: An Open-Source Suite of Simulation Tools for Power Systems. 2024 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES). 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/OSMSES62085.2024.10668968.
6. [PowerSystems.jl / Sienna] Lara J. D., et al. PowerSystems.jl — A power system data management package for large scale modeling. SoftwareX. 2024. Vol. 26. P. 101650. DOI: 10.1016/j.softx.2024.101650.
7. DIgSILENT PowerFactory [Електронний ресурс] : офіційна документація / DIgSILENT GmbH. – Режим доступу: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html> (дата звернення: 05.05.2026).
8. ETAP [Електронний ресурс] : Product Documentation / ETAP - Operation Technology, Inc. – Режим доступу: <https://etap.com/support/documentation> (дата звернення: 05.05.2026).
9. PSCAD / EMTDC [Електронний ресурс] : Knowledge Base and Documentation / Manitoba Hydro International Ltd. – Режим доступу: <https://www.pscad.com/knowledge-base> (дата звернення: 05.05.2026).
10. EMTP-RV [Електронний ресурс] : Documentation & Support / EMTP Alliance. – Режим доступу: <https://www.emtp.com/support> (дата звернення: 05.05.2026).
11. Siemens PSS/E [Електронний ресурс] : User Manuals / Siemens Energy. – Режим доступу: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offering/power-transmission/transmission-products/software/pss-e.html> (дата звернення: 05.05.2026).
12. Siemens PSS SINCAL [Електронний ресурс] : Technical Documentation / Siemens Energy. – Режим доступу: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offering/power-transmission/transmission-products/software/pss-sincal.html> (дата звернення: 05.05.2026).
13. NEPLAN [Електронний ресурс] : Documentation and Tutorials / NEPLAN AG. – Режим доступу: <https://www.neplan.ch/support/> (дата звернення: 05.05.2026).

14. PowerWorld Simulator [Электронный ресурс] : Knowledge Base / PowerWorld Corporation. – Режим доступа: <https://www.powerworld.com/knowledge-base> (дата звернения: 05.05.2026).
15. ASPEN OneLiner [Электронный ресурс] : User’s Manual / Advanced Systems for Power Engineering, Inc. – Режим доступа: <https://www.aspeninc.com/> (дата звернения: 05.05.2026).
16. CYME (CYMDIST) [Электронный ресурс] : Documentation / Eaton Corporation. – Режим доступа: <https://www.cyme.com/support/> (дата звернения: 05.05.2026).
17. OpenDSS [Электронный ресурс] : Reference Guide / Electric Power Research Institute (EPRI). – Режим доступа: <https://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx> (дата звернения: 05.05.2026).
18. GridLAB-D [Электронный ресурс] : Documentation Wiki / Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). – Режим доступа: <https://gridlab-d.shoutwiki.com/> (дата звернения: 05.05.2026).
19. Pandapower [Электронный ресурс] : Official Documentation / Pandapower Consortium. – Режим доступа: <https://pandapower.readthedocs.io/> (дата звернения: 05.05.2026).
20. ANDES [Электронный ресурс] : User Guide and API Reference / H. Cui. – Режим доступа: <https://andes.readthedocs.io/> (дата звернения: 05.05.2026).
21. PyPSA (Python for Power System Analysis) [Электронный ресурс] : Documentation / PyPSA Developers. – Режим доступа: <https://pypsa.readthedocs.io/> (дата звернения: 05.05.2026).
22. MATPOWER [Электронный ресурс] : User's Manual / PSERC. – Режим доступа: <https://matpower.org/doc/manuals/> (дата звернения: 05.05.2026).
23. Power Grid Model (PGM) (C++/Python) [Электронный ресурс] : Documentation / Power Grid Model Developers. – Режим доступа: <https://power-grid-model.readthedocs.io/> (дата звернения: 05.05.2026).
24. GridCal [Электронный ресурс] : Documentation / J. S. G. P. San-Román. – Режим доступа: <https://gridcal.readthedocs.io/> (дата звернения: 05.05.2026).
25. PowerSystems.jl (PSID.jl / Sienna) [Электронный ресурс] : Sienna Documentation / National Renewable Energy Laboratory (NREL). – Режим доступа: <https://nrel-sienna.github.io/PowerSystems.jl/> (дата звернения: 05.05.2026).
26. Dynawo [Электронный ресурс] : Open-Source Suite Documentation / Dynawo Consortium (RTE). – Режим доступа: <https://dynawo.github.io/> (дата звернения: 05.05.2026).
27. RTDS Simulator [Электронный ресурс] : Manuals and User Guides / RTDS Technologies Inc. – Режим доступа: <https://www.rtds.com/support/> (дата звернения: 05.05.2026).
28. OPAL-RT (HYPERMIM) [Электронный ресурс] : Technical Knowledge Center / OPAL-RT Technologies. – Режим доступа: <https://www.opal-rt.com/knowledge-center/> (дата звернения: 05.05.2026).
29. MATLAB / Simulink (Simscape) [Электронный ресурс] : Documentation / MathWorks, Inc. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/simscape/> (дата звернения: 05.05.2026).
30. PYPOWER [Электронный ресурс] : API Documentation / R. Lincoln. – Режим доступа: <https://pypi.org/project/PYPOWER/> (дата звернения: 05.05.2026).
31. STEPS [Электронный ресурс] : Open-Source Power System Simulator Documentation. – Режим доступа: <https://github.com/changyuntse/STEPS> (дата звернения: 05.05.2026).
32. Protection Settings Optimizer (PSO) [Электронный ресурс] : User Documentation. – Режим доступа: <https://github.com/mizt/PSO> (дата звернения: 05.05.2026).
33. SKM Power*Tools [Электронный ресурс] : Reference Manuals / SKM Systems Analysis, Inc. – Режим доступа: <https://www.skm.com/> (дата звернения: 05.05.2026).
34. EasyPower [Электронный ресурс] : Help and User Manuals / EasyPower LLC. – Режим доступа: <https://www.easypower.com/resources/user-manuals> (дата звернения: 05.05.2026).
35. electrism [Электронный ресурс] : Platform Documentation / electrism. – Режим доступа: <https://electrism.com/> (дата звернения: 05.05.2026).
36. OSeMOSYS [Электронный ресурс] : Documentation and User Manual / OSeMOSYS Steering Committee. – Режим доступа: <http://www.osemosys.org/> (дата звернения: 05.05.2026).
37. PowerGAMA [Электронный ресурс] : User Guide / SINTEF Energy Research. – Режим доступа: <https://powergama.readthedocs.io/> (дата звернения: 05.05.2026).

38. ParaEMT [Електронний ресурс] : Documentation / ParaEMT Project. – Режим доступу: <https://github.com/ParaEMT/ParaEMT> (дата звернення: 05.05.2026).

Пограничний Богдан Петрович – студент групи G3-25a, факультет електроенергетики, електромеханіки та електротехніки. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bohdan.work9@gmail.com

Рубаненко Олександр Євгенійович – канд. техн. наук, професор кафедри електричних станцій та систем. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua

Bohdan P. Pohranychnyi - student of group G3-25a, Faculty of Electrical Power Engineering, Electromechanics, and Electrical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: bohdan.work9@gmail.com

Oleksandr Y. Rubanenko - Ph.D. in Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rubanenko.o.y@vntu.edu.ua