

References

1. Official manufacturer website Zibo Jucos Co.,Ltd.
URL: <https://www.jucosrefractory.com/insulation-thermal-material/vacuum-insulation-panel.html> (дата звернення 13.04.2026)
2. Wang J., Wang Z., Chen D., Pei Z., Shen J., Zhou N. Degradation mechanisms in metallized barrier films for vacuum insulation panels subjected to flanging-induced stress. *Nanomaterials*, 2025, 15(16): 1231. DOI:10.3390/nano15161231.
3. Baetens, Ruben & Jelle, Bjørn & Thue, Jan & Tenpierik, Martin & Grynning, Steinar & Uvsløkk, Sivert & Gustavsen, Arild. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*. 42. P. 147–172.
URL: 10.1016/j.enbuild.2009.09.005.

УДК 631.311

Лугін Д. М., магістрант, ORCID 0009-0009-8814-5944,
наук. керівник: канд. техн. наук, доцент Т. Л. Кацадзе,
ORCID 0000-0002-8365-0046

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

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ ЗА НАПРУГОЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ІЄРАРХІЧНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІТИЧНИХ ІНДЕКСІВ

EVALUATION OF THE STATIC STABILITY OF POWER SYSTEMS BASED ON VOLTAGE USING A HIERARCHICAL SYSTEM OF ANALYTICAL INDICES

Анотація. У статті розглянуто проблему оперативного моніторингу стійкості енергосистем за напругою в умовах наближення до точок біфуркації. Обґрунтовано доцільність використання аналітичних індексів стійкості (VSIs) як ефективного інструменту для швидкого оцінювання стану мережі в реальному часі, що є критично важливим для диспетчерського керування. Основним результатом роботи є розробка та програмна реалізація ієрархічного підходу до оцінювання стабільності на основі трьох рівнів аналізу: локального (лінійний індекс L_{mn}), вузлового (вузловий індекс $VCPI$) та загальносистемного (мережевий індекс L). Такий підхід дозволяє не лише констатувати факт наближення до межі колапсу напруги, а й точно ідентифікувати критичні лінії та слабкі вузли системи. Практична реалізація алгоритму виконана мовою Python із використанням вбудованого API програмного комплексу DIgSILENT PowerFactory. Апробація розробленого скрипта проведена на 24-вузловій тестовій схемі IEEE (RTS-24), що підтвердило високу швидкість обчислень та надійність отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути впроваджені в сучасні системи підтримки прийняття рішень для оперативного персоналу енергосистем. Бібл. 10, рис. 2., табл. 1.

Ключові слова. стійкість за напругою, колапс напруги, індекси стійкості, DIgSILENT PowerFactory, моніторинг у реальному часі.

Abstract. This article examines the problem of real-time monitoring of the stability of power systems based on voltage as they approach bifurcation points. The feasibility of using analytical stability indices (VSIs) as an effective tool for rapid real-time assessment of the grid's state,

which is critically important for dispatch control, is substantiated. The main result of the work is the development and software implementation of a hierarchical approach to stability assessment based on three levels of analysis: local (linear index L_{mn}), node (node index $VCPI$), and system-wide (network index L). This approach allows not only to establish the fact of approaching the voltage collapse threshold but also to accurately identify critical lines and weak nodes of the system. The practical implementation of the algorithm was carried out in Python using the built-in API of the *DIgSILENT PowerFactory* software suite. The developed script was tested on a 24-node IEEE test network (RTS-24), which confirmed the high speed of calculations and the reliability of the results obtained. The research results can be implemented in modern decision support systems for power system operations personnel. Ref. 10, Fig. 2, Tabl. 1.

Keywords: voltage stability, voltage collapse, stability indices, *DIgSILENT PowerFactory*, real-time monitoring.

Вступ. Сучасні електроенергетичні системи (ЕС) функціонують в умовах постійного зростання споживання, впровадження некерованої відновлюваної генерації та роботи ринкових механізмів, що змушує мережі працювати близько до фізичних меж стійкості [1, 2]. Однією з найбільш критичних загроз є порушення стабільності напруги, що може призвести до лавиноподібного її падіння (колапсу) та системних аварій (blackout) [1, 6, 7]. Традиційні методи аналізу, такі як імітаційне моделювання перехідних процесів або обчислення власних значень матриці Якобі, хоча і є високоточними, потребують значних обчислювальних ресурсів і часу, що обмежує їх застосування в темпі оперативного керування [1, 8]. Це обумовлює необхідність розробки та впровадження швидких інструментів оцінки стану ЕС – індексів стійкості за напругою (*Voltage Stability Indices*, VSI), які дозволяють диспетчеру в реальному часі ідентифікувати слабкі вузли та критичні лінії.

Метою дослідження є розробка та програмна реалізація системи комплексних індексів стійкості (L_{mn} , $VCPI$, L) для автоматизованого оцінювання режиму роботи енергосистеми в середовищі *PowerFactory*. Дослідження спрямоване на створення ефективного скрипта моніторингу, який дозволяє ідентифікувати «слабкі місця» на рівні ліній та вузлів, а також оцінювати загальний запас стійкості мережі в темпі оперативного керування.

Матеріал і результати досліджень. Фундаментальною основою аналізу усталених режимів енергосистем є дослідження умов їхнього існування та неоднозначності розв’язків. На прикладі елементарної двовузлової системи (джерело – лінія – навантаження) встановлено, що математичний опис закону Ома у формі потужностей призводить до виникнення складного нелінійного співвідношення [9].

$$\dot{U}_1 = U_2 + \frac{P_2 r - Q_2 x}{U_2} + j \frac{P_2 x + Q_2 r}{U_2} \quad (1)$$

Розв’язання цього рівняння відносно напруги у вузлі навантаження U_2 набуває вигляду біквадратного рівняння, аналіз дискримінанта якого виявляє два теоретично можливих корені.

$$U_2^4 - (U_1^2 - 2(P_2 r - Q_2 x))U_2^2 + (P_2^2 + Q_2^2)(r^2 + x^2) = 0 \quad (2)$$

Фізична інтерпретація цих розв'язків дозволяє розділити їх за ознакою стійкості:

1. Стійкий (нормальний) режим: відповідає кореню з вищою напругою, за якого система здатна повертатися до сталого стану після малих збурень.

2. Нестійкий (аномальний) режим: відповідає кореню з низькою напругою та високими втратами; такий режим є фізично нездійсненним для тривалої експлуатації, оскільки будь-яке збурення веде до втрати синхронізму або колапсу.

Для наочності ці розв'язки зображують у фазовому просторі (рис. 1) складових вектора напруги (дійсної та уявної). На комплексній площині напруга на початку лінії U_1 представляється у формі кола, а параметрична залежність напруги наприкінці – у вигляді кривої другого порядку (гіперболоподібної характеристики) [9]. Точки перетину цих двох геометричних фігур і є двома шуканими розв'язками режимної задачі.

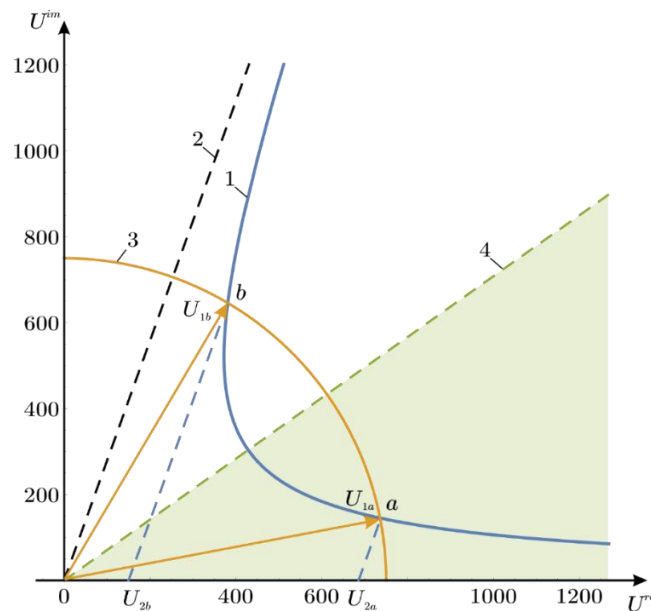


Рисунок 1. Графоаналітичне розв'язання рівнянь закону Ома у фазовому просторі складових вектору напруги

Критичним станом системи є момент, коли дискримінант біквадратного рівняння стає рівним нулю. У цьому разі два корені зливаються в один, що відповідає точці біфуркації (від лат. *bifurcus* – «роздвоєний») або «носовій» точці (*nose point*). За цією межею рівняння не мають дійсних коренів, що означає фізичну неможливість існування режиму при заданих параметрах навантаження. Саме наближення робочої точки від зони двох розв'язків до точки біфуркації і визначає запас стійкості енергосистеми за напругою.

При переході від найпростішої моделі до розгалуженої мережі, де кількість вузлів може сягати тисяч, ситуація кардинально ускладнюється. Рівняння стають надзвичайно громіздкими, а кількість невідомих зростає експоненціально, що робить пряме аналітичне визначення розв'язків та межі

стійкості практично неможливим. Для розв'язання цієї проблеми в енергетиці застосовують такі підходи:

1. Імітаційне моделювання: базується на чисельному інтегруванні повних систем диференціальних рівнянь [10]. Це найбільш точний метод, оскільки він враховує всі нелінійності, проте він є найбільш часозатратним і складним для реалізації.

2. Критеріальні методи: використовують математичні критерії (наприклад, методи Ляпунова або аналіз власних чисел) для оцінки стійкості без повного моделювання процесів. Вони мають високу наукову обґрунтованість, але складні у побудові функцій для великих систем.

3. Індекси стійкості (VSI): є найбільш швидким і простим інструментом оцінювання. Попри дещо нижчу точність порівняно з імітаційним моделюванням, вони дозволяють миттєво визначити близькість режиму до межі колапсу.

В оперативній роботі диспетчера швидкість отримання інформації є вирішальним фактором. В умовах швидкої зміни режимів, зумовленої ринковими механізмами або інтеграцією відновлюваної генерації, навіть посередня точність індексів є прийнятною, якщо вона дозволяє вчасно ідентифікувати загрозу колапсу напруги та вжити запобіжних заходів [7].

Важливою складовою оперативного оцінювання стану енергосистеми є застосування ієрархічної системи індикаторів, детально описаних у роботі [4], де кожен рівень аналізу відповідає за специфічний сегмент мережі. Для оцінювання завантаженості та близькості до межі стійкості окремих ліній електропередавання використовується лінійний індекс стабільності L_{mn} , математичне формулювання якого базується на концепції передавання максимальної потужності через одиночну гілку [1,4]. Розрахунок цього показника здійснюється за формулою:

$$L_{mn} = \frac{4XQ_j}{[V_i \sin(\theta - \delta)]^2} \leq 1 \quad (3)$$

де X – реактивний опір лінії, Q_j – реактивна потужність наприкінці ділянки, V_i – напруга на шині джерела, δ – різниця фазових кутів між векторами напруги, θ – кут імпедансу лінії. Значення індексу менше одиниці свідчить про стабільну роботу лінії, тоді як наближення до 1.0 сигналізує про критичне вичерпання пропускної здатності та загрозу виникнення колапсу напруги [4].

На рівні вузлового аналізу для ідентифікації слабких пунктів навантаження застосовується індикатор попередження колапсу напруги VCPI (*Voltage Collapse Proximity Indicator*). Цей індекс базується на аналізі параметрів еквівалента Тевеніна для кожного конкретного вузла та визначає співвідношення між потужністю, що споживається, та максимально можливою потужністю, яку вузол здатний прийняти за умови збереження аперіодичної стійкості [4, 8]. У вузловій формі цей показник відображає ступінь виродженості матриці вузлових провідностей відносно навантаження у конкретній точці.

Для отримання інтегральної оцінки стану всієї мережі використовується критерій стабільності системи L , який базується на зведенні складної розгалуженої схеми до однолінійного еквівалента [4]. Математично цей фактор враховує сумарні втрати активної та реактивної потужностей у мережі, а також загальну генерацію системи. Розрахунковий вираз для фактора L має вигляд:

$$L = 4 \left[(x_{eq} Pl_{eq} - r_{eq} Ql_{eq})^2 + (x_{eq} Ql_{eq} + r_{eq} Pl_{eq}) \right] \leq 1 \quad (4)$$

де r_{eq} та x_{eq} – еквівалентні опори системи, а Pl_{eq} та Ql_{eq} – сумарні навантаження еквівалентної моделі. Цей показник дозволяє диспетчеру миттєво оцінити загальний запас надійності поточної конфігурації енергосистеми.

Практична реалізація описаних методів була здійснена за допомогою спеціально розробленого скрипта мовою Python, інтегрованого у програмний комплекс DIgSILENT PowerFactory через вбудований API [5]. Алгоритм передбачає автоматичне виконання розрахунку усталеного режиму методом Ньютона-Рафсона (*ComLdf) для кожної зміни параметрів, після чого проводиться фільтрація об'єктів та обчислення відповідних індексів. Зокрема, скрипт обробляє лише лінії електропередачі (*ElmLne) для індексу L_{mn} та лише вузли з підключеним активним навантаженням (*ElmLod) для $VCPI$, що значно підвищує швидкість обробки даних.

Ефективність роботи розробленого інструментарію була продемонстрована на 24-вузловій тестовій схемі IEEE (RTS-24, рис. 2) [4]. В ході імітаційного моделювання було реалізовано сценарій поступового «обважнення» режиму шляхом збільшення активного та реактивного навантаження у вузлі 6.

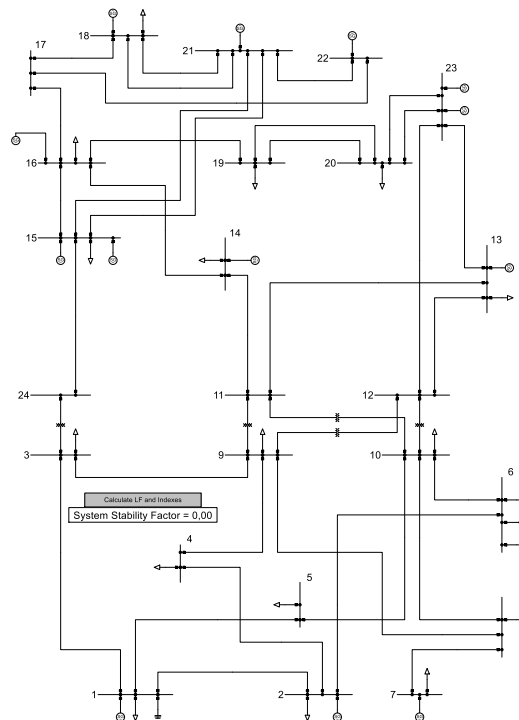


Рисунок 2. Однолінійна схема системи випробувань стійкості з 24 шинами за стандартом IEEE

При досягненні рівня споживання, що у 4,6 рази перевищує номінальні значення, результати розрахунку показані в табл. 1, чітко було зафіксовано втрату стійкості у зазначеному вузлі через перевищення критичного порогу $VCPI$. Одночасно з цим лінійні індекси L_{mn} для гілок, що безпосередньо з'єднані з вузлом 6, наближаються до своїх граничних значень.

Таблиця 1. Індекс стабільності лінії, $VCPI$ та коефіцієнт загальної стабільності системи для значного активного та реактивного навантаження у вузлі 6

Завантаження (в.о.)	Лінія		L_{mn}	Вузол	$VCPI$	Загальний коефіцієнт стабільності системи L
	вузол початку	вузол кінця				
P = 4,6 Q = 4,6 у вузлі 6	2	6	0,769	6	1,085	0,4025
	1	3	0,657	8	0,162	
	6	10	0,552	7	0,144	
	2	4	0,399	3	0,129	

Висока швидкість обчислення (1,0–1,5 с) та наочність представлення результатів підтверджують придатність запропонованого підходу для використання в темпі оперативного керування реальних енергосистем.

Висновки. Розроблений програмний інструментарій на базі Python та DIgSILENT PowerFactory забезпечує високу точність прогнозування точок біфуркації без значних витрат обчислювальних ресурсів. Використання ієрархічної системи індексів дозволяє не лише констатувати стан стійкості всієї мережі, а й завчасно ідентифікувати критичні елементи, що можуть стати ініціаторами лавиноподібного падіння напруги. Це підтверджує ефективність обраного підходу для інтеграції в сучасні системи підтримки прийняття рішень диспетчерського персоналу.

Список використаних джерел

1. Mokred, S., Wang, Y. & Chen, T. A novel collapse prediction index for voltage stability analysis and contingency ranking in power systems. Prot Control Mod Power Syst 8, 7 (2023). URL: <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00279-w>. (дата звернення 13.04.2026)
2. B. Ismail et al., New Line Voltage Stability Index (BVSI) for Voltage Stability Assessment in Power System: The Comparative Studies, in IEEE Access, vol. 10, pp. 103906-103931. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3204792>. (дата звернення 13.04.2026)
3. Kanimozhi R, Selvi K. A Novel Line Stability Index for Voltage Stability Analysis and Contingency Ranking in Power System Using Fuzzy Based Load Flow [Internet]. Vol. 8, Journal of Electrical Engineering and Technology. The Korean Institute of Electrical Engineers; 2013. P. 694–703. URL: <https://doi.org/10.5370/JEET.2013.8.4.694>. (дата звернення 13.04.2026)
4. M. Moghavvemi and F. M. Omar, “Technique for contingency monitoring and voltage collapse prediction”, in IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, no. 6, pp. 634-640, Nov. 1998. URL: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19982357>. (дата звернення 13.04.2026)
5. Scripting with Python in PowerFactory: tutorial. DIgSILENT GmbH. – Gomaringen, 2024. – 34 p.
6. Kundur P. Power system stability and control – McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.

7. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, Про затвердження Кодексу системи передачі, Постанова № 309 від 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18>. (дата звернення: 13.04.2026)
8. M. Moghavvemi and F. M. Omar, “Real-time contingency evaluation and ranking technique”, in IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, no. 5, pp. 517–524, Sept. 1998. URL: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19982167>. (дата звернення 13.04.2026)
9. Кацадзе Т. Л. Електричні системи та мережі. Частина 2. Розрахунок та аналіз усталених режимів електроенергетичних систем [Електронний ресурс] : матеріали лекцій / Кацадзе Т. Л. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,16 Мбайт). – 2016. – 284 с.
URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/39957>. (дата звернення 13.04.2026)
10. L. L. Grigsby (Ed.), Electric Power Engineering Handbook, 2nd ed., CRC Press, 2007. 352 p.

References

1. Mokred, S., Wang, Y. & Chen, T. A novel collapse prediction index for voltage stability analysis and contingency ranking in power systems. Prot Control Mod Power Syst 8, 7 (2023). URL: <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00279-w>. (accessed 13.04.2026)
2. B. Ismail et al., New Line Voltage Stability Index (BVSI) for Voltage Stability Assessment in Power System: The Comparative Studies, in IEEE Access, vol. 10, pp. 103906-103931. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3204792>. (accessed 13.04.2026)
3. Kanimozhi R, Selvi K. A Novel Line Stability Index for Voltage Stability Analysis and Contingency Ranking in Power System Using Fuzzy Based Load Flow [Internet]. Vol. 8, *Journal of Electrical Engineering and Technology. The Korean Institute of Electrical Engineers*; 2013. P. 694–703. URL: <https://doi.org/10.5370/JEET.2013.8.4.694>. (accessed 13.04.2026)
4. M. Moghavvemi and F. M. Omar, Technique for contingency monitoring and voltage collapse prediction, in IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, No. 6, P. 634–640, Nov. 1998. URL: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19982357>. (accessed 13.04.2026)
5. Scripting with Python in PowerFactory: tutorial. DIgSILENT GmbH. – Gomarigen, 2024. – 34 p.
6. Kundur P. Power system stability and control – McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
7. National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors, “On the Approval of the Transmission System Codes”, Resolution No. 309 of March 14, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18>. (accessed 13.04.2026) (Ukr)
8. M. Moghavvemi and F. M. Omar, Real-time contingency evaluation and ranking technique, in IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, No. 5, P. 517–524, Sept. 1998. URL: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19982167>. (accessed 13.04.2026)
9. Katsadze, T. L. Electrical Systems and Networks. Part 2. Calculation and Analysis of Steady-State Conditions in Electric Power Systems [Electronic resource]: lecture materials / T. L. Katsadze. – Electronic text data (1 file: 8.16 MB). – 2016. – 284 p. UR
L: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/39957>. (accessed 13.04.2026) (Ukr)
10. L. L. Grigsby (Ed.), Electric Power Engineering Handbook, 2nd ed., CRC Press, 2007. 352 p.