

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-29>

УДК 621.311.21

Пітух Ігор Романович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3329-4901>

Західноукраїнський національний університет, м Тернопіль, Україна.

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ЕМЕРДЖЕНТНОГО АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ ТОПОЛОГІЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ВРАХУВАННЯ ЙМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДМОВ

Пітух І.Р. Розвиток теорії емерджентного аналізу складних топологій високовольтних мереж на основі методу врахування ймовірнісних характеристик відмов. В роботі запропонований метод емерджентного аналізу топологій високовольтних мереж, як класу кольорових мереж Петрі з врахуванням відмов генеруючого, передавального та сповивального електрообладнання.

Ключові слова: енергосистеми, критерій емерджентності, електропідстанція.

Pitukh I. Development of the theory of emergent analysis of complex topologies of high-voltage networks based on the method of taking into account probabilistic failure characteristics. The paper proposes a method of emergent analysis of topologies of high-voltage networks, as a class of colored Petri nets, taking into account failures of generating, transmission and winding electrical equipment.

Key words: power systems, emergency criterion, electric substation.

Постановка наукової проблеми.

Стратегічний та динамічний розвиток системи енергопостачання в Україні безпосередньо пов'язаний з необхідністю підвищення надійності та живучості електротехнічного обладнання на стаціонарних генеруючих потужностях різного типу гідро, вітрових, сонячних та атомних електростанцій, а також мобільних електрогенераторів корабельного та наземного типу. Аналіз топологій сучасних досліджень типів високовольтних електромереж, як підвиду кольорових мереж Петрі [1], викладені в опублікованих джерелах [2,3] базуються на повній стопроцентній наявності комунікованого обладнання в часі. У той же час, в умовах природних динамічних факторів та ціленаправлених пошкоджень компонентів такого класу систем, розрахунок їх характеристик не враховує ймовірнісні процеси зміни топології мережі та наявності відмов компонентів. Перспективним застосуванням теоретичних положень аналізу топологій високовольтних мереж є оцінки ступеня емерджентності в умовах динамічної зміни їх архітектури. Тому актуальною є проблема розвитку теорії емерджентного аналізу складних топологій високовольтних мереж та застосування методу врахування ймовірнісних характеристик оцінок ступеня емерджентності в умовах відмов.

Аналіз досліджень.

Класична теорія кольорових мереж Петрі базується на топологічному аналізі шляхом врахування структурної та кількісних характеристик вершин та ребер, на основі яких будується модель матриці сумісності та інценденції [4]. Такого роду моделі не враховують динамічні зміни топології та кількості компонентів у результаті ймовірнісних впливів. В наш час, практично відсутні теоретичні положення розрахунку топологій складних мереж з врахуванням ймовірностей характеристик відмов компонентів та зміни архітектури.

Такий стан досліджень у цій галузі знань не дозволяє визначити найбільш вразливі інформаційні та матеріальні комунікації, які можуть приводити до суттєвої деградації системи в часі. Ускладнюється також математичне обґрунтування оптимізованих заходів резервування певних компонентів енергосистеми, а також її інформаційного та матеріального криптозахисту. Позитивним прикладом проведення робіт у цьому напрямку є резервування інформаційних каналів. Трьохкратне криптозахистене резервування інформаційних та енергетичних каналів моніторингу та управління ефективно застосовується в діючій системі «Стріла» [5].

Мета роботи.

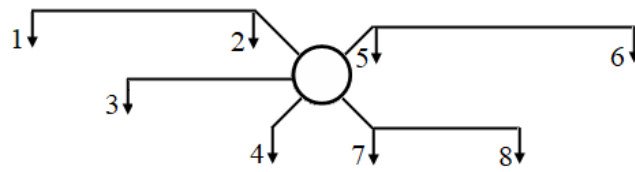
Розробка теоретичних положень розширення функціональних можливостей емерджентного аналізу динамічно змінюваних топологій та кількості компонентів складних багаторівневих мереж електропостачання.

Крім названих факторів динамічних змін в архітектурах системи електропостачання слід враховувати можливості суттєвої зміни кількості споживачів та споживані потужності

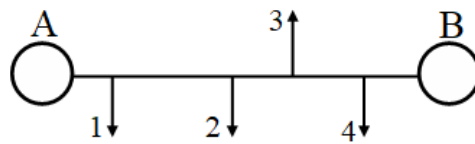
електроенергії, наприклад, при всерному відключенні споживачів в умовах дефіциту потужностей електроенергії.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

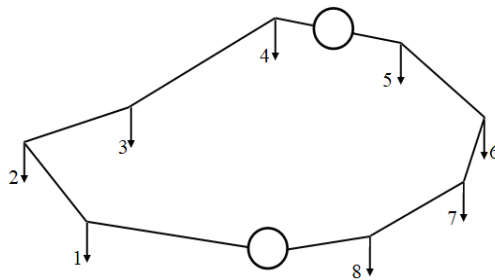
В плані постановки вирішувальної проблеми автором досліджені архітектури розімкнутих магістральних та замкнутих топологій високовольтних електромереж представлених на рис. 1, в яких застосовується певна кількість об'єктів генерування та споживання.



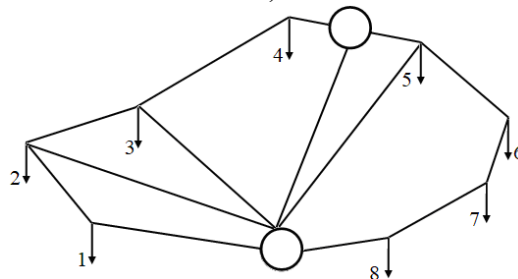
а)



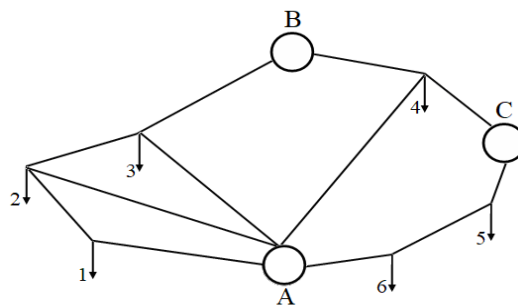
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Розімкнуті магістральні та замкнуті топології високовольтних електромереж

Розрахунок емерджентності вище наведених архітектур на основі критеріїв емерджентності, згідно визначення кількості зв'язків до кількості об'єктів () запропонованих автором в [6] подано в табл.1.

Таблиця 1. Оцінка топології енергосистем згідно критерію емерджентності

Тип топології	Назва топології	K_e
Рис.1(а)	Топологія розімкненої електромережі з одним джерелом живлення	$K_e=8/1=8$
Рис 1(б)	Магістральна електромережа з багатьма джерелами електроживлення	$K_e=5/2=2.25$
Рис.1(в)	Кільцева електромережа з багатьма джерелами електроживлення	$K_e=8/2=4$
Рис.1(г)	Кільцево-радіальна електромережа збагатьма джерелами електроживлення	$K_e=8/2=4$
Рис.1(д)	Кільцево-радіальна електромережа з багатьма джерелами електроживлення	$K_e=18/3=6$

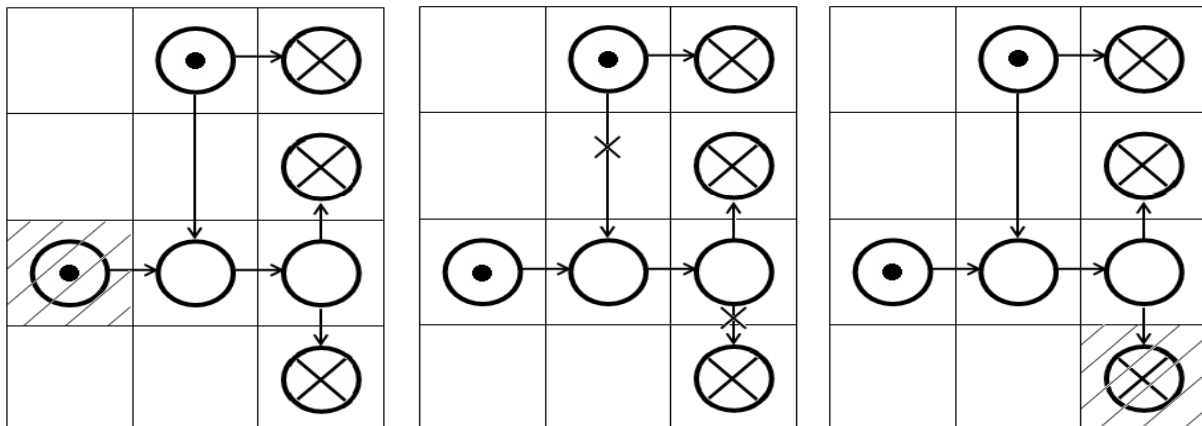
Розрахунки приведені в табл. 1 дозволяють встановити, при наявності високомобільних споживачів в умовах комендантських годин, а також автотранспорту на електричній тязі, що такі архітектури з імовірнісними споживачами мають набагато вищі показники емерджентності у порівнянні з більш досконалими архітектурами, наприклад зірково-магістральною, зірково-кільцевою та інше. Тобто при зростанні кількості споживачів до максимального значення, гранична мінімальна емерджентність приведених структур приведених на рис.1 відповідно зменшується

Таким чином, в основу розширення теоретичних положень такого класу мереж запропоновано оцінку емерджентності згідно виразу:

$$K_e(\Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot N_s}{\sum_{j=1}^m P_j \cdot N_e}, \quad i \in \overline{1..n}, \quad j \in \overline{1..m}, \quad (1)$$

де Δt – часовий інтервал у якому топологія електромережі та наявність її діючих повнофункціональних компонентів незмінна; P_i та P_j – відповідні ймовірності штатно діючих компонентів системи; n та m – відповідні максимальні кількості діючих у штатному режимі компоненти.

На рис 2 приведені приклади зміни топологій та кількості компонентів електромережі побудовані згідно запропонованих структурно-математичних положень інтерактивних матричних моделей руху даних (ІММРД) [7].



а) б) в)
 Рис. 2. ІММРД з відмовою джерела електроенергії (а), ліній електропередач (б), споживачів електроенергії (в).

Розраховані для приведених прикладів, динамічні оцінки емерджентності відповідних структур, дозволяють шляхом емуляції та комп'ютерного моделювання попередньо оцінити інформаційно-технологічну вразливість реально діючих структур високовольтних та низьковольтних електромереж. Оцінка ступеня їх деградації на основі відповідних модельних розрахунків емерджентності дозволяють розробити попереджувальні заходи, знешкодження окремих негативних впливів. При цьому, для структур класифікованих мереж енергопостачання досліджених в роботі [8], доцільно розробити найбільш оптимізовані динамічні удосконалення їх топологій з врахуванням енергетичного потенціалу генеруючих потужностей та споживання електроенергії. Наприклад у монопольній топології локальної мережі електропостачання, яка представлена на рис 3.

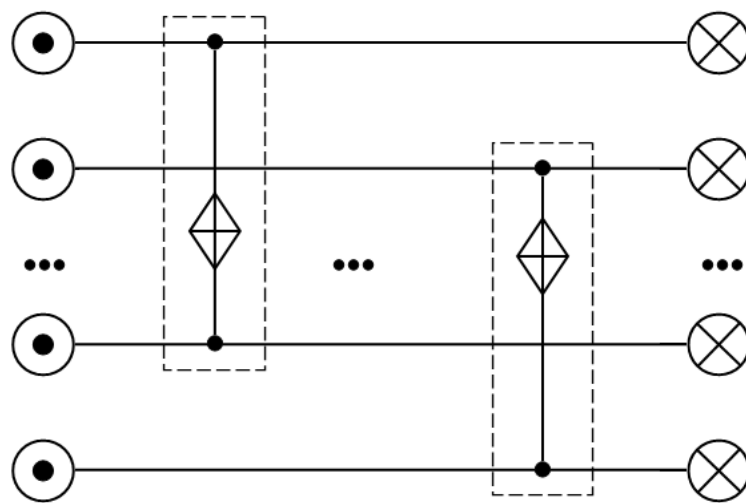


Рис. 3. Оптимізація топології монопольної архітектури електромережі з врахуванням резервних підстанцій.

Емерджентність такої вдосконаленої архітектури відповідно зростає згідно приведених результатів:

$$\text{а) } K_e = 9/6 = 1.5; \text{ б) } K_e = 18/10 = 1.8; \text{ в) } K_e = 22/10 = 2.2; \text{ г) } K_e = 18/9 = 2.$$

Для прикладу згідно формули (1) проведемо розрахунок імовірнісної емерджентності для топології мережі рис. 1(д) з врахуванням відмов електрогенеруючого компонента В та трьох споживачів електроенергії 1,6,5.

$$P_i = 14/18 = 0.7, P_j = 2/3 = 0.6, K_e = \frac{0.7 \cdot 18}{0.6 \cdot 3} = 7.$$

Застосування запропонованих теоретичних положень оцінки імовірнісної емерджентності та емуляція можливих випадків шляхом комп'ютерного моделювання дозволяє виявити найбільш вразливі ситуації при інтенсивних відмовах обладнання, а також розробити відповідні рекомендації по проектуванню та монтажу криптозахисених комутаційних компонентів та ліній зв'язку.

Висновки.

Викладені математичні положення розширення імовірнісної характеристики емерджентності при зміні топології мереж електропостачання в умовах інтенсивних відмов генеруючого лінійного та комутуючого обладнання. Це дозволяє, шляхом відповідної емуляції та комп'ютерного моделювання конкретних ситуаційних відмов, розробити рекомендації по максимальному підвищенню захищеності системи електропостачання, зниженню рівня її деградації а також проектування та монтажу інформаційно та матеріально криптозахисених компонентів.

Список бібліографічного опису

1. Carl Adam Petri. Nets, Time and Space. Theoretical Computer Science, 153 (12): 3-48, 1996.
2. Николайчук Я.М. Теорія моделей руху даних / Николайчук Я.М., Пітух І.Р., Возна Н.Я. – Тернопіль: "Терно-граф", 2008.-216с.
3. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем: Навчальний посібник / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух – Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф". 2010. – 392 с., іл..
4. Nykolaichuk Ya.M. Structuring the movement of data in computer systems / Ya.M. Nykolaichuk, N.Ya Vozna, I.R. Pitukh - Ternopil: Terno-graf, 2013.-284p.
5. Євтух П.С., Оробчук Б.Я., Рафалюк О.О. Автоматизована система диспетчерського керування електропостачанням районних електромереж / Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Електроенергетичні та електромеханічні системи. –2008. –№1. –С.190-194.
6. Пітух І.Р. Метод та критерії оцінки емерджентності та характеристик архітектур інтерактивних розподілених комп'ютерних та кіберфізичних систем / Пітух І.Р. // Науковий збірник «Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології», (33), 2021.- С. 115-121.
7. Теорія та методологія побудови інтерактивних матричних моделей руху даних / Возна Н.Я., Пітух І.Р.// Поступ в науку. Збірник наукових праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. –Бучач 2010 - №6 Т1.- С.61-66.
8. I. Pitukh Study of the characteristics of electricity transmission in high-voltage network architectures under the conditions of dynamic influences of external factors /
- I. Pitukh, A.Sydor, B Krulikovskiy // Computer-integrated technologies: education, science, production, (51), Lutsk Ukraine, 2023. – P.181-187.

References

1. Carl Adam Petri. Nets, Time and Space. Theoretical Computer Science, 153 (12): 3-48, 1996.
2. Nikolaychuk Y.M. Theory of data movement models / Nikolaychuk Y.M., Pitukh I.R., Vozna N.Ya. – Ternopil: "Terno-graf", 2008.-216p.
3. Nikolaychuk Y.M. Design of specialized computer systems: Study guide / Y.M. Nikolaychuk, N.Ya vozna, I.R. Pitukh - Ternopil: "Terno-graf" LLC. 2010. – 392 p., illustrations.
4. Nykolaichuk Ya.M. Structuring the movement of data in computer systems / Ya.M. Nykolaichuk, N.Ya Vozna, I.R. Pitukh - Ternopil: Terno-graf, 2013.-284p.
5. Yevtukh P.S., Orobchuk B.Ya., Rafaliuk O.O. Automated system of dispatching control of electricity supply of district power grids / Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Electric power and electromechanical systems. - 2008. - No. 1. - P. 190-194.
6. Pitukh I.R. Method and criteria for assessing the emergentness and characteristics of the architectures of interactive distributed computer and cyber-physical systems / I.R. Pitukh. // Scientific collection "Physico-mathematical modeling and information technologies", (33), 2021. - P. 115-121.
7. Theory and methodology of building interactive matrix models of data movement / Vozna N.Ya., Pitukh I.R.// Progress in science. Collection of scientific works of the Buchatsky Institute of Management and Audit. – Buchach 2010 - No. 6 T1.- P.61-66.
8. I. Pitukh Study of the characteristics of electricity transmission in high-voltage network architectures under the conditions of dynamic influences of external factors /
- I. Pitukh, A. Sydor, B Krulikovskiy // Computer-integrated technologies: education, science, production, (51), Lutsk Ukraine, 2023. – P.181-187