

УДК 621.311:681.5

**А.О. Стелюк**, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: astelyuk@ied.org.ua

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ «КРИТИЧНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ» З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПУ НАДІЙНОСТІ «N-1»

*Запропоновано метод ідентифікації «критичних» за навантаженістю ліній електропередачі (ЛЕП), який базується на використанні принципу надійності «N-1». Наведено класифікацію «впливових» елементів, відключення яких від мережі в ремонтно-аварійних схемах призводить до появи «критичних ЛЕП». Наведено результати моделювання післяаварійних усталених режимів у разі виникнення аварійних ситуацій стандартного типу на прикладі тестової схеми Інституту інженерів з електротехніки та електроніки ІЕЕЕ. Бібл. 7, рис. 3.*

**Ключові слова:** аварійна ситуація, принцип надійності «N-1», лінія електропередачі, навантаженість, післяаварійний режим, ідентифікація.

Одним з чинників, що визначає нормальні умови функціонування об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України, є забезпечення допустимих перетоків активної потужності внутрішніми та міждержавними лініями зв'язку. Так, у рамках аналізу статичної стійкості енергосистем, відповідно до положень нормативного документу [2], значення допустимого перетоку (максимально допустимого – для нормального і аварійно-допустимого – для вимушеного режимів) визначається відповідними коефіцієнтами запасу активної потужності в перетині. Розрахунок допустимого перетоку здійснюється шляхом обважнення перетину до границі стійкості. При цьому в процесі обважнення режиму в контрольованих вузлах енергосистеми також здійснюється контроль допустимих значень напруги. Зокрема, у вузлах навантаження допустимість режиму за напругою визначається коефіцієнтом запасу з напруги [2]. Для аналізу граничних режимів перетинів у практиці енергосистем європейських країн набув широкого поширення метод *PV*-кривих, який дає змогу виконувати аналіз рівнів напруги на визначених системах шин по відношенню до зростаючого перетоку активної потужності в перетині [4, 5]. З наведеного видно, що основна увага при дослідженні стійкості перетинів приділяється питанням підтримання допустимих рівнів напруги на системах шин підстанцій при збільшенні перетоку потужності за перетином. Одночасно аналіз роботи перетину в таких режимах обумовлює необхідність контролю навантаженості окремої лінії електропередачі (ЛЕП), яка входить до складу цього перетину. Відповідна ідентифікація таких ЛЕП дасть можливість попередити їх перевантаження, відключення під дією струмового захисту і, як наслідок, – подальше перевантаження інших ЛЕП перетину, що залишились у роботі. Таким чином, розробка методу ідентифікації «критичних» за навантаженістю ЛЕП для нормальної та ремонтно-аварійних схем роботи енергосистем набуває особливої актуальності.

Метою цієї роботи є розвиток відомого принципу надійності «N-1» та поширення його на задачу ідентифікації «критичних» за навантаженістю ЛЕП, формування чіткого критерію та класифікації таких ЛЕП, на яких спостерігається перевантаження.

Основні положення принципу надійності «N-1» детально наведено в роботі [1]. Зазначимо, що в подальшій роботі розглядаються аварійні ситуації (АС), які відповідають стандартному типу в класифікації [6, 7].

Базою для ідентифікації «критичних ЛЕП» є результати моделювання усталених післяаварійних режимів, що пов'язані з відмовою одного елемента: ЛЕП, трансформатора, генератора. Так, для кожного змодельованого режиму визначається навантаженість кожної ЛЕП і

порівнюється з допустимою величиною:  $loading_i = \frac{I_i}{I_{допi}} \cdot 100, \%$   $i=1, \dots, n$ , де  $loading$  – наван-

таженість  $i$ -ЛЕП;  $I_i$  – поточний струм  $i$ -ЛЕП;  $I_{\text{доп}i}$  – допустимий струм  $i$ -ЛЕП з урахуванням допустимих струмів окремих елементів: ошинування підстанцій, трансформаторів струму, високочастотних загороджувачів тощо.

При визначенні «критичних ЛЕП» може використовуватись допустиме значення завантаженості, що складає 100 %, або визначається з використанням методу експертних оцінок. Тоді критерієм віднесення ЛЕП до критичного за завантаженістю елемента, як зазначено вище, слід вважати перевищення її завантаженості допустимого значення в змодельованому післяаварійному режимі.

Для ідентифікації «критичних ЛЕП» введемо вектор-стовпець «впливових» елементів  $M_{\text{elem}}$ :

$$M_{\text{elem}} = \begin{bmatrix} elem_1 \\ elem_2 \\ \dots \\ elem_i \\ \dots \\ elem_n \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, n,$$

де  $elem_i$  –  $i$ -й елемент енергосистеми, відключення якого від мережі призводить до перевищення допустимої завантаженості ЛЕП;  $n$  – кількість таких «впливових» елементів.

Крім того, також сформуємо вектор-рядок «слабких» ЛЕП  $M_{\text{OHL}}$ :  $M_{\text{OHL}} = [OHL_1 \ OHL_2 \ \dots \ OHL_j \ \dots \ OHL_m]$ ,  $j = 1, \dots, m$ , де  $OHL_j$  –  $j$ -та ЛЕП, на якій спостерігається перевищення допустимої завантаженості при виникненні АС стандартного типу (відключенні одного елемента вектора-стовпця  $M_{\text{elem}}$ );  $m$  – кількість таких «слабких» ЛЕП.

Сформуємо матрицю завантаженості  $M_{\text{ldg}}$ , що зв'яже «слабкі» ЛЕП з «впливовими» елементами (небезпечними АС):

$$M_{\text{ldg}} = \begin{bmatrix} loading_{11} & loading_{12} & \dots & loading_{1j} & \dots & loading_{1m} \\ loading_{21} & loading_{22} & \dots & loading_{2j} & \dots & loading_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ loading_{i1} & loading_{i2} & \dots & loading_{ij} & \dots & loading_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ loading_{n1} & loading_{n2} & \dots & loading_{nj} & \dots & loading_{nm} \end{bmatrix},$$

де  $loading_{ij}$  – значення завантаженості ЛЕП  $OHL_j$  (вектор  $M_{\text{OHL}}$ ) при вимкненні елемента  $elem_i$  (вектор  $M_{\text{elem}}$ ). Тоді на базі  $M_{\text{elem}}$  та  $M_{\text{ldg}}$  можливо сформувати матрицю  $M_{\text{aff.elem}}$ , що характеризує «слабкі» елементи:

$$M_{\text{aff.elem}} = \begin{bmatrix} n_{\text{max}1} & loading_{\text{max}1} \\ n_{\text{max}2} & loading_{\text{max}2} \\ \dots & \dots \\ n_{\text{max}i} & loading_{\text{max}i} \\ \dots & \dots \\ n_{\text{max}n} & loading_{\text{max}n} \end{bmatrix},$$

де  $n_{\text{max}i}$  – кількість перевищень завантаженості ЛЕП допустимого значення при виникненні  $i$ -небезпечної АС (тобто при вимкненні елемента  $elem_i$  вектора  $M_{\text{elem}}$ ):

$$n_{\max i} = \sum_{j=1}^m P_{ij}, \quad P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } loading_{ij} \geq loading_{\text{доп}} \\ 0, & \text{якщо } loading_{ij} < loading_{\text{доп}} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m,$$

де  $loading_{\text{доп}}$  – допустима завантаженість.

Максимальне значення завантаженості, що спостерігається при виникненні  $i$ -небезпечної АС, визначається наступним чином:

$$loading_{\max i} = \max (loading_{ij}), \quad i = 1, \dots, n.$$

Аналогічно, але на базі  $M_{OHL}$  та  $M_{ldg}$ , побудуємо матрицю  $M_{\text{weak.OHL}}$ , що характеризує «слабкі» ЛЕП:

$$M_{\text{weak.OHL}} = \begin{bmatrix} n_{OHL.\max 1} & n_{OHL.\max 2} & \dots & n_{OHL.\max j} & \dots & n_{OHL.\max m} \\ loading_{\max 1} & loading_{\max 2} & \dots & loading_{\max j} & \dots & loading_{\max m} \end{bmatrix},$$

де  $n_{OHL.\max j}$  – кількість перевищень допустимої завантаженості для  $j$ -ЛЕП при виникненні всіх небезпечних АС (тобто при вимкненні кожного елемента вектора  $M_{elem}$ ):

$$n_{OHL.\max j} = \sum_{i=1}^n P_{ij}, \quad P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } loading_{ij} \geq loading_{\text{доп}} \\ 0, & \text{якщо } loading_{ij} < loading_{\text{доп}} \end{cases}, \quad j = 1, \dots, m; \quad i = 1, \dots, n$$

Максимальне значення завантаженості для  $j$ -ЛЕП при виникненні всіх небезпечних АС визначається як  $loading_{OHL.\max j} = \max (loading_{ij}), \quad j = 1, \dots, m.$

Матриця  $M_{\text{weak.OHL}}$ , по суті, визначає два класи «слабких» ЛЕП: «слабкі» ЛЕП за максимальним значенням завантаженості в одному найбільш важкому післяаварійному режимі:  $loading_{OHL.\max j}$ ; «слабкі» ЛЕП за частотою перевищення допустимого значення завантаженості для всіх післяаварійних режимів:  $n_{OHL.\max j}$ .

У той же час матриця  $M_{\text{aff.elem}}$  визначає клас «впливових» елементів, вимкнення яких призводить до найбільшої кількості перевищення  $n_{\max i}$  завантаженості ЛЕП в енергосистемі.

Таким чином, визначення «критичних ЛЕП» для будь-якої енергосистеми, що отримана з використанням принципу надійності «N-1», можливо компактно представити композицією трьох матриць:  $M_{OHL}$ ,  $M_{\text{aff.elem}}$  та  $M_{\text{weak.OHL}}$ . У свою чергу це дає змогу провести класифікацію критичних ЛЕП за такими чинниками (рис. 1).

Реалізація запропонованого

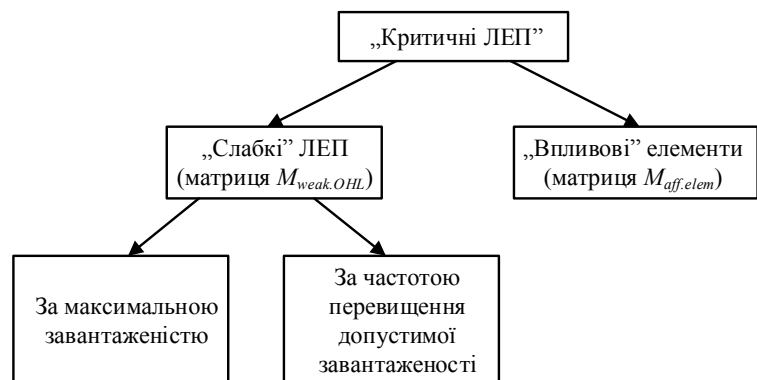


Рис. 1

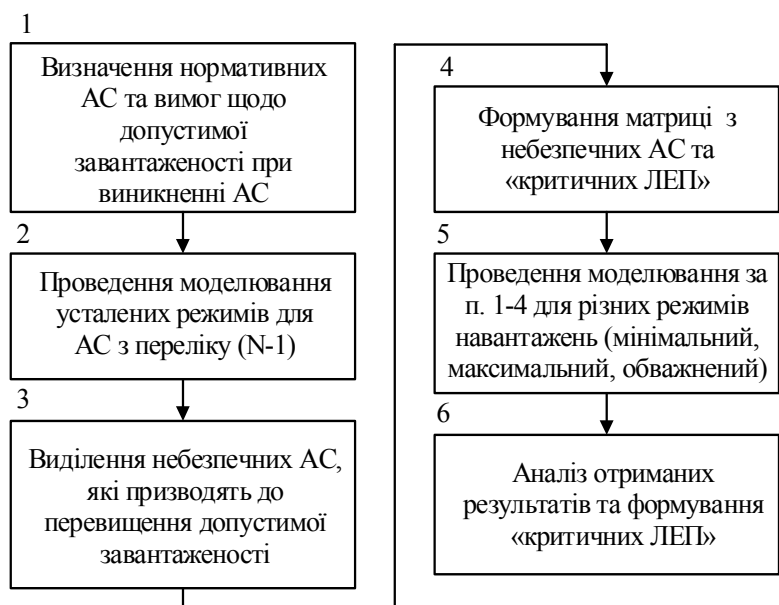


Рис. 2

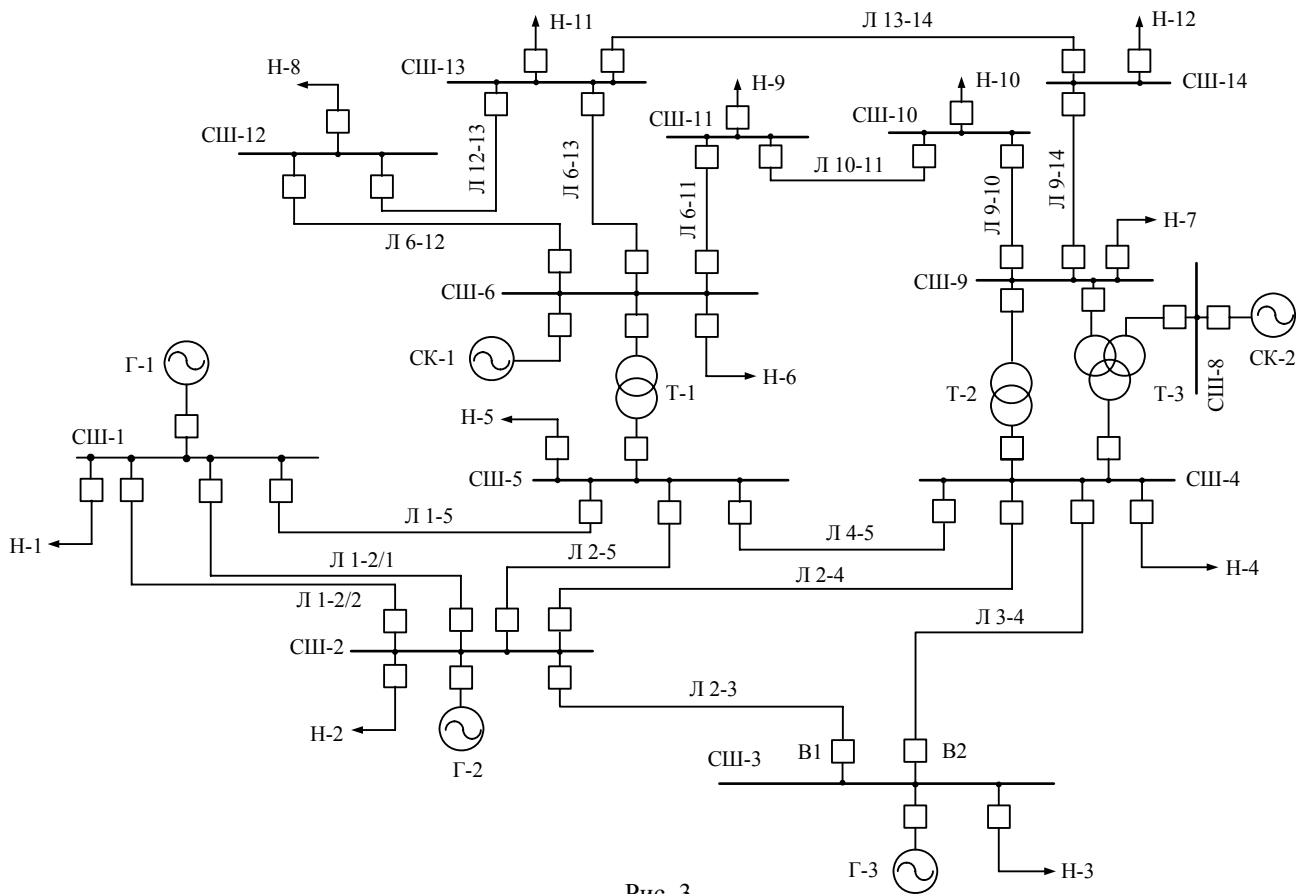


Рис. 3

матричного підходу до ідентифікації «критичних ЛЕП» представлена у формі блок-схеми алгоритму (рис. 2).

Проілюструємо використання запропонованого підходу на прикладі тестової схеми Інституту інженерів з електротехніки та електроніки ІЕЕЕ, структурна схема якої представлена на рис. 3.

Моделювання режимів роботи енергосистеми, що розглядається, виконано з використанням сучасного європейського програмного забезпечення для аналізу та розрахунків режимів роботи енергосистем [3]. Моделювання післяаварійних УР виконано для випадків відключення синхронних генераторів, трансформаторів та ЛЕП (рис. 3), при цьому значення допустимої завантаженості ЛЕП  $loading_{доп}$ , за перевищення якої ЛЕП відносяться до «критичних», прийнято рівним 100 %.

Вектор-стовпець небезпечних елементів  $M_{elem}$ :  $M_{elem} =$

|         |
|---------|
| Л 1-2/1 |
| Л 1-2/2 |
| Л 6-12  |
| Т-1     |

Вектор-рядок «критичних ЛЕП»  $M_{OHL}$ :  $M_{OHL} =$

|         |         |        |        |       |
|---------|---------|--------|--------|-------|
| Л 1-2/1 | Л 1-2/2 | Л 6-13 | Л 9-10 | Л 1-5 |
|---------|---------|--------|--------|-------|

Матриця завантаженості  $M_{ldg}$ :  $M_{ldg} =$

|       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 154,1 |       |       | 104,9 |
| 154,4 |       |       |       |       |
|       |       | 129,4 |       |       |
|       |       |       | 113,6 |       |

У результаті оброблення матриці  $M_{OHL}$  сформована матриця «впливових елементів»  $M_{aff.elem}$ :  $M_{weak.elem} =$

|   |       |
|---|-------|
| 2 | 154,1 |
| 1 | 154,4 |
| 1 | 129,4 |
| 1 | 113,6 |

та «слабких ЛЕП»  $M_{weak.OHL}$ :

$$M_{weak.OHL} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline 154,4 & 151,1 & 129,4 & 113,6 & 104,9 \\ \hline \end{array}$$

З наведених результатів досліджень видно, що найбільш «впливовим елементом» в енергосистемі (рис. 3) є повітряна лінія Л 1-2/1, при відключенні якої спостерігаються два випадки перевищення допустимої завантаженості ЛЕП Л 1-2/1 та Л 1-5. У той же час у результаті аналізу отриманої матриці  $M_{weak.OHL}$  видно, що для всіх ЛЕП, які розглядаються, спостерігається по одному випадку перевищення допустимої завантаженості.

Необхідно зазначити, що використання запропонованого підходу для виконання аналізу «N-1» в масштабах ОЕС України потребує певної модифікації розрахункової моделі. Зокрема, при вимкненні ЛЕП 750 кВ необхідно передбачити одночасне вимкнення шунтувальних реакторів по її кінцях, а також представити («розгорнути») еквівалентну схему з більшим рівнем деталізації.

Таким чином, у роботі набув подальшого розвитку принцип надійності «N-1», який поширено на задачу ідентифікації «критичних ЛЕП». Запропоновано класифікацію та розроблено і апробовано алгоритм ідентифікації «критичних ЛЕП» за допустимою завантаженістю. Сформований підхід дає можливість автоматизувати моделювання аварійних режимів роботи енергосистем та аналіз «критичних ЛЕП» в ОЕС України.

1. Стелюк А.О., Зайченко В.Б., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Макогончук В.С. Ідентифікація та класифікація «критичних місць за напругою» в енергосистемах на базі моделювання режимів за принципом «N-1» // Енергетика та електрифікація. – 2010. – № 6. – С. 10-13.
2. СОУ-Н МЕРВ 40.1.00100227-68:2012 Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки, 2012. – 29 с.
3. DigSILENT PowerFactory Technical Manual, <http://www.digsilent.de>.
4. Kundur P. Power system stability and control – McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
5. Machowski J., Bialek J.W., Bumby J.R. Power system dynamics: Stability and control. Second ed. 2008: John Wiley & Sons, Ltd. – 630 p.
6. UCTE OH – Appendix 3: Operational Security - Final Version (approved by SC on 19 March 2009). – 41 p.
7. UCTE OH – Policy 3: Operational Security - Final Version (approved by SC on 19 March 2009). – 21 p.

УДК 621.311:681.5

А.О. Стелюк, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Идентификация и классификация «критических линий электропередачи» с использованием принципа надежности «N-1»**

*Предложен метод идентификации «критических» по загруженности линий электропередачи (ЛЭП), базирующийся на использовании принципа надежности «N-1». Приведена классификация «влияющих элементов», отключение которых от сети в ремонтно-аварийных схемах приводит к появлению «критических ЛЭП». Приведены результаты моделирования послеаварийных установившихся режимов в случае возникновения аварийных ситуаций стандартного типа на примере тестовой схемы Института инженеров электротехники и электроники IEEE. Библ. 7, рис. 3.*

**Ключевые слова:** аварийная ситуация, принцип надежности «N-1», линия электропередачи, загруженность, послеаварийный режим, идентификация.

A.O. Stelyuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine

**Identification and classification of weak overhead lines by using “N-1 security principle”**

*The paper presents an identification method of the most overloaded overhead lines (OHL) based on “N-1 principle”. The classification of the elements influencing OHL loading in post-fault power system operation has been proposed. The simulation results of the post-fault load flow considering different contingencies of the standard type on example of IEEE test model are shown. References 7, figures 3.*

**Key words:** contingency, “N-1 principle”, overhead line, post-fault, identification.

Надійшла 15.06.2015

Received 15.06.2015