

автомобильных аккумуляторов. МПК С22В 7/00 [Текст] / Кореляков А. В., Еникеев С. С., Худяков А. Я., Захаров В. В., Кокорин В. А., Кокорин И. А., Фролов Ю. И., Копач В. Г.; заявитель и патентообладатель ОАО «Тюменский аккумуляторный завод». – № 2011118181/02; заявл. 05.05.2011; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. – 7 с.

9. Морачевский, А. Г. Переработка вторичного свинцового сырья [Текст] / А. Г. Морачевский, З. И. Вайсгант, А. И. Демидов. – СПб.: Химия, 1993. – 176 с.

10. Ашин, А. К. Восстановление двуокиси свинца углеродом [Текст] / А. К. Ашин, С. Т. Ростовцев, О. Л. Костелов // Известия АН СССР. Металлы. – 1971. – № 1. – С. 23–26.

11. Морачевский, А. Г. Физико-химия рециклинга свинца [Текст] / А. Г. Морачевский. – СПб.: Политехн. ун-т, 2009. – 270 с.

12. Байков, А. А. Восстановление и окисление металлов [Текст] / А. А. Байков // Металлург. – 1926. – № 3. – С. 5–24.

References

1. Svinets i tsink. Available at: <http://helpiks.org/1-78909.html>

2. Natarov, A. G. Vtoroe rozhdenie svintsya. Mir – problemy i tendencii. Available at: <http://www.mineral.ru/Analytics/worldtrend/122/175/index.html>

3. Guberman, D. E. (2012). Lead. 2010 Minerals Yearbook Lead, 19. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/myb1-2010-lead.pdf>

4. Guberman, D. E. (2015). Lead. 2013 Minerals Yearbook Lead, 17. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/myb1-2013-lead.pdf>

5. Morachevskiy, A. G. (1997). Novyie napravleniya v tehnologii pererabotki loma svintsovyih akkumulyatorov. Zhurnal prikladnoj Himii, 70 (1), 3–15.

6. Leshova, A. V., Spiridonov, B. A., Nebolsin, V. A., Vorobev, A. Yu., Gorshunova, V. P. (2012). Izvlechenie svintsya i ego soedineniy iz loma akkumulyatornyh batarey metodom desulfatatsii kausticheskoy sodoy. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, 8 (7-2), 29–31.

7. Strunnikov, S. G., Khan, O. A., Kulenova, N. A., Strunnikova, N. A., Utesheva, O. A. (2006). Regeneration of Lead from Sewage Slimes of Accumulator Factories. Chemistry for Sustainable Development 14, 389–394.

8. Korelyakov, A. V., Enikeev, S. S., Hudyakov, A. Ya., Zaharov, V. V., Kokorin, V. A., Kokorin, I. A., Frolov, Yu. I., Kopach, V. G. (2013). Pat. RU 2499062. Sposob pere-rabotki svintssoderzhaschih produktov, poluchaemyih iz loma otrabotannyih av-tomobilnyih akkumulyatorov. MПК С22В 7/00. № 2011118181/02; declared: 05.05.2011; published 20.11.13, Byul. № 32, 7.

9. Morachevskiy, A. G., Vaysgant, Z. I., Demidov, A. I. (1993). Pererabotka vtorichnogo svintsovogo syr'ya. Saint Petersburg: Himiya, 176.

10. Ashin, A. K., Rostovtsev, S. T., Kostelov, O. L. (1971). Vosstanovlenie dvookisi svintsya uglerodom. Izvestija AN SSSR. Metally, 1, 23–26.

11. Morachevskiy, A. G. (2009). Fiziko-himiya retsi-klinga svintsya. Saint Petersburg: Politehn. un-t, 270.

12. Baykov, A. A. (1926). Vosstanovlenie i okislenie metallov. Metallurg, 3, 5–24.

Дата надходження рукопису 24.10.2016

Кушнеров Віктор Юрійович, аспірант, кафедра металургії, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006

Червоний Іван Федорович, доктор технічних наук, професор, кафедра електрометалургії, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, Україна, 49600
E-mail: rot44@yandex.ru

Kushnerov Viktor, Postgraduate student, Department of metallurgy, Zaporizhzhya state engineering academy, Soborny ave., 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006

Chervony Ivan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of electrometallurgy, National metallurgical academy of Ukraine, Gagarina ave., 4, Dnepr, Ukraine, 49600
E-mail: rot44@yandex.ru

УДК 621.311

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.86228

РОЗРОБЛЕННЯ ІМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ВИЗНАЧЕННЯ СЛАБКІХ ПІДСИСТЕМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

© М. В. Костерев, В. В. Літвінов

DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC-SATISTICAL APPROACH TO THE IDENTIFICATION OF WEAK SUBSYSTEMS OF THE POWER SYSEYM

© M. Kosterev, V. Litvinov

Розроблено підхід до визначення слабких елементів електроенергетичної системи в умовах великої кількості невизначеностей. Основною невизначеністю є відсутність аналітичних зв'язків між критеріями слабкості, що вимагає застосування нечітких методів та алгоритмів. Обґрунтовано критерій слабкості елементів енергосистеми. Розроблено алгоритм оцінювання ризику виникнення аварійної ситуації в енергосистемі на інтервалі часу та визначення її слабких підсистем за допомогою нечіткої кластеризації

Ключові слова: електроенергетична система, слабкий елемент, критерій слабкості, імовірнісно-статистичне моделювання, кластеризація

The approach to identification of the weak elements of power system in a lot of uncertainties conditions was developed. Main uncertainty is the lack of analytical dependences among the weak criteria that requires to use fuzzy methods and algorithms. The weakness criteria of power system elements were justified. The algorithm of accident risk estimation in power system at the time interval and identification of weak subsystems with fuzzy clusterization using was developed

Keywords: power system, weak element, weakness criterion, fuzzy-statistical modeling, clusterization

1. Вступ

В останні роки умови функціонування об'єднаної електроенергетичної системи (ЕЕС) України та регіональних ЕЕС значно погіршилися через наявність наступних факторів:

– темпи старіння силового та комутаційного обладнання ЕЕС випереджають темпи його заміни, реконструкції та модернізації;

– зниження генерації теплових електростанцій та споживання промислового комплексу Дніпровського регіону, від'єднання Кримської ЕЕС спричинили перерозподіл перетоків потужності в перетинах ЕЕС України, що обтяжило її електричні режими;

– внаслідок обтяження електричних режимів більшу небезпеку стали становити наявні «вузькі місця» в мережах ЕЕС України (ЛЕП з низькою пропускну здатністю, підстанції з недостатньою кількістю автотрансформаторів, тощо);

– зростання кількості аварійних ситуацій через старіння обладнання та обтяження електричних режимів.

Таким чином, можна зробити висновок, що в ЕЕС України гостро постає проблема підвищення її надійності в нових умовах функціонування.

2. Аналіз досліджень і публікацій

Комплексне вирішення цієї проблеми полягає в систематичній заміні (модернізації) всього парку силового та комутаційного обладнання та будівництві нових ЛЕП і підстанцій з урахуванням режимних вимог мережі. Такий підхід на сьогоднішній день є неможливим через обмеженість фінансування, що виділяється на реконструкцію та розвиток електричних мереж [1]. В [2, 3] розв'язано задачу розподілу обмежених ресурсів у розподільчих системах без урахування систем генерації та передачі електроенергії. В [4] автором розглядається оптимізація розподілу генерації в ЕЕС при заміні найбільш слабких з точки зору надійності її елементів. При цьому методи визначення слабких об'єктів мережі з розподіленою генерацією не розглядаються. В статті [5] управління наявними ресурсами розглянуто більш детально, але питання визначення найбільш ненадійних елементів мережі, які потребують найбільших капіталовкладень, не досліджені. Таким чином, можна зробити висновок, що питання визначення слабких елементів та підсистем ЕЕС є недостатньо розглянутими.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є вирішення задачі визначення слабких елементів або підсистем ЕЕС в умовах неповноти інформації про взаємозв'язки критеріїв слабкості.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

1. Визначено критерії слабкості елементів та підсистем ЕЕС;

2. Розроблено підхід до визначення слабких елементів або підсистем ЕЕС в умовах відсутності аналітичних зв'язків між критеріями слабкості.

4. Розроблення підходу до визначення слабких підсистем електроенергетичної системи

Для вирішення поставлених вище задач та максимально ефективного розподілу наявних коштів необхідно виконувати заміну та модернізацію найбільш слабких підсистем ЕЕС. Критеріями слабкості підсистеми ЕЕС є:

1) висока імовірність виникнення аварійної ситуації в ЕЕС через відмову обладнання розглядуваної підсистеми, яке має поганий технічний стан та високу імовірність відмови;

2) висока імовірність виникнення аварійної ситуації в ЕЕС через наявність обтяженого електричного режиму.

Є два підходи до визначення імовірності виникнення аварійної ситуації та ризику: детермінований та імовірнісно-статистичний. Існуюча практика визначення аварійної ситуації в ЕЕС базується на завданні фіксованого збурення та фіксованого навантаження у вузлах з наступним визначенням факту виникнення або не виникнення аварії, тобто застосовується детермінований підхід. Цей підхід, за якого імовірність виникнення події приймається рівною або 0 або 1 є простішим, але він має ряд суттєвих недоліків, які роблять його використання малоефективним [6], а саме:

– не враховує ефект імовірності відмови обладнання;

– не визначає події та умови відмов.

Альтернативою детермінованому підходу до оцінки ризику аварії в ЕЕС є імовірнісно-статистичний підхід, який поєднує у собі імовірнісні методи та статистичні дані щодо експлуатації обладнання. Результатом імовірнісно-статистичного моделювання ЕЕС є імовірність виникнення аварійної ситуації в ній на інтервалі часу Δt при випадкових відмовах електрообладнання, та випадкових електричних режимах для виявлення яких організовано обчислювальний процес з використанням методу Монте-Карло [7].

Таким чином, імовірнісно-статистичний підхід дає можливість більш достовірного прогнозування стану ЕЕС як з точки зору режимів, так і стану обладнання.

На підставі отриманих за результатами імовірнісно-статистичного моделювання прогностичних оцінок стану ЕЕС необхідно визначити її слабкі підсистеми (групи елементів), які потребують першоче-

ргової заміни або модернізації. Ця задача є складною через різноманітність критеріїв оцінювання слабкості (електричний режим та технічний стан) та необхідність виділення найбільш слабких та пов'язаних електрично елементів ЕЕС в підсистемі. Таким чином, задача визначення груп слабких елементів для найбільш ефективної їхньої заміни містить велику кількість невизначеностей, що ускладнює її вирішення як задачі детермінованої класифікації. В таких умовах найбільш умісним підходом до визначення груп слабких елементів ЕЕС є нечітка кластеризація.

Кластеризація – це об'єднання об'єктів в групи (кластери) на основі схожості ознак для об'єктів однієї групи і відмінностей між групами [8]. Більшість алгоритмів кластеризації не спираються на традиційні для статистичних методів допущення – вони можуть використовуватися в умовах майже повної відсутності інформації про закони розподілу даних. Кластеризації проводять для об'єктів з кількісними (числовими), якісними або змішаними ознаками. Існує ряд методів кластеризації, які поділяються на чіткі та нечіткі [8]. Чіткі методи кластеризації розбивають множину об'єктів M на декілька множин, що не перетинаються. При цьому будь-який об'єкт з M належить тільки до одного з n кластерів. Нечіткі методи кластеризації дозволяють одному й тому самому об'єкту одночасно належати декільком кластерам з певною ступеню приналежності. Для задачі визначення слабких підсистем ЕЕС ця кластеризація є більш природною, оскільки дозволяє врахувати невизначеності при оцінюванні стану об'єктів та режиму ЕЕС.

Нижче приведено алгоритм оцінювання ризику виникнення аварійної ситуації в ЕЕС на інтервалі часу та визначення слабких підсистем цієї ЕЕС за допомогою нечіткої кластеризації.

1) Формується множина A аварійних ситуацій, які можуть виникнути в розглядуваній ЕЕС.

2) З множини елементів ЕЕС N виділяється підмножина елементів N_1 , відмови яких призводять до виникнення події з множини A .

3) Визначається множина значень загальних ТС об'єктів S_1 з підмножини N_1 за допомогою нечітких моделей оцінки стану обладнання.

4) За відомими інтегральними функціями розподілу імовірності відмови обладнання відповідного типу $F(t)$, визначаються імовірності відмови елементів з підмножини N_1 на момент часу t_1 за виразом:

$$p_i(H_1) = \frac{F_i(t_2) - F_i(t_1)}{1 - F_i(t_1)}, \quad i = 1, \dots, n_1 \quad (1)$$

імовірності безвідмовної роботи цих елементів визначаються за виразом:

$$p_i(H_2) = 1 - p_i(H_1), \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (2)$$

5) За допомогою матриць нечітких співвідношень між ТС об'єктів \bar{S}_i та умовними імовірностями

їхньої відмови R_p та безвідмовної роботи R_Q шляхом виконання максиміальної композиції нечіткого виводу Заде [9] визначаються умовні імовірності $p_i(B/H_1)$ та $p_i(B/H_2)$, $i = 1, \dots, n_1$.

6) За теоремою Байєса [10] визначається множина імовірностей відмов окремих одиниць електрообладнання на інтервалі часу Δt з урахуванням їхніх фактичних ТС:

$$p_i(H_1/B) = \frac{p_i(H_1) \cdot p_i(B/H_1)}{p_i(H_1) \cdot p_i(B/H_1) + p_i(H_2) \cdot p_i(B/H_2)}, \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (3)$$

7) Виконується уточнення інтегральних функцій розподілу імовірності відмови для кожної одиниці обладнання з підмножини N_1 : $F_{y_i}(t) = \{F_i(t); p_i(\Delta t)\}$, $i = 1, \dots, n_1$ на інтервалі часу Δt з урахуванням індивідуальних характеристик:

$$F_{y_i}(t_2) = F_i(t_1) + p_i(\Delta t), \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (4)$$

8) Для кожної одиниці обладнання з підмножини N_1 за допомогою ГВЧ визначається значення функції $F(t)$ на момент відмови на інтервалі $[0;1]$:

$$D_i = F_i(t_{відм}) = \text{Random}[0;1], \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (5)$$

9) З підмножини N_1 виділяється підмножина об'єктів N_2 , які відмовлять на інтервалі часу Δt :

$$F_i(t_{відм}) \in [F_{y_i}(t_1); F_{y_i}(t_2)], \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (6)$$

10) З підмножини N_2 обирається елемент, який, з урахуванням власних індивідуальних характеристик, відмовить першим на інтервалі $[t_1; t_2]$:

$$t_{відм} = \min\{F_i^{-1}(D)\}, \quad i = 1, \dots, n_1. \quad (7)$$

11) З відомого зі статистичних даних розподілу значень напруги у вузлі приєднання розглядуваної ЕЕС до інших ЕЕС та розподілів значень генерації та навантаження у вузлах ЕЕС за допомогою ГВЧ визначається режим ЕЕС в момент виникнення відмови елементу:

$$p(U) = \text{Random}[0;1] \rightarrow U; \quad (8)$$

$$p(P_i) = \text{Random}[0;1] \rightarrow P_i; \quad i = 1, \dots, b; \quad (9)$$

$$p(Q_i) = \text{Random}[0;1] \rightarrow Q_i; \quad i = 1, \dots, b; \quad (10)$$

де b – кількість вузлів в ЕЕС.

12) Розраховуються перехідний та усталений режими ЕЕС за визначених умов та визначається на-

стання (або ненастання) події з множини A (аварійна ситуація).

13) Пункти 8–12 алгоритму реалізуються k разів. У випадку коли $N_2 \in \emptyset$ (жоден елемент не відмовив на інтервалі часу $[t_1; t_2]$), пункти 10, 11 алгоритму та пункт 12 в частині розрахунку перехідного режиму не виконуються.

14) З отриманої множини K режимів ЕЕС виділяється підмножина режимів K_1 , у яких спостерігалась подія з множини A .

15) На підмножині K_1 виділяються: підмножина K_{11} , що містить режими у яких відбулась аварія через відмову елементу ЕЕС та підмножина K_{12} , що містить режими, у яких відбулась аварія через перевантаження елементів ЕЕС.

16) Визначаються локальні імовірності виникнення аварії в ЕЕС через відмови елементів з підмножини K_{11} та перевантаження елементів з множини K_{12} :

$$p_{i1} = \frac{k_{i1}}{k}, \quad i = 1, \dots, n_1, \quad (11)$$

$$p_{i2} = \frac{k_{i2}}{k}, \quad i = 1, \dots, n_1, \quad (12)$$

де k_{i1} – кількість аварійних ситуацій через відмову i -того елементу, k_{i2} – кількість аварійних ситуацій через перевантаження i -того елементу, k – загальна кількість реалізованих за допомогою імовірнісно-статистичного моделювання режимів, n – кількість елементів з підмножини N_1 .

17) З отриманих величин формується матриця об'єктів кластеризації X :

$$X = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ \dots & \dots \\ p_{i1} & p_{i2} \\ \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

18) Визначаються нечіткі кластери

$$C = \{c_1 \dots c_i \dots c_m\},$$

де m – кількість кластерів, експоненційна вага кластерів w , та точність кластеризації ε .

19) За допомогою ГВЧ генерується матриця нечіткого розбиття F :

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1c} \\ \dots & f_{ki} & \dots \\ f_{n1} & \dots & f_{nc} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

яка задовольняє наступним умовам:

$$\sum_{i=1}^c f_{ki} = 1, \quad k = 1, \dots, n, \quad (15)$$

$$f_{ki} > 0, \quad \forall k = 1, \dots, n; \quad i = 1, \dots, c. \quad (16)$$

20) Розраховуються центри кластерів:

$$V_{ki} = \frac{\sum_{k=1}^n (f_{ki})^m \cdot X_k}{\sum_{k=1}^n (f_{ki})^m}, \quad i = 1, \dots, c. \quad (17)$$

21) Розраховується відстань між об'єктами кластеризації X та центрами кластерів:

$$D_{ki} = \sqrt{(X_k - V_i)^2}, \quad k = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, c. \quad (18)$$

22) Перераховуються елементи матриці (14):

$$f_{ki} = \frac{1}{\left(D_{ik}^2 \sum_{j=1}^c \frac{1}{D_{jk}^2} \right)^{\frac{1}{m-1}}}; \quad j = 1, \dots, c. \quad (19)$$

23) Перевіряється умова точності кластеризації:

$$\|F - F^*\| < \varepsilon, \quad (20)$$

де F^* – матриця нечіткого розбиття попередньої ітерації алгоритму. Якщо умова виконується – перехід до наступного пункту; якщо ні – повернення до пункту 20.

24) За отриману матрицю нечіткого розбиття F визначається приналежність об'єкту до одного з кластерів C за наступною умовою:

$$n_k \in c_i \langle \max\{f_{ki}\} \rangle, \quad i = 1, \dots, c, \quad k = 1, \dots, n. \quad (21)$$

25) З урахуванням визначеного розподілу елементів ЕЕС по кластерам C приймається рішення щодо заміни або модернізації елементів, що потрапили до найслабших кластерів.

Приклад. В ЕЕС, схему якої представлено на рис.1, необхідно визначити найбільш слабкі елементи обладнання, відмова яких призводить до виникнення аварійних ситуацій. Режимні параметри тестової схеми змінюються в таких діапазонах:

1. Напруга у вузлі №101 змінюється в діапазоні $[0,95; 1,05] U_{ном}$.

2. Потужності у вузлах навантаження змінюються в наступних діапазонах:

– № 4 P [860;1060] МВт, Q [450;550] МВАр;

– № 6: P [540;660] МВт, Q [180;220] МВАр;

– № 100: P [585;715] МВт, Q [380;470] МВАр;

– № 202: P [900;1100] МВт, Q [580;720] МВАр.

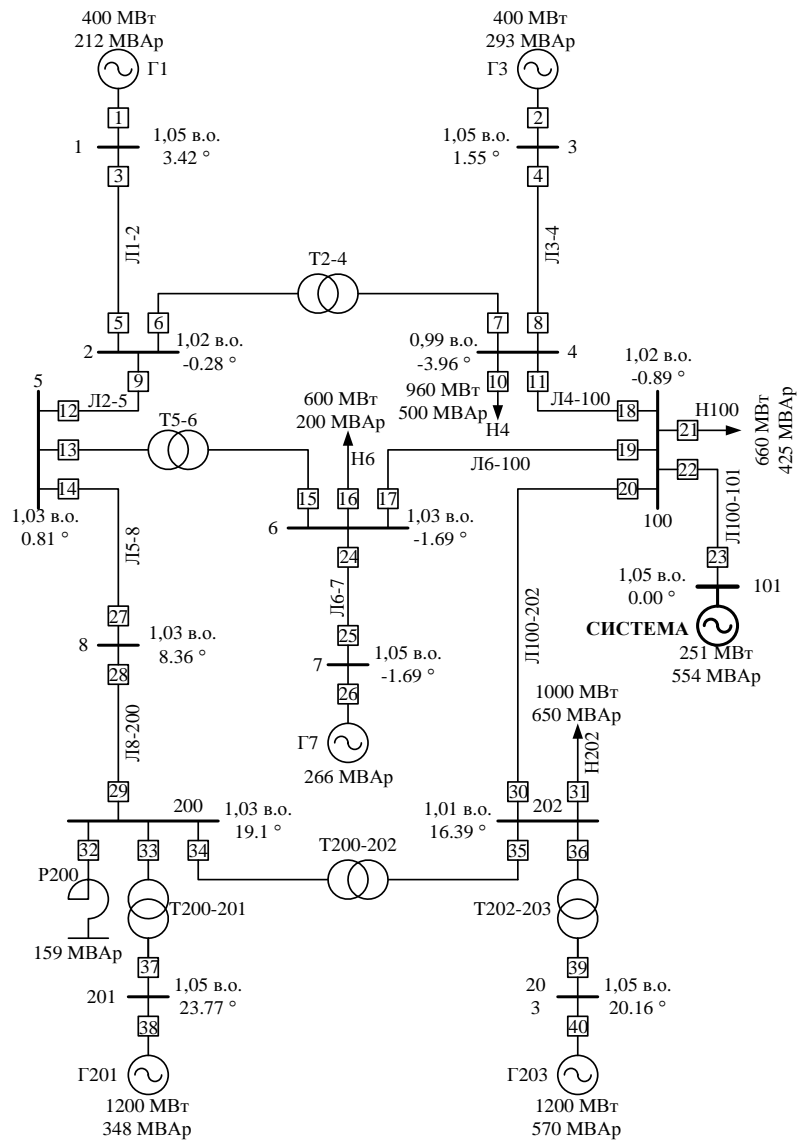


Рис. 1. 14-вузлова тестова схема ЕЕС

Активні потужності у вузлах генерації приймаються незмінними і дорівнюють:

- № 1: $P=400$ МВт;
- № 3: $P=400$ МВт;
- № 7: $P=0$ МВт (синхронний компенсатор);
- № 201: $P=1200$ МВт;
- № 203: $P=1200$ МВт.

Множина аварійних ситуацій A складається з двох елементів:

- A_1 – порушення статичної стійкості;
- A_2 – порушення динамічної стійкості.

Визначено підмножину N_1 елементів відмови яких призводять до події з множини A :

- лінія Л5-8;
- лінія Л8-200;
- лінія Л100-202;
- трансформатор Т200-201;
- трансформатор Т200-202.

Для елементів з підмножини N_1 визначається їхній технічний стан та імовірності відмови на інтервалі часу $\Delta t=3$ міс.

Результати приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Імовірності відмов обладнання ЕЕС

| Елемент | S | $F(t_1)$ | $F(t_2)$ | $p(H_1)$ | $p(H_2)$ | $p(B/H_1)$ | $p(B/H_2)$ | $p(H_1/B)$ | $F'(t_2)$ |
|----------|-------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|--------------|-----------|
| Л100-202 | 0,423 | 0 | 0,051 | 0,051 | 0,949 | 0,579 | 0,403 | 0,072 | 0,072 |
| Л5-8 | 0,499 | 0 | 0,056 | 0,056 | 0,944 | 0,500 | 0,493 | 0,057 | 0,057 |
| Л8-200 | 0,429 | 0 | 0,076 | 0,076 | 0,924 | 0,609 | 0,408 | 0,109 | 0,109 |
| Т200-202 | 0,312 | 0,461 | 0,463 | 0,004 | 0,996 | 0,726 | 0,279 | 0,010 | 0,471 |
| Т200-201 | 0,246 | 0,502 | 0,507 | 0,010 | 0,990 | 0,727 | 0,227 | 0,031 | 0,533 |

Виконано імовірісно-статистичне моделювання тестової схеми ЕЕС. Множина K складає 100 елементів. За виразами (12), (13) визначаються локальні імовірності виникнення аварії в ЕЕС через відмови елементів з підмножин K_{11} та K_{12} . З отриманих імовірностей формується матриця ознак об'єкту X :

$$X = \begin{bmatrix} 0,06 & 0,1 \\ 0,07 & 0,1 \\ 0,02 & 0,05 \\ 0,01 & 0,01 \\ 0,01 & 0,13 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Визначаються нечіткі кластери. Виходячи з завдання визначення найбільш слабких елементів ЕЕС доцільно прийняти $m = 3$. Назви кластерів наступні: c_1 = «Слабкий»; c_2 = «Середній»; c_3 = «Сильний». Згідно з рекомендаціями [8] експоненційна вага приймається рівною $w = 2$, а точність кластеризації $\varepsilon = 10^{-3}$. За допомогою ГВЧ генерується початкова матриця нечіткого розбиття F :

$$F = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,4 & 0,4 \\ 0,8 & 0,1 & 0,1 \\ 0,3 & 0,4 & 0,3 \\ 0,3 & 0,5 & 0,2 \\ 0,1 & 0,7 & 0,2 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

За (18) розраховуються центри кластерів. На першому кроці вони складають:

$$V_{c1} = 0,0717; V_{c2} = 0,0524; V_{c3} = 0,0588. \quad (24)$$

За (19) розраховуються відстані між об'єктами кластеризації X та центрами кластерів. На першому кроці вони дорівнюють:

$$D = \begin{bmatrix} 0,031 & 0,048 & 0,041 \\ 0,028 & 0,051 & 0,042 \\ 0,056 & 0,032 & 0,04 \\ 0,087 & 0,06 & 0,069 \\ 0,085 & 0,088 & 0,086 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Перераховуються елементи матриці нечіткого розбиття F . На першому кроці результат перерахунку має вигляд:

$$F^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,511 & 0,206 & 0,283 \\ 0,57 & 0,178 & 0,252 \\ 0,168 & 0,5 & 0,332 \\ 0,212 & 0,449 & 0,339 \\ 0,346 & 0,319 & 0,335 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Перевіряється умова точності кластеризації за виразом (21):

$$\|F - F^*\| = 0,5121 > \varepsilon. \quad (27)$$

Умова не виконується, тому, згідно до алгоритму, продовжується пошук центрів кластерів та визначення матриці нечіткого розбиття яка забезпечить виконання умови точності кластеризації. Після 10 кроків визначено наступну матрицю нечіткого розбиття:

$$F^{(10)} = \begin{bmatrix} 0,577 & 0,049 & 0,374 \\ 0,693 & 0,031 & 0,276 \\ 0,143 & 0,709 & 0,148 \\ 0,024 & 0,025 & 0,951 \\ 0,483 & 0,234 & 0,283 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

при цьому умова точності виконується: $0,000287 < \varepsilon$. Оскільки перший стовпчик матриці $F^{(10)}$ визначає ступінь приналежності елементу ЕЕС до кластеру c_1 = «Слабкий», другий – до кластеру c_2 = «Середній», третій – до кластеру c_3 = «Сильний», то згідно з (22) розподіл елементів ЕЕС, відмова або перевантаження яких можуть спричинити аварійну ситуацію, по кластерах виглядає наступним чином:

$$c_1 = \{Л5-8; Л8-200; Т200-202\}; \quad (29)$$

$$c_2 = \{Л100-202\}; \quad (30)$$

$$c_3 = \{Т200-201\}. \quad (31)$$

Таким чином, виконується умова кластеризації щодо відсутності порожніх кластерів.

5. Результати досліджень

Аналіз отриманих результатів показує, що слабкий кластер C_l формують ліній Л5-8, Л8-200 та трансформатор Т200-202. Таким чином, самі ці елементи ЕЕС потребують першочергової заміни або модернізації в умовах обмеженості фінансування реконструкції розглядуваної ЕЕС.

6. Висновки

Запропонований метод нечіткої кластеризації дозволяє класифікувати елементи та підсистеми ЕЕС з точки зору їхньої слабкості в умовах обмеженості інформації про технічний стан та режимні умови функціонування обладнання. Вихідною інформацією для кластеризації є результати імовірісно-статистичного моделювання схеми ЕЕС з використанням методу Монте-Карло, що дозволяє врахувати імовірнісний характер виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС під час визначення її найбільш слабких елементів, які потребують першочергової заміни. Отриманий результат кластеризації використовується в задачах планування розподілу витрат на реконструкцію ЕЕС для визначення першочергових рішень по заміні найбільш ненадійного електрообладнання.

Література

1. Kosterev, M. Development of Fuzzy-Statistical Method of Optimal Resource Allocation Among Technical Departments of an Electric Utility Company [Text] / M. Kosterev, V. Litvinov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 3, Issue 4 (81). – P. 20–27. doi: 10.15587/1729-4061.2016.70522

2. Soudi, S. Distribution System Planning With Distributed Generations Considering Benefits and Costs [Text] / S. Soudi // International Journal of Modern Education and Computer Science. – 2013. – Vol. 5, Issue 10. – P. 45–52. doi: 10.5815/ijmecs.2013.09.07

3. Bae, I. S. Optimal operating strategy for distributed generation considering hourly reliability worth [Text] / I. S. Bae, J. O. Kim, J. C. Kim, C. Singh // IEEE Transactions on Power Systems. – 2004. – Vol. 19, Issue 1. – P. 287–292. doi: 10.1109/tpwrs.2003.818738

4. Fathi, B. Investigation the Interest Rate of Each Energy Source on Optimal Sizing of Distributed Energy Resources [Text] / B. Fathi // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2011. – Vol. 3, Issue 8. – P. 812–817.

5. Hajizadeh, A. Intelligent power management strategy of hybrid distributed generation system [Text] / A. Hajizadeh, M. A. Golkar // International Journal of Electrical Power Engineering Systems. – 2009. – Vol. 29, Issue 10. – P. 783–795. doi: 10.1016/j.ijepes.2007.06.025

6. Костерев, М. В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи [Текст] / М. В. Костерев, С. І. Бардик, В. В. Літвінов // Наукові праці Донецького НТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2011. – № 11. – С. 199–204.

7. Соболев, И. М. Численные методы Монте-Карло [Текст] / И. М. Соболев. – М.: Наука, 1973. – 312 с.

8. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

9. Zadeh, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes [Text] / L. A. Zadeh // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1973. – Vol. SMC-3, Issue 1. – P. 28–44. doi: 10.1109/tsmc.1973.5408575

10. Вентцель, Е. С. Исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.

References

1. Kosterev, M., Litvinov, V. (2016). Development of fuzzy statistical method of optimal resource allocation among technical departments of an electric utility company. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/4 (81), 20–27. doi: 10.15587/1729-4061.2016.70522

2. Soudi, S. (2013). Distribution System Planning With Distributed Generations Considering Benefits and Costs. International Journal of Modern Education and Computer Science, 5 (10), 45–52. doi: 10.5815/ijmecs.2013.09.07

3. Bae, I. S., Kim, J. O., Kim, J. C., Singh, C. (2004). Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth. IEEE Transactions on Power Systems, 19 (1), 287–292. doi: 10.1109/tpwrs.2003.818738

4. Fathi, B. (2011). Investigation the Interest Rate of Each Energy Source on Optimal Sizing of Distributed Energy Resources. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 3 (8), 812–817.

5. Hajizadeh, A., Golkar, M. A. (2007). Intelligent power management strategy of hybrid distributed generation system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 29 (10), 783–795. doi: 10.1016/j.ijepes.2007.06.025

6. Kosterev, M. V., Litvinov, V. V. (2011). Otsinka imovirnosti vidmovy elektroobladnannia pry keruvanni rezhymamy elektrichnoi systemy. Naukovi pratsi DonNTU, Elektrotehnika i energetika, 11, 199–204.

7. Sobol, I. M. (1973). Chislennyye metody Monte-Karlo. Moscow: Nauka, 312.

8. Shtovba, S. D. (2007). Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB. Moscow: Goriachaia linia – Telekom, 288.

9. Zadeh, L. A. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-3 (1), 28–44. doi: 10.1109/tsmc.1973.5408575

10. Ventsel, E. S. (1972). Issledovanie operatsiy. Moscow: Sovetskoe radio, 552.

Дата надходження рукопису 10.11.2016

Костерев Микола Володимирович, доктор технічних наук, професор, кафедра електричних станцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: nicolkost@gmail.com

Літвінов Володимир Валерійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра гідроенергетики, Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006

E-mail: v.v.litvinov1985@mail.ru

Kosterev Mykola, Doctor of Technical Science, Professor, Department of Central Power Plants, National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”, Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056

E-mail: nicolkost@gmail.com

Litvinov Volodymyr, PhD, Associate Professor, Department of Hydro Power, Zaporizhia State Engineering Academy, Soborny ave., 226, Zaporizhzhya, Ukraine, 69006

E-mail: v.v.litvinov1985@mail.ru