

## ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНЕКНЕННЯ АВАРІЙНОЇ СИТУАЦІЇ В ПІДСИСТЕМІ ЕЕС ЗА НАЯВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВІДМОВІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Костерев М.В., д.т.н., проф., Сірук О.М., магістрант, Шевчук К.Б., магістрант, Чміль В.І., магістрант

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** Сучасний стан електроенергетичної системи (ЕЕС) України та її підсистем характеризується високою зношеністю електрообладнання, яка досягає 70 – 80 %, збільшенням кількості обладнання з відпрацьованим ресурсом, темпи якого сягають 2 – 6 % на рік, напруженим режимом використання зношеного електрообладнання та слабкими тенденціями до його заміни та модернізації. Це призводить до збільшення кількості технологічних порушень та відмов електрообладнання. Наслідком відмов обладнання є розвиток в ЕЕС аварійних ситуацій, які можуть призвести до повного погашення ЕЕС, порушення статичної та динамічної стійкості, порушення технологічних процесів підприємств-споживачів зі значними економічними та матеріальними збитками. Заміна та модернізація обладнання, які спроможні підвищити надійність електропостачання споживачів, вимагають значних інвестицій і є тривалими у часі. Забезпечення надійної роботи ЕЕС та її підсистем є однією з важливих задач в умовах формування нових ринкових відносин в електроенергетиці [1, 2].

Для підвищення надійності роботи ЕЕС необхідно знати які її вузли або підсистеми є найбільш слабкими, щоб мати можливість виконати ефективні превентивні дії для підвищення надійності слабких підсистем та всієї ЕЕС в цілому. Світові тенденції розвитку методів і засобів забезпечення надійної роботи ЕЕС свідчать про зростання ролі ризик-менеджменту (Risk-Based Asset Management) при прийнятті достовірних рішень для превентивного управління. Застосування стратегії ризик-менеджменту при керуванні ЕЕС вимагає визначення ризику як інтегрального показника функціонування ЕЕС який дає можливість враховувати перераховані фактори і, таким чином, найбільш повно та достовірно характеризувати стан ЕЕС та її підсистем на відміну від детермінованого підходу.

Необхідність прийняття достовірних рішень та визначення превентивних дій для підвищення надійності роботи ЕЕС вимагає комплексного підходу, який би об'єктивно враховував такі фактори як: випадковість відмов електрообладнання, стохастичний характер режиму ЕЕС, можливий сценарій розвитку аварії, технічні, економічні, екологічні наслідки та існуючу неповноту та нечіткість вхідної інформації. Пошук оптимальних управлінських рішень за такої кількості негативних чинників і невизначеностей полягає у сфері оцінювання ризиків. В разі необхідності виконати прогностичну оцінку ризику виникнення аварії на інтервалі часу доцільним є імовірнісний підхід [1, 2].

**Мета роботи.** Метою роботи являється моделювання підсистем енергосистеми з асинхронними двигунами (вузли навантаження ЕЕС, власні

потреби електростанції) для визначення величини ризику виникнення аварійної ситуації в підсистемі.

**Матеріали і результати досліджень.** Розглянемо математичну модель асинхронної машини, в якій не враховуються електромагнітні перехідні процеси в обмотках статора і активний опір [1, 5, 6]:

$$\begin{aligned} U_d &= e'_d - x'_s I_q \\ U_q &= e'_q + x'_s I_d \\ de'_q / dt &= -1/T_d \cdot e'_q - \omega \cdot s \cdot e'_d + N/T_d \cdot I_d \\ de'_d / dt &= -1/T_d \cdot e'_d + \omega \cdot s \cdot e'_q - N/T_d \cdot I_q \\ ds / dt &= 1 / T_j [ m_c - ( e'_q \cdot I_q + e'_d \cdot I_d ) ] \\ N &= x_s - x'_s, \end{aligned}$$

де  $x_s$  - синхронний опір (в.о),  $x'_s$  - перехідний опір (в.о),  $U_d$ ,  $U_q$  - складові напруги по повздовжній і поперечній осях відповідно (в.о),  $I_d$   $I_q$  - складові струму статора по повздовжній і поперечній осі відповідно (в.о),  $m_c$  - момент опору механізму (в.о),  $s$  - ковзання двигуна (в.о),  $T_d$  - постійна часу обмотки ротора (сек.),  $T_j$  - постійна інерції ротора (сек.),  $e'_d$   $e'_q$  - перехідні ЕРС по повздовжній і поперечним осям, (в.о.),  $t$  - час (сек.)

Порушення стійкості АД залежить не тільки від напруги, але і від зовнішнього опору  $x_p$ , який змінюється при відмові електрообладнання.

Відомо, що максимальна потужність асинхронного двигуна, перевищення якої приводить до порушення її стійкості, наближено може бути визначена з співвідношення

$$P_{\max} = U^2 / 2( x_p + x_\varepsilon ),$$

де  $x_p$  - зовнішній опір між шинами двигуна і вузлом ЕЕС,  $x_\varepsilon$  - сумарний опір розсіювання обмоток статора і ротора.

Приймемо, що спожита двигуном активна  $P$  є незмінною при заданій продуктивності механізму.

При збільшенні  $x_p$  і зменшенні  $U$  максимальна потужність стає рівній робочій потужності  $P$ .

$$P = P_{\max} = U^2 / 2( x_p + x_\varepsilon ),$$

$$\text{або } 2P( x_p + x_\varepsilon ) = U^2$$

Подальше збільшення  $x_p$  чи зменшення напруги приводить до порушення стійкості двигуна.

Якщо права частина рівняння стає менше робочої потужності двигуна, то відбудеться порушення стійкості двигуна. Іншими словами, необхідна механізмом потужність не може бути забезпечена двигуном. Тобто для стійкості роботи двигуна необхідно виконання нерівності:

$$P = P_{\max} < U^2 / 2( x_p + x_\varepsilon )$$

Звідси слідує спрощений критерій стійкості асинхронного двигуна:

$$U^2 / (x_p + x_e) > 2P - \text{стійкий}$$

Для оцінки ризику виникнення аварійної ситуації необхідно визначити ймовірність відмови електричного обладнання. Нехай відомо, що електрообладнання, яке розглядається, знаходилося в працездатному стані в момент нагляду  $t_1$ . Відома також функція  $F(t)$  розподілу ймовірності відмови даного типу електрообладнання (рис.1).[3]

Необхідно визначити ймовірність відмови електрообладнання на інтервалі часу  $\Delta t = t_2 - t_1$  за умови, що об'єкт в момент часу  $t_1$  був у працездатному стані.

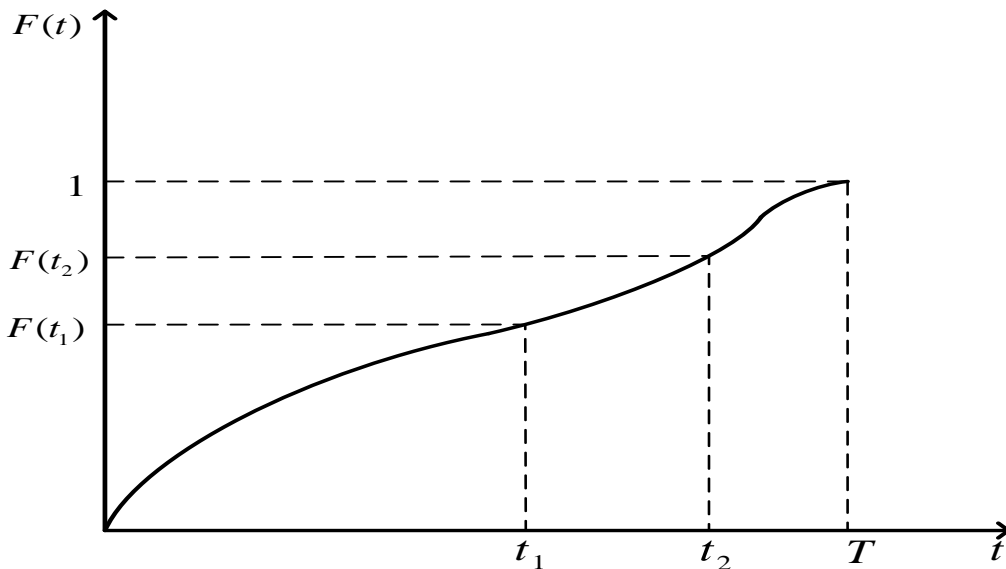


Рисунок 1 – Інтегральна функція розподілу ймовірності відмови обладнання  $F(t)$

Введемо наступні визначення подій:

$H_1$  – подія, яка полягає в тому, що об'єкт відмовив на інтервалі часу  $\Delta t$ ;

$G$  – подія, яка полягає в тому, що об'єкт не відмовив на інтервалі часу  $[0; t_1]$ ;

$\bar{G}$  – протилежна подія, яка полягає в тому, що об'єкт відмовить на інтервалі часу  $[0; t_1]$ ;

$C_2$  – складна подія, яка полягає в тому, що об'єкт відмовить до моменту часу  $t_2$ .

Безумовні ймовірності подій  $C_2$  та  $G$  можна визначити з функції  $F(t)$ :

$$\begin{aligned} p(C_2) &= F(t_2), \\ p(\bar{G}) &= F(t_1), \end{aligned}$$

Складна подія  $C_2$  полягає в настанні або події  $\bar{G}$  (відмова на інтервалі часу) або події  $H_1$  (відмова на інтервалі часу  $\Delta t$ ). Події  $\bar{G}$  та  $H_1$  – несумісні (може наступити або подія  $\bar{G}$  або подія  $H_1$ ), тому ймовірність настання події  $C_2$  визначається за формулою складання ймовірностей [5]:

$$p(C_2) = p(\bar{G}) + p(H_1),$$

Настання події  $H_1$  залежить від того, наступить чи не наступить подія  $G$  (працездатний стан об'єкта до моменту часу  $t_1$ ). Так як ці події залежні, то ймовірність настання події  $H_1$  визначається за формулою множення ймовірностей [5]:

$$p(H_1) = p(G) \cdot p(H_1 / G),$$

З урахуванням (1.15), ймовірність настання події  $C_2$  визначається наступним чином:

$$p(C_2) = p(\bar{G}) + p(G) \cdot p(H_1 / G),$$

Звідси, ймовірність настання події  $H_1$  за умови, що мала місце подія  $G$ :

$$p(H_1 / G) = \frac{p(C_2) - p(\bar{G})}{p(G)},$$

З визначення події  $G$  слідує:

$$p(G) = 1 - p(\bar{G}) = 1 - F(t_1),$$

Ймовірність відмови об'єкту на інтервалі часу  $\Delta t$  за умови його працездатного стану на момент часу  $t_1$  визначається з функції  $F(t)$ :

$$p(H_1 / G) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{1 - F(t_1)},$$

Слід зауважити, що в разі відсутності інформації про працездатний стан об'єкта в момент нагляду  $t_1$ , безумовна ймовірність відмови об'єкта на інтервалі часу  $\Delta t$  визначається безпосередньо з функції  $F(t)$ :

$$p(H_1) = F(t_2) - F(t_1)$$

Врахування ТС електрообладнання. Ймовірність відмови обладнання на інтервалі часу  $\Delta t$  залежить від його ТС до моменту нагляду  $t_1$  (чим більш зношеним є елемент електрообладнання, тим вища ймовірність його відмови). В якості міри оцінки ТС об'єкта прийнято стан  $S$ , визначений за описаною вище нечіткою моделлю об'єкта [2].

Додатково введено наступні визначення подій:

$B$  – подія, яка полягає в тому, що об’єкт до моменту часу  $t_1$  мав ТС  $S$ ;

$H_2$  – подія, яка полягає в тому, що об’єкт не відмовив на інтервалі часу  $\Delta t$ , при цьому  $p(H_2) = 1 - p(H_1)$ .

Подія  $B$  може спостерігатися в одній з двох несумісних подій  $H_1$  та  $H_2$ , тобто при відмові об’єкта на інтервалі  $\Delta t$ , так і при відсутності відмови. В цьому випадку, безумовна ймовірність події  $B$  визначається за формулою повної імовірності [3]:

$$p(B) = p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2),$$

де:  $p(H_1)$  – апіорна ймовірність події  $H_1$  до виявлення події  $B$ ;

$p(H_2)$  – апіорна ймовірність події  $H_2$  до виявлення події  $B$ ;

(апіорні ймовірності в цьому розгляді враховують той факт, що до моменту нагляду  $t_1$  об’єкт знаходився в працездатному стані);

$p(B/H_1)$  – умовна ймовірність події  $B$  при настанні події  $H_1$  (або ймовірність підтвердження гіпотези «відмова об’єкта на інтервалі часу  $\Delta t$ » ознакою  $S$ , яка характеризує ТС об’єкта);

$p(B/H_2)$  – умовна ймовірність події  $B$  при настанні події  $H_2$  (або ймовірність підтвердження гіпотези «об’єкт не відмовив на інтервалі часу  $\Delta t$ » ознакою  $S$ , яка характеризує ТС об’єкта).

Припустимо, що подія  $B$  настала (у об’єкта виявлено ТС  $S$ ). Тоді апостеріорна ймовірність гіпотези  $H_1$  за умови появи події  $B$  (умовна ймовірність відмови об’єкта на інтервалі часу  $\Delta t$  за умови, що в об’єкта було зафіксовано ТС  $S$ ) визначається за формулою Байєса [3]:

$$p(H_1/B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B/H_1)}{p(H_1) \cdot p(B/H_1) + p(H_2) \cdot p(B/H_2)},$$

Умовні ймовірності  $p(B/H_1)$  та  $p(B/H_2)$  можуть бути визначені на основі статистичних даних про ТС об’єкта в момент відмови. В разі відсутності таких статистичних даних запропоновано використання композиційного правила Заде з побудовою матриць нечітких причинних відносин на основі знань експерта за методом Сааті.

Врахування введених вище подій при визначенні ймовірності відмови електрообладнання на інтервалі часу  $\Delta t$  дає можливість модифікувати функцію розподілу ймовірності відмови об’єкту на цьому інтервалі:

$$F'(t_2) - F(t_1) = p(H_1/B),$$

Останній вираз дозволяє визначити нове значення  $F'(t_2)$  в момент часу  $t_2$  (рис. 2).

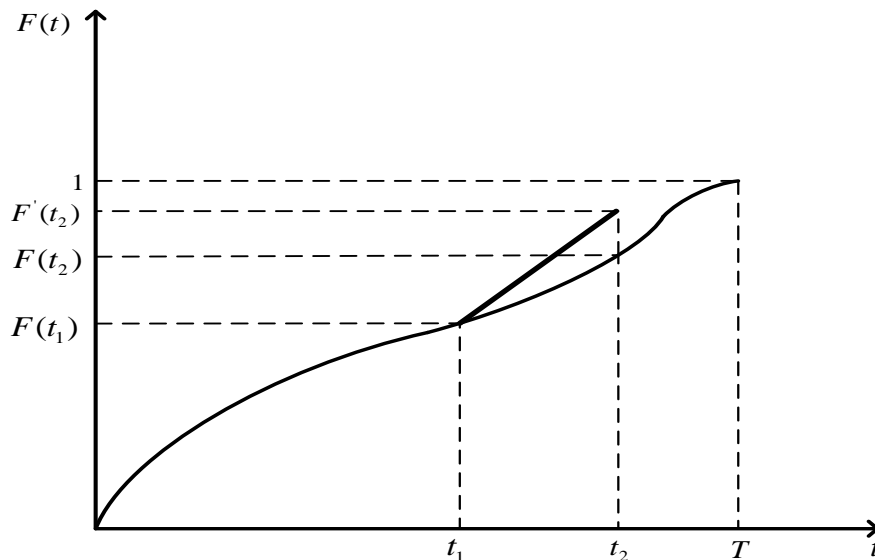


Рисунок 2 – Модифікована функція  $F(t)$ , побудована з урахуванням ТС окремої одиниці обладнання

Модифікована функція  $F(t)$  конкретного типу електрообладнання дає можливість враховувати індивідуальні характеристики об'єкту, який знаходиться в експлуатації. Так як вказана функція використовується при статистичному моделюванні, яке призначене для оцінки ймовірності виникнення аварійної ситуації в підсистемі ЕЕС, то врахування індивідуальних характеристик обладнання підсистеми, дозволяє отримувати більш достовірні результати, у порівнянні з використанням функції  $F(t)$ , побудованої тільки на основі статистичної інформації про відмови даного типу електрообладнання [8].

Визначення ризику виникнення аварійних ситуацій. Для урахування неточності завдання вихідної інформації використовується метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло) [9], у відповідність з яким параметри схеми заміщення змінюються в межах  $\pm 20\%$ .  $x_{p+1} = x_p + \Delta x \cdot \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – випадкове число, отримане через генератор випадкових чисел з діапазону  $-1 + 1$ .

З використанням випадково отриманих значень параметрів підсистеми і визначається стійкість АД.

Отже ймовірність порушення стійкості асинхронного двигуна дорівнює:

$$P_{a.с} = \frac{n}{N}$$

де  $n$  – кількість розрахунків де була порушена стійкість асинхронного двигуна,  $N$  – загальна кількість розрахунків.

Надалі ризик виникнення аварійної ситуації знаходиться за формулою

$$R = P_{a.с} \cdot P_{відмови}$$

де,  $P_{a.с}$  - ймовірність порушення стійкості двигуна,  $P_{відмови}$  - ймовірність відмови електрообладнання.

**Експериментально-модельні розрахунки.** Провівши експериментально модельні розрахунки, для знаходження залишкової напруги на шинах двигуна, що показані в зведеній таблиці розрахунків (табл. 1), та визначення стійкості двигуна при даній напрузі (табл. 2), визначимо ризик виникнення аварійної ситуації:

Таблиця 1 – Зведені розрахунки залишкової напруги на шинах АД

	$E_e$	$X_{ej}$	$X_{pt}$	$X_{pj}$	$U_{io}$	$Q_{io}$	$E_{eo}$
1	1,438	0,017	0,056	0,072	1,399	0,729	1,438
2	1,354	0,014	0,064	0,078	1,312	0,668	1,353
3	0,962	0,015	0,063	0,078	0,913	0,522	0,962
4	1,387	0,019	0,057	0,075	1,348	0,692	1,388
5	1,006	0,018	0,064	0,082	0,957	0,525	1,006
6	1,418	0,013	0,063	0,077	1,378	0,713	1,419
7	0,991	0,017	0,069	0,086	0,94	0,523	0,992
8	1,188	0,013	0,07	0,083	1,145	0,578	1,189
9	1,258	0,018	0,055	0,072	1,219	0,614	1,257
10	1,241	0,17	0,05	0,066	1,207	0,608	1,241
11	1,044	0,017	0,06	0,077	1	0,531	1,044
12	1,284	0,014	0,048	0,063	1,25	0,631	1,283
13	1,33	0,019	0,07	0,09	1,281	0,649	1,329
14	1,217	0,019	0,055	0,074	1,179	0,594	1,218
15	1,073	0,013	0,053	0,067	1,037	0,54	1,074
16	1,349	0,015	0,061	0,076	1,31	0,667	1,35
17	1,094	0,017	0,062	0,08	1,05	0,544	1,094
18	1,272	0,016	0,052	0,068	1,237	0,624	1,272
19	1,406	0,013	0,051	0,065	1,372	0,709	1,406
20	1,049	0,018	0,062	0,079	1,005	0,532	1,05

Таблиця 2 – Зведені результати оцінки критерію стійкості АД

$\frac{U^2}{x_p + x_\varepsilon}$	
1	6,791
2	5,856
3	2,831
4	6,235
5	3,076
6	6,488
7	2,922
8	4,386
9	5,153
10	5,158
11	3,408

12	5,605
13	5,37
14	4,789
15	3,804
16	5,867
17	3,73
18	5,384
19	6,711
20	3,418

Як бачимо з даної таблиці (табл.2), у кожному з випадків АД залишився стійким, тому:

$$P_{a.в} = \frac{0}{20} = 0,$$

звідси знаходимо ризик:

$$R = 0 \cdot 0.0031 = 0$$

де,  $P_{відмови} = 0.0031$ .

**Висновки.** В умовах реально існуючої імовірності відмови електрообладнання підсистем ЕЕС розглянуто моделювання підсистем ЕЕС для виявлення ризику виникнення аварійної ситуації при відмовах електрообладнання. Це дає можливість приймати більш правильні превентивні заходи при вирішенні експлуатаційних завдань, пов'язаних з підвищенням надійності роботи підсистем ЕЕС.

#### Перелік посилань

1. Костерев Н.В. Моделирование и динамика атомных электростанций при возмущениях в энергосистеме. – К.: Вища школа, 1986. - 168 с.
2. Костерев М.В. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем / М.В. Костерев, Є.І. Бардик. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А., Устойчивость нагрузки электрических систем. - М.: Энергоиздат, 1981.- 208с.
4. Гамм А.З. Обнаружение слабых мест в электроэнергетической системе./ А.З. Гамм., И.И. Голуб// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1993.- №3. – С.83-92.
5. Маркович И.М. Режимы энергетических систем. - М.: Энергия, 1969. – 352с
6. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И.А. Сыромятников. – М.: Госэнергоиздат, 1963. –527 с.
7. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.-М.:Энергия, 1964.- 703 с.
8. Костерев М.В., Бардик Є.І., Літвінов В.В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 11 (186). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – С. 199-204.
9. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973. – 312 с