УДК 621.311

МОДЕЛЮВАННЯ І ОЦІНКА РИЗИКУ ВІДМОВИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЗБУРЕННЯХ В ЗОВНІШНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Є. І. Бардик, М.П. Болотний

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua

Обґрунтовано доцільність врахування технічного стану обмоток силового трансформатора для визначення кількісних показників ризику відмови при короткому замиканні в зовнішній електричній мережі. Запропоновано комплексну математичну модель, алгоритм та програмне забезпечення оцінки ризику відмови силового трансформатора за наявності дефекту обмоток внаслідок зовнішніх коротких замикань, які ґрунтуються на використанні нечіткого моделювання технічного стану обмоток силового трансформатора та імовірнісно-статистичного моделювання електричної мережі для визначення імовірнісних характеристик струмів короткого замикання в обмотках силового трансформатора.

Результати експериментального моделювання підтверджують ефективність запропонованих методів і моделі для підвищення надійності функціонування енергокомпаній та зниження ризику виникнення аварійних ситуацій при відмовах електрообладнання.

Ключові слова: нечітка модель, нечітка логіка, електрообладнання, ризик, відмова, коротке замикання.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РИСКА ОТКАЗА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ ВО ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Е. И. Бардик, Н.П. Болотный

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua

Обоснована целесообразность учета технического состояния обмоток силового трансформатора для определения количественных показателей риска отказа при коротком замыкании во внешней электрической сети. Предложена комплексная математическая модель, алгоритм и программное обеспечение оценки риска отказа силового трансформатора при наличии дефекта обмоток, вследствие внешних коротких замыканий, основанные на использовании нечеткого моделирования технического состояния обмоток силового трансформатора и вероятностно-статистичного моделирования электрической сети для определения вероятностных характеристик токов короткого замыкания в обмотках силового трансформатора.

Результаты экспериментального моделирования подтверждают эффективность предложенных метода и модели для повышения надежности функционирования энергокомпаний и снижение риска возникновения аварийных ситуаций при отказах электрооборудования.

Ключевые слова: нечеткая модель, нечеткая логика, электрооборудование, риск, отказ, короткое замыкание.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Модернізація і розвиток сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС) на базі концепції Smart Grid, що передбачає вдосконалення і створення нових функціональних властивостей [1] за яких забезпечується необхідний рівень надійності електропостачання споживачів, на сьогодні є актуальною задачею.

Ефективність реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичній галузі України і інших промислово розвинених країн суттєво залежить від того, наскільки енергосистема і її електрообладнання мають технічний стан за якого забезпечується високий рівень надійності електропостачання споживачів [1–3] та мінімізація ризику виникнення аварії.

В зв’язку з цим важливим є визначення елементів енергосистем, які мають найбільшу ймовірність відмови і ті, відмови яких можуть спричинити каскадний розвиток аварій в системі з тяжкими наслідками. Це дає можливість здійснити пріоритетний контроль цих елементів, спрогнозувати терміни можливих відмов, і таким чином, сформувати перелік необхідних дій персоналу, а також виконати превентивне і адаптивне в залежності від розвитку ситуації, керування системою і її елементами [1–3].

Відмова електрообладнання може виникнути внаслідок вичерпання ресурсу працездатності, несприятливих метеоумов, помилкових дій персоналу, наявності дефекту та інших причин [2–3]. Особливої уваги заслуговують питання оцінки ймовірності відмов електрообладнання зі значним терміном експлуатації за наявності дефекту та дії збурень в зовнішній електричній мережі.

Силові трансформатори (СТ) сучасних ЕЕС є одними з найвідповідальніших і вартісніших елементів основного електрообладнання ЕЕС від надійності функціонування яких значною мірою залежить надійність як систем електропостачання споживачів так і складної ЕЕС в цілому [4–5]. Збільшення частки силових трансформаторів зі значним терміном експлуатації загострює проблему забезпечення їх контролю, об’єктивної оцінки технічного стану (ТС) і прогнозування ресурсу працездатності та визначення імовірності відмов.

Особливо важливим, окрім оцінки ТС і прогнозування ресурсу працездатності СТ є ідентифікація виду і ступеню розвитку дефекту та визначення імовірності відмови СТ внаслідок дії зовнішніх збурень, зокрема при КЗ в зовнішній електричній мережі.

Вирішення задач оцінки ТС СТ та ідентифікації можливого дефекту, а також визначення імовірності відмови СТ за наявності дефекту докладно розглянуто в публікаціях [5–6].

В рамках даної роботи розглянемо питання оцінки ризику відмови СТ внаслідок незадовільного технічного стану обмоток і дії збурень в зовнішній електричній мережі, зокрема при КЗ на ЛЕП.

Оцінка імовірності відмови СТ при дії збурень в зовнішній електричній мережі. Елементом СТ, який в найбільшій мірі піддається впливам з боку зовнішньої електричної мережі є обмотки [4, 7–10]. В першу чергу це стосується коротких замикань, дія котрих в залежності від кількості і величини струмів КЗ в обмотках СТ може призвести до їх невідновлювальної відмови [9–10].

Найважливішими показниками для оцінки механічного стану обмоток є зношення виткової ізоляції і ступінь механічного закріплення обмоток, зокрема відсутність небезпечних деформацій, котрі викликані великими струмами КЗ.

Небезпечні деформації або зміщення обмоток СТ, котрі викликані значними струмами КЗ або несинхронними включеннями є потенційною причиною відмови СТ внаслідок порушення ізоляції та ізоляційних проміжків. Ресурс паперової виткової ізоляції обмоток вважається вичерпаним при зниженні ступеню полімеризації паперу від 1000–1300 (на початку експлуатації) до 200–250 одиниць. Ступінь механічного закріплення обмоток згідно з [9] визначається на основі вимірювання опору короткого замикання Z_K СТ.

Ризик пошкодження СТ, що має значне зношення ізоляції та небезпечні деформації є достатньо високий і суттєво залежить від імовірності небезпечного значення струму КЗ.

Відмова СТ для ЕЕС є збуренням, яке може спричинити виникнення аварійної ситуації з можливим подальшим каскадним розвитком в ЕЕС, а визначення вузлів електричної мережі з найбільш імовірними значеннями небезпечних для обмоток СТ струмів КЗ є важливим для планування заходів щодо їх обмеження [14].

Метою роботи є розробка математичних моделей і програмного забезпечення оцінки імовірності відмови СТ при зовнішніх коротких замиканнях для визначення ризику виникнення аварійної ситуації в енергосистемі.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Об'єктивно існуюча необхідність використання як кількісної так і якісної вхідної інформації щодо ТС обмоток СТ та рівня збурень в електричній мережі та неможливість визначати ризик відмови СТ при зовнішніх КЗ на основі аналітичних моделей потребує використання підходу, що ґрунтується на застосуванні експертних оцінок, теорії нечітких множин і нечіткої логіки при побудові даних моделей відмов [2, 4, 6, 9].

Керуючись загальними принципами побудови нечітких моделей електрообладнання [2, 11] сформуємо основні компоненти нечіткої моделі для оцінки ризику відмови СТ при зовнішніх КЗ.

В якості вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі у відповідності із загальним підходом [2, 11] використаємо наступні:

- ΔZ_K – ступінь деформації обмоток внаслідок дії струмів КЗ СТ:

$$A_1 = \{L_1, M_1, B_1\};$$

- I_{KZ} – величина аварійного наскрізного струму КЗ, що проходить через обмотки СТ:

$$A_2 = \{L_2, M_2, B_2\};$$

- P_{KZ} – імовірність виникнення струму в обмотках СТ певного рівня при зовнішньому КЗ:

$$A_3 = \{L_3, M_3, B_3\};$$

- DP – ступінь полімеризації ізоляції:

$$A_4 = \{L_4, M_4, B_4\};$$

де L_i, M_i, B_i – «низьке», «середнє», «високе» значення параметрів СТ і мережі відповідно.

В якості вихідної лінгвістичної змінної нечіткої моделі прийнято ризик R_{KZ} відмови СТ при зовнішніх КЗ з термами:

$$A_5 = \{VL_5, L_5, M_5, B_5, VB_5\}.$$

Ієрархічна структурна схема моделі СТ для визначення ризику відмови внаслідок зовнішніх КЗ наведено на рис. 1.

Функції належності вхідних і вихідної лінгвістичних змінних наведено на рис. 2.

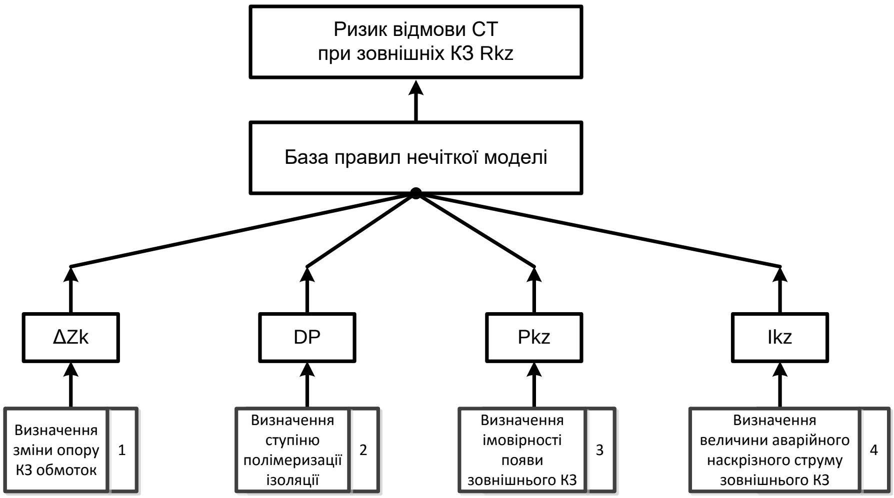


Рисунок 1 – Ієрархічна структурна схема нечіткої моделі СТ для визначення ризику відмови СТ внаслідок дії зовнішніх КЗ

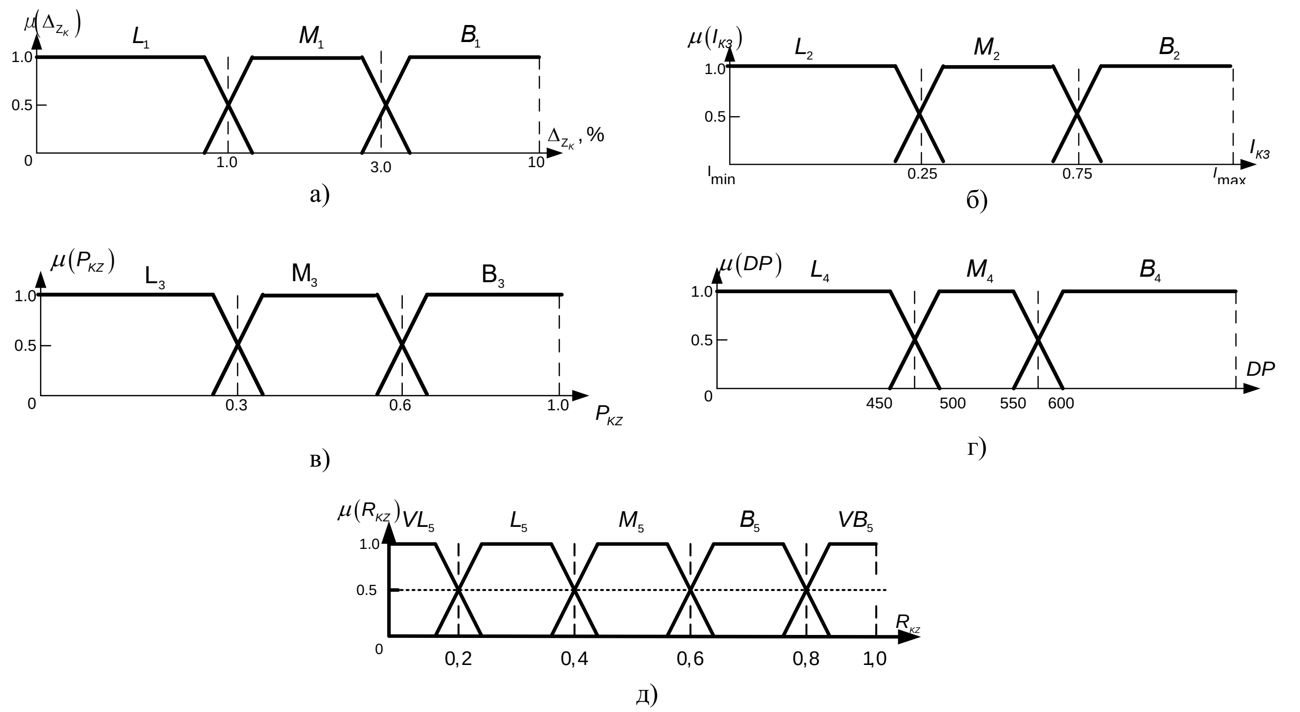


Рисунок 2 – Функції належності терм-множин вхідних і вихідної лінгвістичної змінних:
а) – змінення опору КЗ; б) – величина наскрізного струму КЗ; в) – імовірність наскрізного струму в обмотках СТ; г) – ступінь полімеризації ізоляції; д) – ризик відмови СТ при дії струмів зовнішніх КЗ

База правил для визначення ризику відмови СТ при зовнішніх КЗ формується на основі експертних знань щодо поточних характеристик і параметрів СТ, що розглядається [2, 11]. Для випадку врахування впливу на величину імовірності відмови СТ змінення його опору КЗ при дії струмів КЗ в зовнішній електричній мережі. вона містить 27 продукційних правил наступного типу: «Якщо ступінь деформації обмоток внаслідок дії струмів КЗ СТ $A_1 = \{L_1, M_1, B_1,\}$ ТА імовірність виникнення струму в обмотках СТ певного рівня при зовнішньому КЗ $A_2 = \{L_2, M_2, B_2,\}$ ТА величина наскрізного струму КЗ, що проходять через обмотки СТ $A_3 = \{L_3, M_3, B_3,\}$, ТО ризик відмови СТ при дії струмів зовнішніх КЗ $A_5 = \{VL_5, L_5, M_5, B_5, VB_5\}$». Сформована база правил для оцінки ризику відмови СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі за наявності деформації обмоток наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – База правил оцінки ризику відмови СТ при дії струмів зовнішніх КЗ R_{KZ}

ΔZ_K = L_1			
I_KZ / **P_KZ**	L_2	M_2	B_2
L_3	VL_5	L_5	B_5
M_3	VL_5	M_5	B_5
B_3	L_5	B_5	VB_5

ΔZ_K = M_1			
I_KZ / **P_KZ**	L_2	M_2	B_2
L_3	M_5	B_5	B_5
M_3	M_5	B_5	VB_5
B_3	B_5	B_5	VB_5

ΔZ_K = B_1			
I_KZ / **P_KZ**	L_2	M_2	B_2
L_3	B_5	B_5	VB_5
M_3	B_5	VB_5	VB_5
B_3	VB_5	VB_5	VB_5

Моделювання КЗ в зовнішній електричній мережі. Процеси в енергосистемі мають стохастичний характер, а коротке замикання є імовірнісною подією і в загальному випадку описується системою імовірнісних характеристик [12, 14].

Найбільш важливими з них в плані отримання розподілу імовірності виникнення КЗ для оцінки ризику відмови СТ, викликаної коротким замиканням в електричній мережі є [12]: стан енергосистеми (топологія зовнішньої мережі, навантаження у вузлах і інш.); вид КЗ (трифазне або однофазне); місце розташування точки короткого замикання; елемент мережі, який зазнає пошкодження; фаза, яка пошкоджується.

Найбільша імовірність виникнення КЗ в електричних мережах високої напруги 110 – 750 кВ спостерігається на ЛЕП [12], і становить 77,3 ÷ 91,44 % від загальної кількості КЗ в ЕЕС, і в першому наближенні можна припустити, що має рівномірне розташування точки КЗ вздовж довжини повітряної лінії (ПЛ), якщо ПЛ не облаштована захисними тросами по кінцям, і рівень професійної підготовки експлуатаційного персоналу суттєво не різниться [14].

Розподіл різних видів КЗ залежить від типу електроустановки [12] і класу напруги, причому в усіх випадках домінуючими є однофазні КЗ, частка яких збільшується із збільшенням рівня напруги і сягає в електричних мережах напругою 110 кВ і вище 76,3 ÷ 100 % від загальної кількості всіх видів КЗ на ПЛ [12].

Розподіл кількості КЗ в значній мірі залежить також від пори року і доби, а природничо-кліматичні фактори, є основними причинами збільшення кількості КЗ [10, 12].

Суттєвий вплив на величину струмів КЗ в електричній мережі має також рівень навантаження у вузлах ЕЕС [2, 12].

Вирішення задачі отримання розподілу імовірності струмів в обмотках СТ певної величини для оцінки ризику їх пошкодження при зовнішніх КЗ з урахуванням вищезазначених випадкових факторів можливе на основі статистичного моделювання (метод Монте-Карло) стану електроенергетичної системи з розглядаємим силовим трансформатором, за параметрами якого ведеться безперервний або періодичний моніторинг [2–4].

Стан електроенергетичної системи визначається станом кожного елемента і режимом її роботи. В процесі експлуатації кожен елемент може знаходитись в режимах експлуатації або ремонту і імовірність того, що об'єкт знаходиться на інтервалі часу в ремонті, можна характеризувати коефіцієнтом неготовності (простою) [10]

$$K_{í\tilde{A}_j} = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j},$$

де λ – інтенсивність відмови об'єкта; μ – інтенсивність відновлення кожного елемента системи.

Функціонування кожного елемента енергосистеми можна описати рівномірним законом розподілу. Якщо p_i є деяке випадкове число, котре рівномірно розподілене в інтервалі (0, 1), то стан S_j j – го елемента можна визначити:

$$S_i = \begin{cases} 0, & if\ K_{í\tilde{A}_j} \le p_i \le 1 \\ 1, & if\ 0 \le p_i < K_{í\tilde{A}_j} \end{cases}$$

В загальному випадку потік КЗ в енергосистемі є нестаціонарним. Разом з цим практика експлуатації показує, що у більшості випадків на інтервалах спостереження в межах однієї доби, місяця і навіть кварталу нестаціонарний потік КЗ в енергосистемі можна вважати стаціонарним. Тоді імовірність виникнення КЗ на інтервалі Δt за умови, що параметр потоку КЗ $\omega_{KZ} = const$ визначається [13]

$$P_{KZ}(\Delta t) = 1 - e^{-\omega_{KZ} \Delta t}. \qquad (1)$$

Величині $P_{KZ}(\Delta t)$, котра розрахована за формулою (1) відповідає ділянка числового інтервалу [0...1] з початком в точці 0, а кінець – в точці з координатою $P_{KZ}(\Delta t)_i$. Імовірність попадання в інтервал $[0, P_{KZ}(\Delta t)]$ згенерованого випадкового числа з рівномірним законом розподілу в інтервалі [0...1] дорівнює $P_{KZ}(\Delta t)$. Попадання в процесі генерації випадкового числа у визначений інтервал свідчить про виникнення на інтервалі Δt КЗ (рис. 3).

Складність задачі визначення місця виникнення КЗ на ПЛ потребує використання рівномірного розподілу як при визначенні ПЛ з КЗ так і місця розташування КЗ на ПЛ [14].

Імовірність P_{LK} того, що на конкретній i – й ПЛ даного рівня напруги виникне КЗ визначається [9]:

$$P_{LK_j} = \frac{L_j}{\sum_{j=1}^{M} L_j}, \qquad (2)$$

де L_j – довжина k – ї ПЛ; $\sum_{j=1}^{M} L_j$ – сума довжин всіх ПЛ даного рівня напруги системи.

ПЛ, на якій виникло КЗ визначається шляхом порівняння величини P_{LK_j} з рівномірно розподіленим випадковим числом P_{K_j} в діапазоні (0, 1) за умови пропорційності кількості КЗ по всій довжині ЛЕП.

За умови, що місце виникнення КЗ на ЛЕП має рівномірно розподілену імовірність, визначення частки довжини пошкодженої ЛЕП моделюється з допомогою рівномірно розподілених випадкових чисел p_{rk} між 0 та 1.

Імовірність виникнення певного виду КЗ p_{VID} визначається згідно даних табл. 2 [12], одержаних на основі аналізу статистичних даних по КЗ даної розглядаємої енергосистеми. Оскільки відповідні однофазні і трифазні КЗ є найбільш поширеними та найважчими, то в подальшому доцільно розглядати тільки ці види КЗ.

Таблиця 2 – Статистичні дані імовірності виникнення певного виду КЗ в енергосистемі

Вид КЗ	Частота виникнення КЗ, %
Трифазне КЗ	1,5
Двохфазне КЗ на землю	6,0
Двохфазне КЗ	11,5
Однофазне КЗ	81,0

На величину струмів КЗ в ЕЕС суттєво впливає також рівень навантаження [3]. Можливому діапазону змінення навантаження у вузлах схеми енергосистеми від $S_{H\min}$ до $S_{H\max}$ відповідає величина $\Delta S_H = S_{H\max} - S_{H\min}$. Тоді потужність S_{Hj} в процесі статистичного моделювання стану ЕЕС, якщо P_{S_H} є випадковим рівномірно розподіленим числом між 0 та 1, визначається:

$$S_{Hj} = S_{H\min} + \Delta S_H \cdot P_{S_H}.$$

Алгоритм, який використовується для застосування описаної раніше методики, показаний на рис. 4.

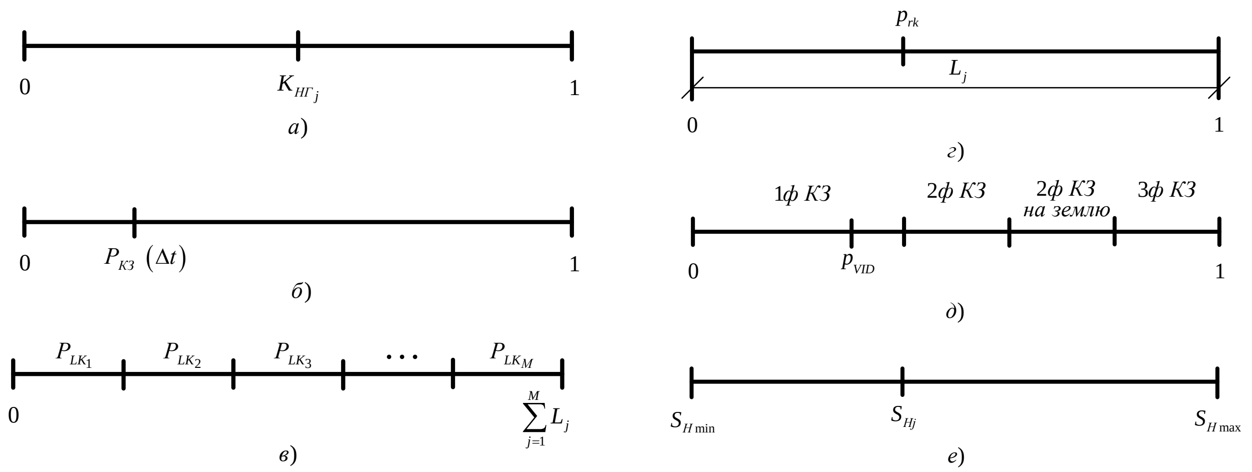


Рисунок 3 – Імовірнісні інтервали для визначення кількісних характеристик факторів впливу на імовірність і рівень струмів КЗ в елементах електричної мережі: а) – топології електричній мережі; б) – середньої інтенсивності КЗ в електричній мережі; в) – імовірності виникнення КЗ на даній ЛЕП; г) – місця розташування КЗ на ЛЕП; д) – виду КЗ; е) – рівня генерації і навантаження у вузлах схеми

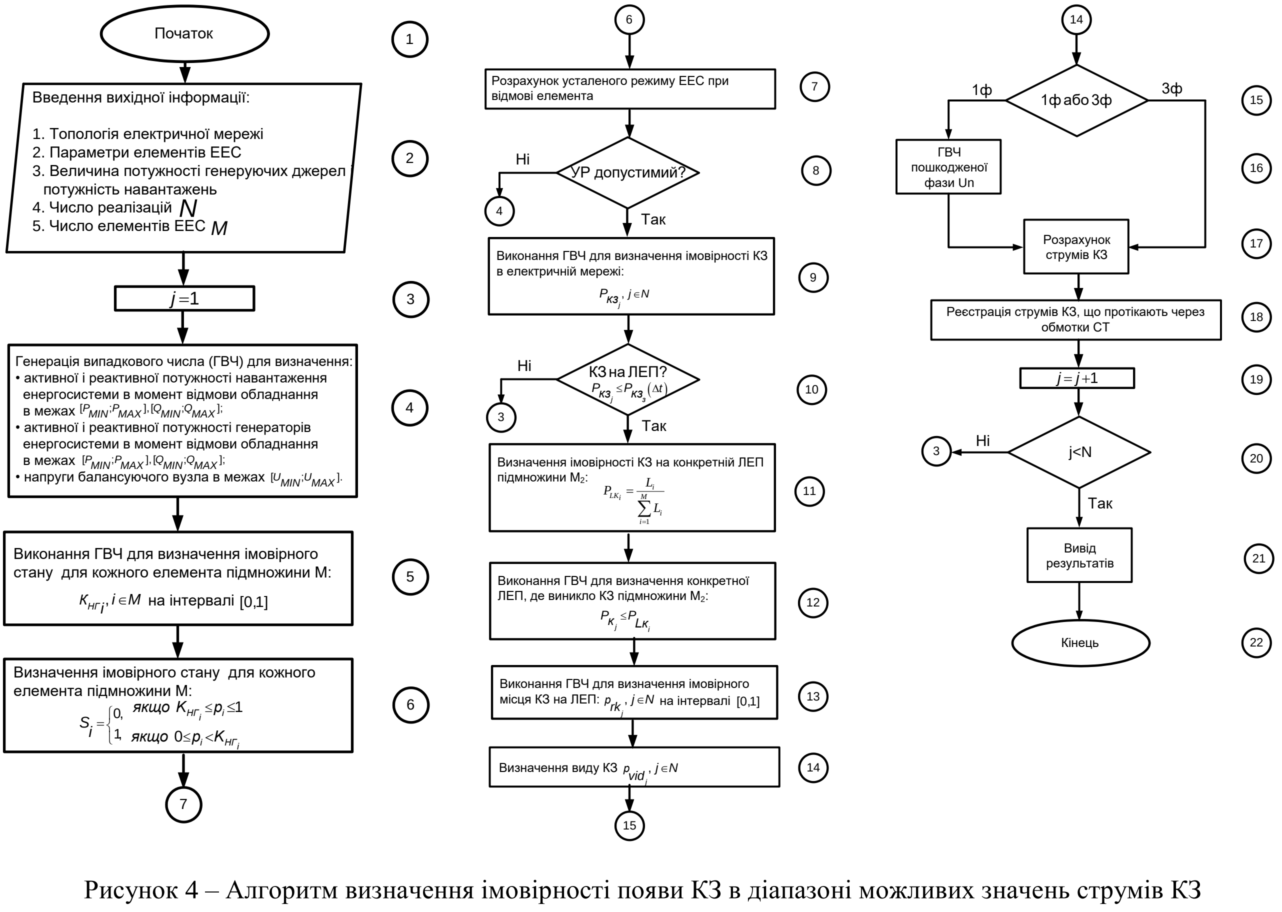


Рисунок 4 – Алгоритм визначення імовірності появи КЗ в діапазоні можливих значень струмів КЗ

Результати тестового моделювання. Досліджуваний трансформатор Т1 працює в електричній мережі еквівалентна заступна схема якої представлена на рис. 5. За результатами поточних випробувань на основі хроматографічного аналізу газів, розчинених в трансформаторній оливі, дефектів не було виявлено. Разом з цим зміна опору КЗ трансформатора ΔZk у порівнянні з результатами попередніх вимірювань становить ΔZk = 2 %. Для оцінки ризику можливої відмови СТ внаслідок пошкодження обмоток при наскрізному КЗ в зовнішній електричній мережі використано програмний комплекс RISK–EEC-CT, який містить програмне забезпечення для оцінки ризику відмови СТ RISK–CT та програмний комплекс розрахунку стаціонарних і нестаціонарних режимів ЕЕС на базі програмного забезпечення DIgSILENT PowerFactory 14.

В розробленому математичному і програмному забезпеченні RISK–EEC-CT імовірнісно-статистичним моделюванням (ІСМ) імітується ви-

падковий процес змінення стану електричної мережі, який визначається станом працездатності її елементів, і зміненням навантаження на розрахунковому інтервалі часу (місяць, квартал) та визначення ПЛ, місця виникнення, виду і величини струму КЗ. При цьому, для кожного стану ЕЕС, пов'язаного з відмовою її елемента, оцінюється можливість нормального режиму функціонування шляхом розрахунку післяаварійного усталеного режиму, визначення потокорозподілу і інших важливих параметрів. Навантаження представлено як детермінованою, так і ймовірнісною моделлю, що враховує випадковий характер змінення електроспоживання.

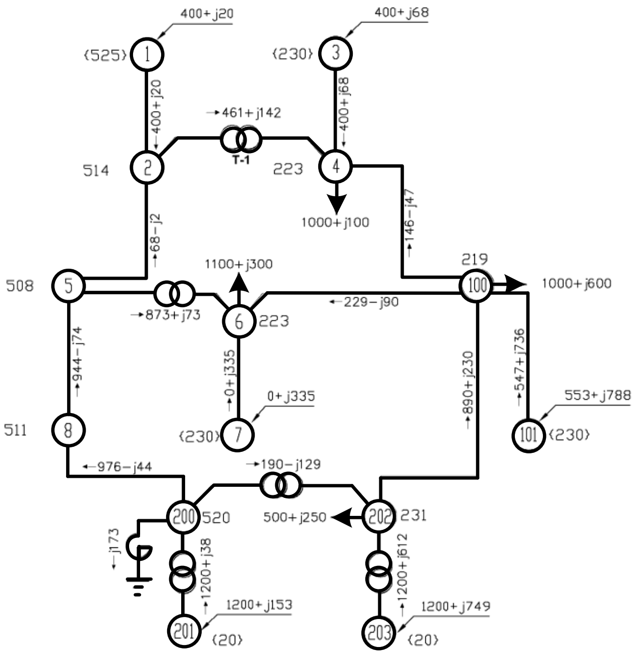
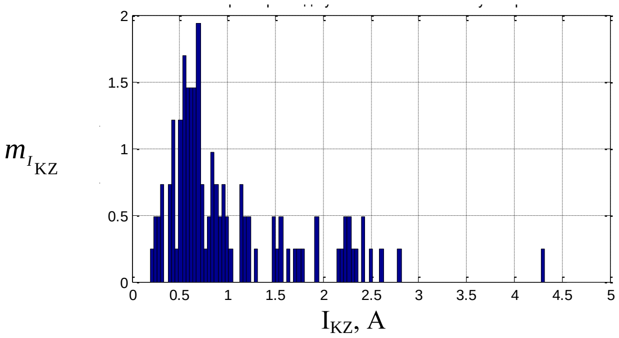


Рисунок 5 – Розрахункова схема тестової шестимашинної моделі підсистеми ЕЕС

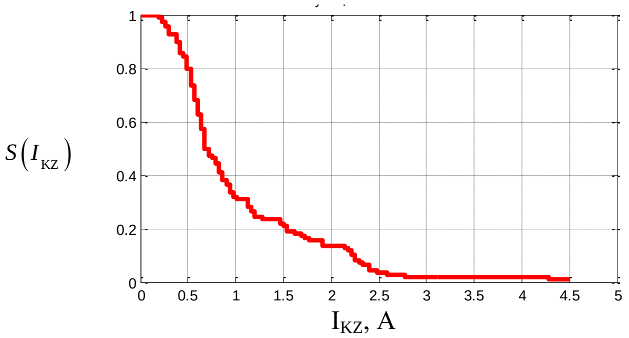
За результатами ІСМ режиму підсистеми з СТ і КЗ в зовнішній електричній мережі будуються гістограми частот струмів КЗ певної величини та формуються функції розподілу імовірностей перевищення значень струмів КЗ в обмотках СТ та їх аналітична апроксимація на окремих ділянках змінення струмів КЗ.

Тестове ІСМ виконувалось на інтервалі часу спостереження $\Delta t = 1$ міс з інтенсивністю потоку КЗ для весняно-літнього періоду $\omega_{\text{KZ}} = 4$ рік$^{-1}$. Гістограми частот $m_{I_{\text{KZ}}}$ наскрізних струмів КЗ в обмотках СТ та функція розподілу імовірностей перевищення значень струмів КЗ $S\left(I_{\text{KZ}}\right)$ з можливого діапазону їх змінення представлена на рис. 6.

Аналіз гістограми показує (рис. 6 а), що за результатами розрахунків імовірність виникнення максимального струму однофазного КЗ в обмотці ВН величиною 4,507 кА становить 0,009, а струм, що має найбільшу відносну частоту $m_{I_{\text{KZ}}} = 1{,}94\%$ дорівнює 0,72 кА з імовірністю перевищення цього значення 0,605.



а)



б)

Рисунок 6 – Характеристики струмів КЗ в обмотках СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі: а) – гістограма частот; б) – функція розподілу імовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці ВН СТ

З використанням в якості вхідних даних значення опору КЗ Zk та отриманих імовірнісних характеристик наскрізних струмів в обмотках ВН СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі за допомогою програмного забезпечення RISK – СТ та нечіткого моделювання в програмному середовищі MatLab за алгоритмом нечіткого логічного висновку Мамдані визначено дефаззіфіковане значення ризику відмови СТ, котре дорівнює 0,649 (рис. 7).

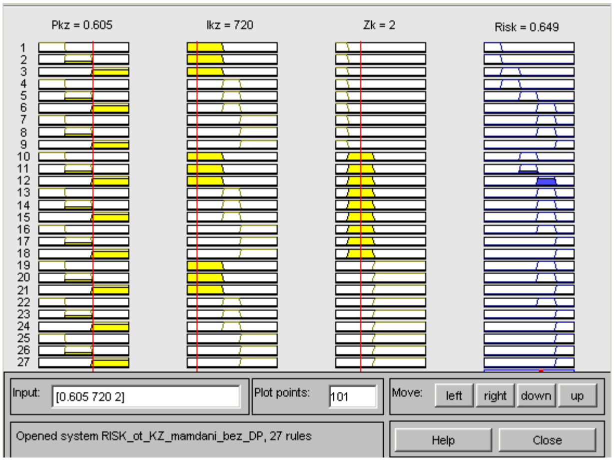


Рисунок 7 – Результати нечіткого моделювання визначення ризику відмови СТ внаслідок зовнішніх КЗ за наявності дефекту обмотки при $I_{\text{KZ}} = 0{,}72$ кА та $S\left(I_{\text{KZ}}\right) = 0{,}605$

ВИСНОВКИ. Для визначення кількісних показників ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС запропонована нечітка модель та програмне забезпечення оцінки ризику відмови СТ внаслідок зовнішніх КЗ за наявності дефекту обмоток. Наведено результати тестового моделювання оцінки технічного стану СТ потужністю 267 МВА та режиму електричної мережі в умовах КЗ на ПЛ в зовнішній електричній мережі.

Результати розрахунків ризику відмови СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі є базовими при визначенні «слабких» місць за найвищою імовірністю появи небезпечних струмів КЗ в обмотках СТ та формуванні превентивних рішень по їх обмеженню.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі: досвід і перспективи України // Пр. ІЕД НАН України: Зб. наук. пр. Спец.вип. – 2011. – С.5–19.

2. Костерєв М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.

3. Бардик Є.І. Моделювання електроенергетичної системи для оцінки ризику виникнення аварій при відмовах електрообладнання // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Електротехніка і енергетика. – 2013. – Вип. 1. – С. 15–22.

4. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.

5. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / ИГЭУ. – Иваново, 2005. – 224 с.

6. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 1. – С. 43–51.

7. Анализ методов оценки ресурса бумажной изоляции силовых трансформаторов / В.Н. Бондарева и др. // Электроэнергетика. – 2009. – № 3. – С. 77–84.

8. CIGRE Working Group A2.18, Guide for Life Management Techniques For Power Transformers, CIGRE Broschure 227, 20 January 2003, CIGRE: Paris, France.

9. Хренников А.Ю. Некоторые вопросы электродинамических испытаний мощных силовых трансформаторов на стойкость токам КЗ // Электричество: Теорет. и науч.-практ. журн. – 2007. – № 12. – С. 15–18.

10. Wilfredo C. Flores, Enrique Mombello, Jose A. Jardini. Fuzzy risk index for power transformer failures due to external short-circuits // Electric Power Systems Research. 04/2009; 79(4):539–549.

11. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLab. – М.: – Телеком, 2007. – 288 с.

12. Неклепаев, Б.Н., Востросаблин А.А. Вероятностные характеристики коротких замыканий в энергосистемах // Электричество. – 1999. – № 8. – С. 15–23.

13. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты енергосистем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

14. Востросаблин А.А., Неклепаев Б.Н., Шунтов А.В. Об эффективности мероприятий по ограничению токов короткого замыкания в основных сетях энергосистем // Известия академии наук. – Энергетика. –№ 4. – 2001. – С. 60–68.

MODELING AND RISK ASSESSMENT OF POWER TRANSFORMER FAILURE IN EXTERNAL POWER GRID UNDER DISTURBANCE CONDITIONS

E. Bardyk, N. Bolotnyi

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua

Purpose. Development of the mathematical model and software for risk assessment of failure of oil power transformer due to short circuit in external electrical network. **Methodology.** Methodology of probabilistic and statistical modeling of stochastic processes in power grid to determine probability characteristics of short circuit currents in power transformer windings due to short circuit in external electrical network were used. Mathematical model based on the use of fuzzy sets for risk assessment of failure of power transformer if defected windings was proposed. **Results.** Complex mathematical model, algorithm and software of risk assessment of failure at defected power transformer windings due to external short circuit were developed. Probability distribution function of values exceeding short circuit currents in power transformer windings used in determining risk of power transformer failure due to external short circuit was obtained. This allows to explore the impact of failure power transformer windings on likelihood of emergency in electric power system and create preventive measures to limit of short-circuit current in power grid. **Originality.** For the first time, an approach and a complex mathematical model of electric power system were proposed for risk assessment of accidents under failure of power transformers due to short circuit in an external electrical network based on the use of fuzzy models of failures of power transformers under poor technical condition of the windings and distribution functions of probabilities of short circuit currents in power grid. **Practical value.** Software “RISK-CT” was developed for risk assessment of failure of oil power transformer based on obtained mathematical models. Results of experimental modeling confirm the effectiveness of the proposed method and model to improve operational reliability of electricity companies and reducing the risk of accidents during failure of electrical equipment. References 14, table 1, figures 7.

Key words: fuzzy model, fuzzy logic, electrical equipment, risk, failure, short-circuit.

REFERENCES

1. Stogniy, B., Kyrylenko, O., Prakhovnik, A., and Denysyuk, S., (2011), " Intelligent electricity networks: experience and prospects of Ukraine", *pratsi IE NASU, Zbirnyk naukovykh prac, Spec.vypusk*, pp.5–19.
2. Kosterev, N. and Bardyk, E. (2011), *Pytanya pobudovy nechitkyh modelei ocinky tekhnichnogo stanu obektiv elektrychnyh system* [The issue of building fuzzy models of evaluating the technical condition of the objects of electrical systems], NTUU «KPI», Kyiv, Ukraine.
3. Bardyk, E. (2013), "Modeling of power system for assessing the risk of accidents at electrical failure", *Naukovi praci Donetskogo nacionalnogo tekhnichnogo universytetu*, *Elektrotekhnika ta energetika*, Vol. 1, pp.15–22.
4. Alekseev, B. (2002), *Kontrol sostoyaniya (diagnostika) krupnyh silovyh transformatorov* [Control of state of power transformers], NC ENAS, Moscow, Russia.
5. Nazarychev, A. and Andreev, D. (2005), *Metody i matematicheskie modeli kompleksnoi ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya* [Methods and mathematical models of complex technical condition assessment of electrical equipment], IGEU, Ivanovo, Russia.
6. Lezhnuk, P., Rubanenko, P. and Zhuk, I. (2005), "Diagnosis of power transformers using fuzzy sets", *Visnyk Vinnytskogo politekhnichnogo institute*, Vol. 1, pp. 43–51.
7. Bondareva, V. (2009), "The analysis methods for assessing the resource paper insulation of power transformers", *Elektroenergetik*, Vol. 3, pp. 77–84.
8. CIGRE Working Group A2.18, Guide for Life Management Techniques For Power Transformers, CIGRE Broschure 227, 20 January 2003, CIGRE: Paris, France.
9. Khrenikov, A. (2007), "Some questions electrodynamic testing large power transformers for resistance short-circuit currents", *Elektrichestvo*, no. 12, pp. 15–18.
10. Flores, W.C., Mombello, E., Jardini, J.A. (2009), "Fuzzy risk index for power transformer failures due to external short-circuits", *Electric Power Systems Research*, iss. 4/2009, no. 79(4), pp. 539–549.
11. Shtovba, S. (2007), *Proektirovanie nechetkih system sredstvami MATLab*, [Design of fuzzy systems means MATLab], *Telekom*, Moscow, Russia.
12. Neklepaev, B. and Vostrosablin, A. (1999), "Probability characteristics of short circuits in power systems", *Elektrichestvo*, no 8. pp. 15–23.
13. Shalin, A. (2002), *Nadezhnost i diagnostika releinoi zaschity energosistem* [Reliability and diagnostics of the relay protection energosistem], Izdatelstvo NGTU, Novosibirsk, Russia.
14. Neklepaev, B. and Vostrosablin, A. (2001), "The effectiveness of measures to limit short-circuit currents in the core networks of power supply", *Izvestie akademii nauk, Energetika*, no. 4, pp. 60–68.

Стаття надійшла 11.09.2015.