

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.2.236952>

УДК 621.311

Є.І. Бардик, М.П. Болотний, Я.С. Коваль

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: yaroslavkova24@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ “СЛАБКІХ” ЗА НАДІЙНІСТЮ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ВІДМОВИ ЧЕРЕЗ ЗБУРЕННЯ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Проблематика. Збільшення інтенсивності технологічних порушень і серйозності їх наслідків переважно спричинене старінням і вичерпанням ресурсу працездатності електрообладнання (ЕО), лібералізацією електроенергетичної галузі. Це загострює проблему надійності електроенергетичних систем (ЕЕС) і потребує визначення елементів енергосистем, що мають найбільшу ймовірність відмови, а також тих, відмови чи планове виведення з експлуатації яких максимально підвищує ризик порушення режиму з можливим каскадним розвитком аварій. Тому актуально розробити моделі оцінювання ризику відмови обладнання за діагностуванням його технічного стану, зокрема за короткого замикання (КЗ) в зовнішній мережі.

Мега дослідження. Розробити нечітку математичну модель силового трансформатора (СТ) для визначення ймовірності відмови за дефекту обмоток і дії КЗ у зовнішній мережі; визначити ризик порушення режиму за виведення трансформаторів із роботи.

Методика реалізації. Використання підходів, які ґрунтуються на теорії нечітких множин і нечіткої логіки, для розроблення математичної моделі оцінювання ризику відмови СТ. Визначення “слабких” за надійністю СТ та автотрансформаторів (АТ) енергосистем за результатами оцінювання ризику відмови через зовнішні КЗ здійснено методами нечіткої логіки та ймовірно-статистичного моделювання режиму ЕЕС.

Результати дослідження. Доведено необхідність комплексного моделювання режимів ЕЕС для оцінювання ймовірності відмови СТ за збурень в електричній мережі. Змодельовано технічний стан обмоток СТ і досліджено вплив КЗ на рівень працездатності СТ й АТ в ЕЕС. Визначено кількісні показники ризику експлуатації ЕЕС за відключення СТ.

Висновки. Для визначення кількісних показників ризику порушення режиму ЕЕС розроблено лінгвістичну математичну модель оцінювання ймовірності відмови обмоток СТ за дефекту та дії КЗ в електричній мережі.

Ключові слова: нечітка логіка; надійність електрообладнання; оцінювання ризику; силові трансформатори.

Вступ

Аналіз функціонування енергосистем України та інших промислово розвинених країн показує стійку тенденцію до зростання кількості порушень електропостачання важливих енергетичних об'єктів, що спричинює значні збитки [1]. Збільшення інтенсивності технологічних порушень і важкості їх наслідків зумовлені старінням і вичерпанням ресурсу працездатності ЕО, погіршенням кліматичних умов, напруженими умовами роботи персоналу й іншими причинами організаційного характеру.

Це загострює проблему надійності ЕЕС і потребує визначення елементів енергосистем, що мають найбільшу ймовірність відмови, а також тих, відмови чи планове виведення з експлуатації яких супроводжує максимальний ризик порушення режиму з можливим каскадним розвитком аварій [1, 2].

Забезпечення надійності чинних ЕЕС потребує як визначення ймовірності виникнення

найбільш небезпечних збурень в енергосистемі для планування заходів їх обмеження, так й оцінювання ризику порушення режиму ЕЕС за невідновлюваних відмов “найслабшого” за надійністю ЕО. Відмова електрообладнання для ЕЕС є збуренням, яке може спричинити порушення режиму ЕЕС із можливим каскадним розвитком у ній.

Можна вирішити ці задачі, якщо створити адекватні моделі оцінювання технічного стану, визначення ресурсу працездатності та прогнозування термінів можливих відмов обладнання, а на основі комплексного моделювання режимів ЕЕС розрахувати кількісні показники ризику її експлуатації [2].

Нині СТ є одними з найбільш відповідальних і вартісних елементів основного електрообладнання сучасних ЕЕС, рівень функціонування яких визначає дієвість самої ЕЕС. Збільшення частки СТ із терміном експлуатації понад 25–30 років підвищує ризик їх використання та потребує оперативного аналізу режимної надійності

за відключення СТ і розробки відповідних моделей відмов як унаслідок незадовільного технічного стану, так і за збурень у зовнішній мережі [2, 14, 18].

Питання діагностування технічного стану силових трансформаторів розглядали в багатьох роботах [2, 5, 6, 8–13]. У [7] визначено інтегральний показник технічного стану за результатами комплексу вимірювань і випробувань. У [2, 5, 6, 14] вирішувались задачі визначення індексу технічного стану, ідентифікацію та рівень розвитку дефекту в умовах детермінованого, ймовірного та нечіткого характеру інформації.

Питання оцінювання ризику відмови СТ за дефекту в окремих функціональних вузлах СТ розглядали в [13]. Кількісні показники ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС імовірно-статистичним моделюванням режиму енергосистеми за відмов ЕО подано в [10, 15]. Однак питання діагностування технічного стану, ідентифікації дефектів і визначення ризику відмови СТ в умовах нечіткої інформації та комплексного моделювання технічного стану СТ і режимів ЕЕС досі невирішене.

Комплексне оцінювання технічного стану СТ зазвичай включає діагностування стану обмотки, магнітопроводу, твердої ізоляції, трансформаторної оливи, системи охолодження, високовольтних вводів, бака, контактних з'єднань, системи регулювання під навантаженням [1, 2, 5].

У задачах оцінювання ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС за відмов ЕО, коли СТ розглядають як елемент складної багатомашинної системи, доцільно аналізувати технічний стан функціональних вузлів, які є найбільш значущими з погляду впливу на ризик відмови СТ. Насамперед це стосується обмоток СТ, які зазнають впливу зовнішніх КЗ найбільше, а їх невідновлювана відмова зазвичай призводить до заміни СТ. Важливо також визначити одиниці та групи, що можуть бути пошкоджені під час КЗ. Це дасть можливість сформулювати превентивні заходи мінімізації експлуатаційного ризику.

У межах цієї роботи вивчено питання моделювання й оцінювання ризику відмови СТ, пов'язаного з одночасним вичерпанням ресурсу паперової ізоляції, зниженням ступеню її полімеризації, наявністю значних деформацій обмоток і дії струмів КЗ у зовнішній електричній мережі.

Постановка задачі

Розробити математичну модель оцінювання технічного стану обмоток СТ і ранжувати їх за надійністю за результатами кількісного оцінювання ризику відмови через КЗ у зовнішній електричній мережі.

Математична модель ЕО для оцінювання ризику відмови за наявності дефекту та збурень у зовнішній електричній мережі

Відмова об'єкта може виникнути внаслідок незадовільного технічного стану окремих функціональних вузлів, дії зовнішніх збурень, а також за поєднання цих подій.

Технічний стан обмоток СТ характеризують зношенням виткової ізоляції та небезпечними деформаціями. Останні спричинені великими струмами наскрізних КЗ, несинхронними включеннями синхронних генераторів і пусковими струмами електродвигунів власних потреб.

Ресурс СТ, якщо немає дефектів, значною мірою визначається ресурсом паперової ізоляції, зокрема ступенем полімеризації паперу [17]. Ресурс паперової виткової ізоляції обмоток вважається вичерпаним, коли ступінь полімеризації паперу знижується від 1000–1300 од. (на початку експлуатації) до 200–250 од.

У [17] змодельовано й оцінено ризик відмови обмоток СТ за КЗ в електричній мережі та визначено технічний стан обмоток на основі як ступеню полімеризації ізоляції, так і виміряних значень опору КЗ.

Дії струмів КЗ спричинюють небезпечні деформації обмоток, що їх визначають на основі вимірювання опору КЗ Z_k . Задачу визначення ресурсу СТ за складного характеру розвитку деградаційних процесів в ізоляції обмоток і значної кількості факторів, що впливають на технічний стан СТ, важко формалізувати; вона потребує використання кількісної та якісної вхідної інформації.

Неможливість визначати ризик відмови СТ за зовнішніх КЗ на основі аналітичних моделей потребує підходу, що ґрунтується на експертних оцінках і теорії нечітких множин під час побудови цих моделей відмов [2, 13, 14].

Як вхідні лінгвістичні змінні нечіткої моделі оцінювання ризику відмови СТ за зовнішніх КЗ, відповідно до загальних підходів [14, 17], використаємо такі: ΔZ_k – ступінь деформації обмоток: $A_1 = \{T_{L1}, T_{M1}, T_{B1}\}$; DP – ступінь по-

лімеризації ізоляції обмоток: $A_2 = \{T_{L2}, T_{M2}, T_{B2}\}$; P_{KZ} – імовірність виникнення струму в обмотках СТ за зовнішнього КЗ: $A_3 = \{T_{L3}, T_{M3}, T_{B3}\}$; P_{IKZ} – величина аварійного наскрізного струму КЗ, що проходить через обмотки СТ: $A_4 = \{T_{L4}, T_{M4}, T_{B4}\}$, де T_{Li}, T_{Mi}, T_{Bi} – “низьке”, “середнє”, “високе” значення параметрів СТ і мережі відповідно.

За вихідну лінгвістичну змінну нечіткої моделі взято ризик R_{KZ} відмови СТ за зовнішніх КЗ із термами: $A_5 = \{T_{VL5}, T_{L5}, T_{M5}, T_{B5}, T_{VB5}\}$, де $T_{VL5}, T_{L5}, T_{M5}, T_{B5}, T_{VB5}$ – “дуже низьке”, “низьке”, “середнє”, “високе”, “дуже високе” значення ризику відмови СТ відповідно. Функції належності вхідних і вихідної лінгвістичних змінних наведено на рис. 1.

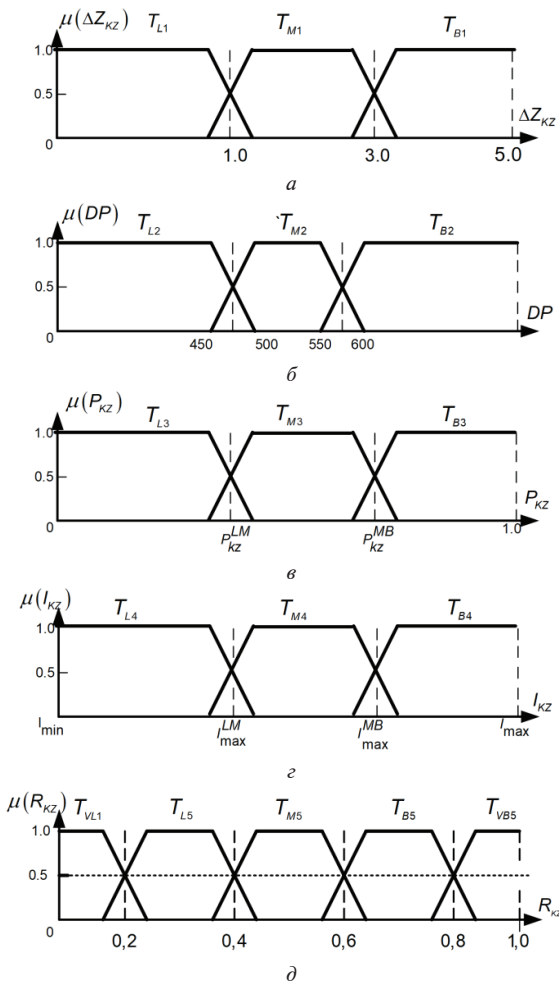


Рис. 1. Функції належності терм-множин вхідних і вихідної лінгвістичної змінних: рівень деформації обмотки (а); ступінь полімеризації ізоляції (б); наскрізний струм КЗ (в); ймовірність наскрізного струму в обмотках СТ (г); ризик відмови СТ за КЗ у зовнішній електричній мережі (д)

Базу правил (81 продукційне правило) оцінювання ризику відмови СТ під час КЗ у зовнішній електричній мережі за деформацій обмоток і зниження ступеня полімеризації обмоток наведено в табл. 1.

Таблиця 1. База правил оцінювання ризику відмови СТ під час дії струмів зовнішніх КЗ R_{KZ}

Pkz = T_{L3}; P_ikz = T_{L4}				Pkz = T_{B3}; P_ikz = T_{B4}			
DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}	DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}
ΔZk				ΔZk			
T_{L1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{L1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{B5}
T_{M1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{M1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{B5}
T_{B1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{B1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{VB5}

Pkz = T_{M3}; P_ikz = T_{M4}				Pkz = T_{L3}; P_ikz = T_{M4}			
DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}	DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}
ΔZk				ΔZk			
T_{L1}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}	T_{L1}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}
T_{M1}	T_{B5}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M1}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}
T_{B1}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{B5}	T_{B1}	T_{B5}	T_{B5}	T_{B5}

Pkz = T_{M3}; P_ikz = T_{L4}				Pkz = T_{L3}; P_ikz = T_{B4}			
DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}	DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}
ΔZk				ΔZk			
L_1	T_{VB5}	T_{M5}	T_{M5}	L_1	T_{M5}	T_{L5}	$T_{V:5}$
M_1	T_{VB5}	T_{B5}	T_{M5}	M_1	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}
B_1	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{VB5}	B_1	T_{VB5}	T_{B5}	T_{B5}

Pkz = T_{B3}; P_ikz = T_{L4}				Pkz = T_{M3}; P_ikz = T_{B4}			
DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}	DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}
ΔZk				ΔZk			
T_{L1}	T_{B5}	T_{B5}	T_{M5}	T_{L1}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}
T_{M1}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{B5}	T_{M1}	T_{B5}	T_{B5}	T_{B5}
T_{B1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{B1}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{B5}

Pkz = T_{B3}; P_ikz = T_{M4}			
DP	T_{L2}	T_{M2}	T_{B2}
ΔZk			
T_{L1}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{M5}
T_{M1}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{B5}
T_{B1}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{VB5}

Алгоритм комплексного моделювання режиму ЕЕС для оцінювання ризику порушення режиму за відмов ЕО

Завданням комплексного моделювання в роботі є визначення ризику порушення режиму ЕЕС на заданому інтервалі часу Δt за відмов ЕО внаслідок незадовільного технічного стану і дії збурень у зовнішній електричній мережі. Для цього реалізовано обчислювальний процес із використанням методу статистичного моделювання. На рис. 2 показано схему статистичного моделювання підсистеми ЕЕС за випадкових відмов ЕО чи зовнішніх КЗ.

Цей алгоритм подано для випадку, коли множина аварійних ситуацій складається з порушення динамічної стійкості ЕЕС.

Результати моделювання режиму ЕЕС і технічного стану СТ для визначення кількісних показників ризику порушення режиму

Для оцінювання ризику відмови СТ за порушення режиму ЕЕС унаслідок КЗ виконано комплексне моделювання технічного стану СТ і режимів ЕЕС. Схему досліджуваної енергосистеми, що містить ТЕЦ № 1 потужністю 210 МВт, ТЕЦ № 2 потужністю 500 МВт, ТЕЦ № 3 потужністю 250 МВт, ТЕЦ № 4 потужністю 700 МВт, ТЕС № 1 потужністю 1800 МВт, ГЕС № 1 потужністю 444 МВт наведено на рис. 3. Визначе-

ні на основі моніторингу параметри технічного стану, інтенсивності відмов, основного силового та комутаційного обладнання, повітряних ліній електропередачі, а також потужності генераторів електростанцій і вузлів навантаження відповідають чинній підсистемі в складі ЕЕС України.

Оцінювання стану парку СТ Т-1–Т-4 та автотрансформаторів АТ-1–АТ-16 показало значний рівень зношення ізоляції та деформації обмоток в автотрансформаторах АТ-1–АТ-5. Для умов вихідного нормального режиму роботи ЕЕС виконано розрахунки й оцінювання ризику відмови АТ-1–АТ-5 за КЗ у зовнішній електричній мережі.

Статистичним моделюванням із використанням програмного забезпечення “RISK-ЕЕС-СТ” визначено ймовірнісні характеристики наскрізних струмів короткого замикання СТ для можливого діапазону небезпечних струмів КЗ в обмотках й отримано величини відносних частот виникнення струмів КЗ; побудовано гістограми відносних частот виникнення струмів КЗ і функції розподілу ймовірності перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотках високої напруги автотрансформаторів АТ-1–АТ-5 за КЗ у зовнішній електричній мережі на інтервалі часу спостереження $\Delta t = 3$ місяці. За поданою нечіткою моделлю з використанням нечіткого логічного виведення Мамдани визначені максимальні значення ризику відмови СТ для фіксованих виміряних значень DP і ΔZK , можливих сполучень значень струмів КЗ в обмотках та ймовірностей їх перевищень. Результати наведено на рис. 4-8 і в табл. 2.

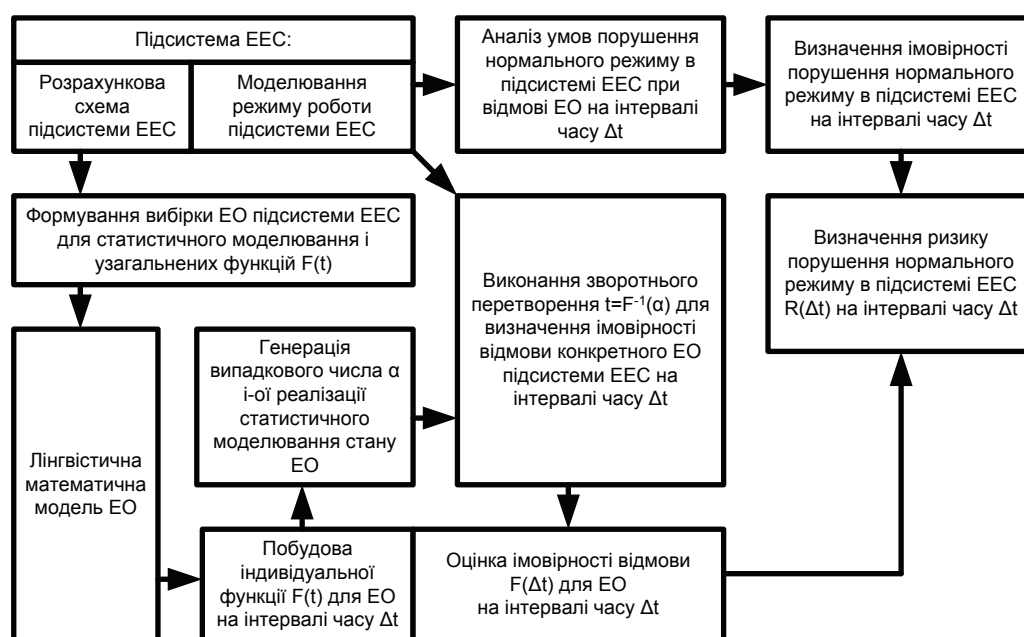


Рис. 2. Структура алгоритму визначення ризику порушення режиму ЕЕС за відмов ЕО

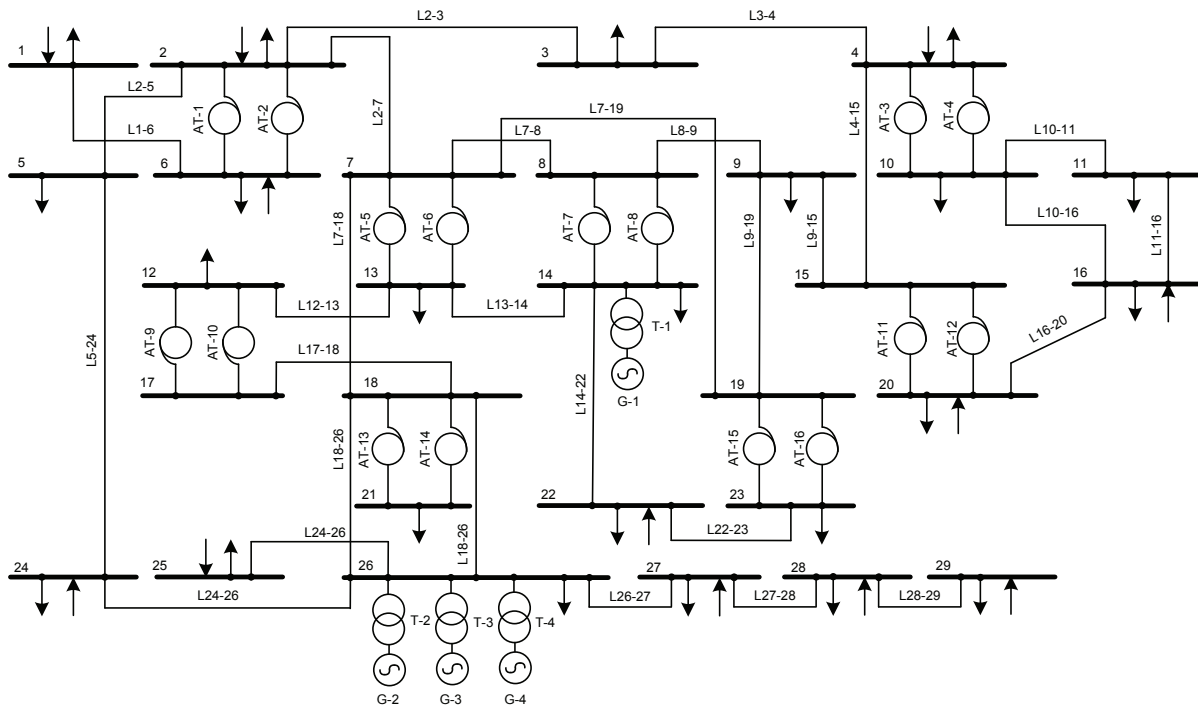


Рис. 3. Розрахункова схема тестової моделі ЕЕС

Для вказаної схеми ЕЕС (рис. 3) задля визначення ймовірнісних складників ризику відмови окремих елементів (високовольтних викиачів, СТ і ліній електропередачі) та ризику порушення режиму системи під час виведення з роботи автотрансформаторів АТ-1–АТ-5 для

різних середньоквартальних значень сумарного навантаження обраховано 1000 режимів із використанням алгоритму ймовірнісно-статистичного моделювання. Отримані результати зведено в табл. 3 і 4.

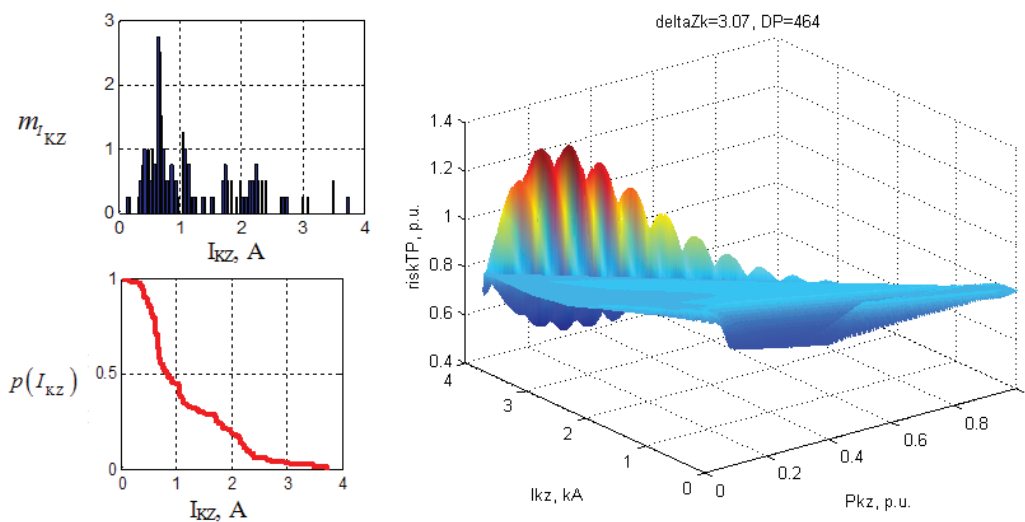


Рис. 4. Гістограми частот значень струмів КЗ (а), функція розподілу ймовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці високої напруги за КЗ у зовнішній електричній мережі (б) та можливі значення ризику відмови riskTP залежно від DP, ΔZk (в) для автотрансформатора АТ-1.

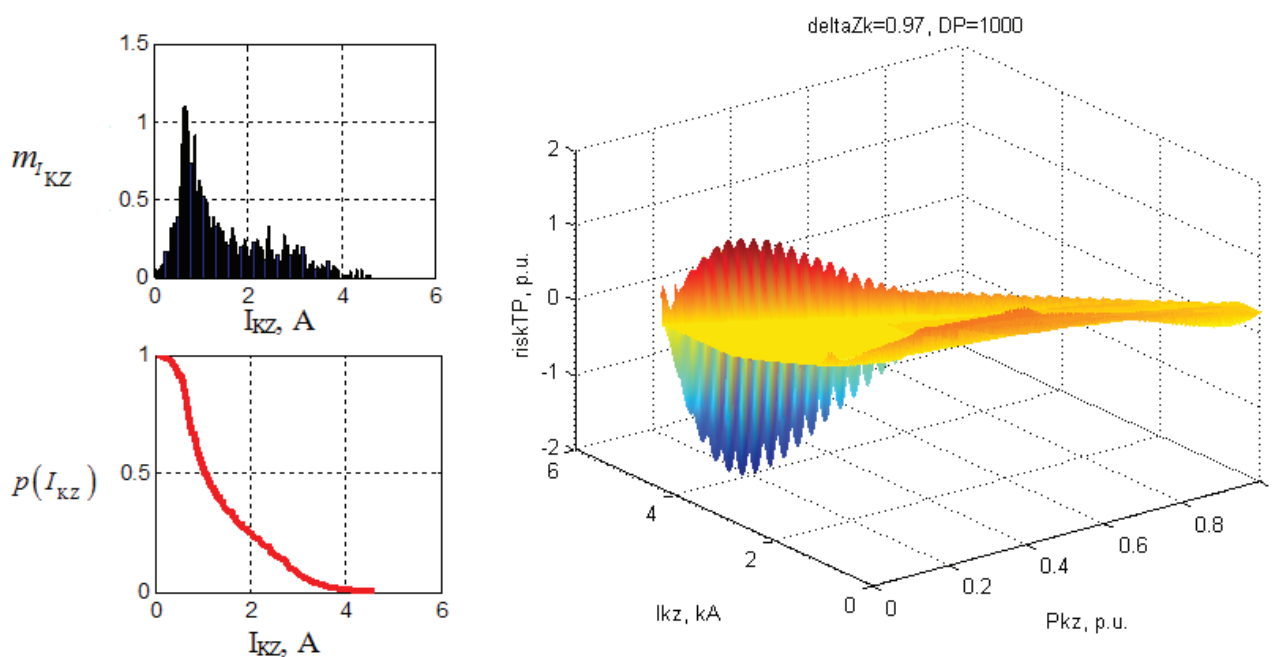


Рис. 5. Гістограми частот значень струмів КЗ (а), функція розподілу ймовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці високої напруги за КЗ у зовнішній електричній мережі (б) та можливі значення ризику відмови $risk_{TP}$ залежно від DP , ΔZk (в) для автотрансформатора АТ-2.

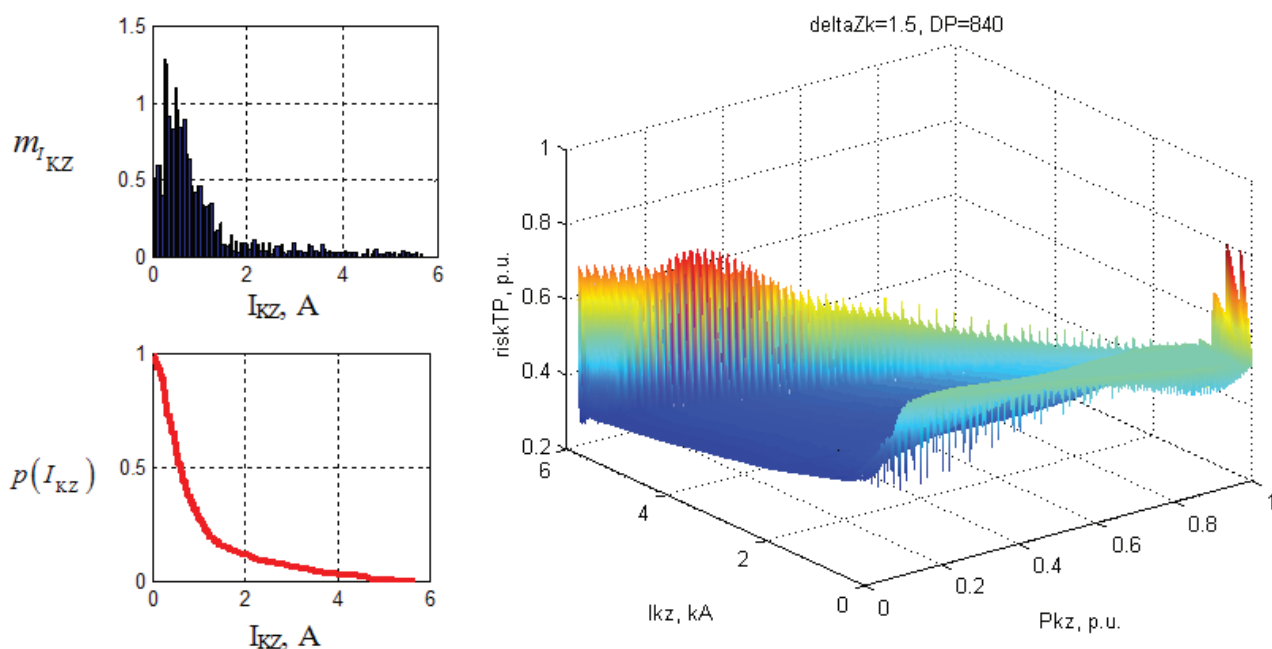


Рис. 6. Гістограми частот значень струмів КЗ (а), функція розподілу ймовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці високої напруги за КЗ у зовнішній електричній мережі (б) та можливі значення ризику відмови $risk_{TP}$ залежно від DP , ΔZk (в) для автотрансформатора АТ-3.

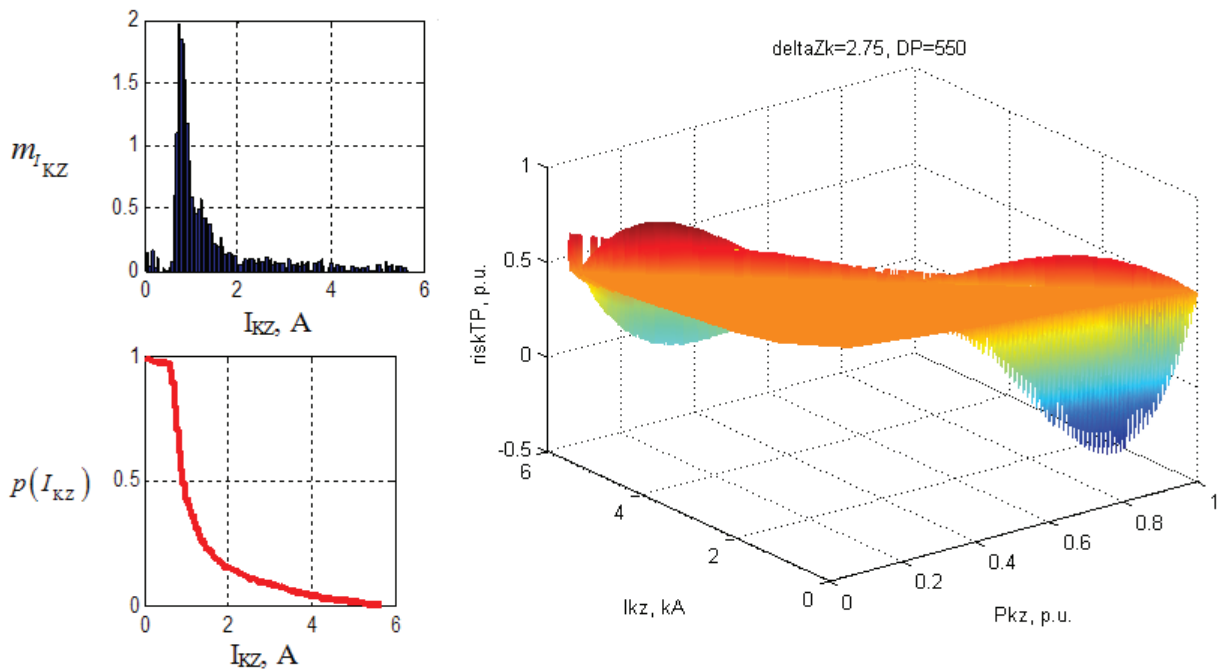


Рис. 7. Гістограми частот значень струмів КЗ (а), функція розподілу ймовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці високої напруги за КЗ у зовнішній електричній мережі (б) та можливі значення ризику відмови $risk_{TP}$ залежно від $DP, \Delta Zk$ (в) для автотрансформатора АТ-4.

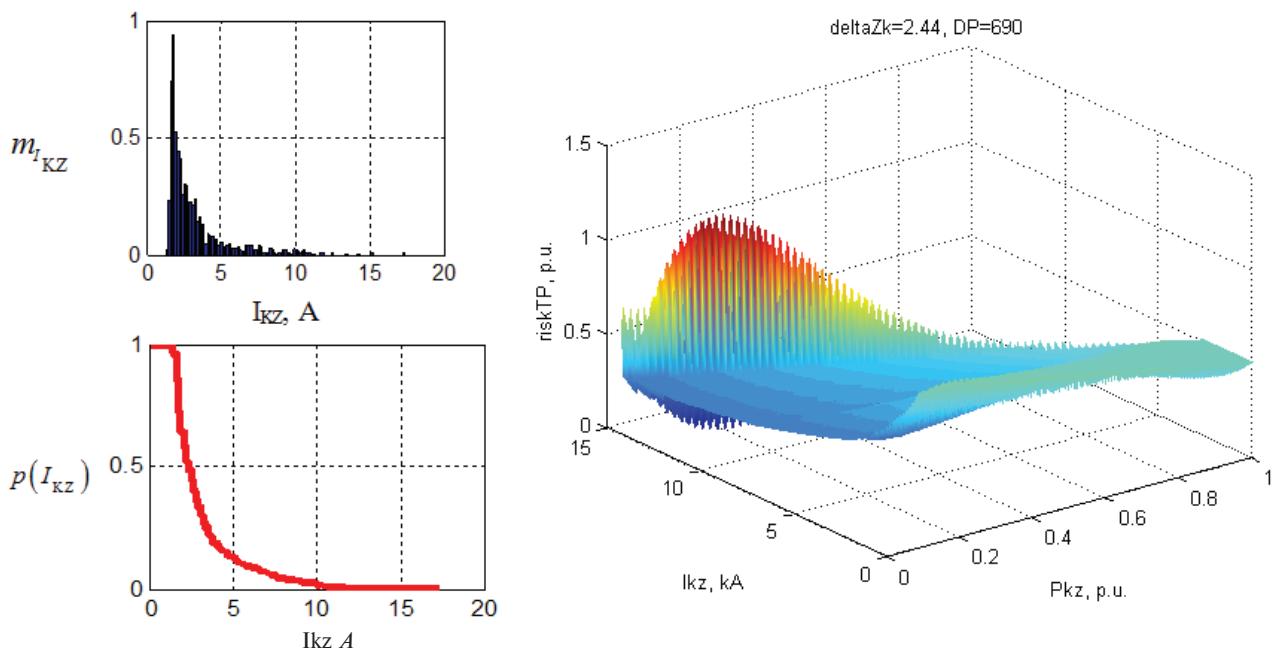


Рис. 8. Гістограми частот значень струмів КЗ (а), функція розподілу ймовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці високої напруги за КЗ у зовнішній електричній мережі (б) та можливі значення ризику відмови $risk_{TP}$ залежно від $DP, \Delta Zk$ (в) для автотрансформатора АТ-5.

Таблиця 2. Результати моделювання ризику відмови СТ за дефекту обмоток під час зовнішнього короткого замикання в ЕЕС

Параметри моделювання	АТ-1	АТ-2	АТ-3	АТ-4	АТ-5
Діапазон максимальних струмів однофазного КЗ в обмотці високої напруги силового трансформатора I_{kz} , кА	4,837	4,607	5,684	5,675	17,372
Імовірність перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці високої напруги силового трансформатора $P(I_{kz})$, відносні одиниці	$6,23 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-15}$	$4,44 \cdot 10^{-16}$	$6,6 \cdot 10^{-16}$
Зареєстроване значення зміни опору КЗ обмотки високої напруги ΔZ_k , %	3,07	0,97	1,5	2,75	2,44
Зареєстроване значення ступеню полімеризації DP, од.	464	1000	840	550	690
Ризик відмови силового трансформатора за КЗ у зовнішній електричній мережі ЕЕС RiskTP, відносні одиниці	0,649	0,274	0,332	0,196	0,321

Таблиця 3. Імовірнісні складники ризику порушення режиму тестової схеми ЕЕС (виведення з роботи автотрансформаторів АТ-1) за відмов ЕО на інтервалі часу спостереження $\Delta t = 3$ міс.

№ з/п.	Елемент, що відмовив	К-сть відмов внаслідок збурення	К-сть відмов внаслідок відключення гілки	К-сть відмов через перевантаження	Загальна к-сть відмов	Імовірність відмови внаслідок збурення	Імовірність відмови внаслідок відключення гілки	Імовірність відмови через перевантаження	Ризикпорушення режиму за відмови елементу на інтервалі часу
1	L1-6	5	0	0	5	0,025	0	0	0,025
2	L2-3	5	0	0	5	0,025	0	0	0,025
22	B18	8	0	0	8	0,04	0	0	0,04
67	АТ-11	3	0	0	3	0,015	0	0	0,015
142	T-4	1	0	0	1	0,005	0	0	0,005

Таблиця 4. Результати моделювання ризику порушення режиму в ЕЕС за виведення автотрансформаторів АТ-1–АТ-5 із експлуатації

Інтервали часу спостереження	Вибірка силових трансформаторів в ЕЕС, які підлягають виведенню з експлуатації				
	АТ-1	АТ-2	АТ-3	АТ-4	АТ-5
I	0,635	0,281	0,117	0,134	0,162
II	0,105	0,145	0,088	0,143	0,127
III	0,080	0,133	0,085	0,143	0,116
IV	0,271	0,152	0,104	0,134	0,151

Результати розрахунків ризику відмови силових трансформаторів за КЗ у зовнішній електричній мережі є базовими для визначення “слабких” за надійністю СТ і місць із найвищою ймовірністю появи небезпечних струмів КЗ в обмотках СТ [19].

Висновки. 1. Проаналізовано умови функціонування ЕО та сучасних ЕЕС, сформульовано завдання оцінювання режимної надійності ЕЕС методами теорії ризику.

2. Запропоновано математичну модель СТ для оцінювання суб’єктивної ймовірності відмови за дефекту обмоток на основі якісної інформації.

3. Розроблено алгоритм оцінювання ризику порушення режиму ЕЕС за відмов ЕО внаслідок збурень (КЗ) у зовнішній електричній мережі.

4. Проведено комплексне моделювання режиму підсистеми ЕЕС для визначення кількісних показників ризику відмови СТ й автотрансформаторів за короткого замикання в електричній мережі та порушення режиму ЕЕС під час виведення СТ й автотрансформаторів із роботи.

5. Подальші дослідження буде спрямовано на створення системи підтримки прийняття рішень щодо формування превентивних дій з обмеження небезпечних струмів КЗ в ЕЕС і рекомендацій щодо виводу СТ у ремонт згідно з плановим графіком ремонтів енергокомпанії.

References

- [1] J. Silva *et al.*, “The challenges of estimating the impact of distributed energy resources flexibility on the TSO/DSO boundary node operating points,” *Comput. Operat. Res.*, vol. 96, pp. 294–304, 2018. doi: 10.1016/j.cor.2017.06.004
- [2] M.V. Kosterev *et al.*, “Preventive risk-management of power system for its reliability increasing,” *WSEAS TRANS. POWER SYST.*, vol. 10. pp. 251–258, 2015.
- [3] H.H. Alhelou *et al.*, “A Survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges,” *Energies*, vol. 12, no. 4, pp. 1–28, 2019. doi: 10.3390/en12040682
- [4] Y. Shiwen *et al.*, “Review on risk assessment of power system,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 109, pp. 1200–1205, 2017. doi: 10.1016/j.procs.2017.05.399
- [5] M.V. Kosterev *et al.*, *The issue of constructing fuzzy models for assessing the technical state of objects of electrical systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2011. 148 p.
- [6] R.M.A. Velasquez and J.V.M. Lara, “Expert system for power transformer diagnosis,” in *2017 IEEE XXIV Int. Conf. on Electronics, Electrical Engineering and Computing*, Cusco, Peru, 15–18 August 2017, 2017. doi: 10.1109/intercon.2017.8079640
- [7] D. Lin *et al.*, “A risk assessment method of transformer considering the economy and reliability of power network,” in *2017 1st Int. Conf. on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, Xi’an, China, 14–17 May 2017. doi: 10.1109/icempe.2017.7982167
- [8] A.M. Leite da Silva *et al.*, “Transmission expansion planning: A discussion on reliability and “N–1” security criteria,” in *2010 IEEE 11th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Singapore, 14–17 June 2010. doi: 10.1109/pmaps.2010.5528652
- [9] E. Handschin *et al.*, “Long term optimization for risk-oriented asset management,” in *16th Power Systems Computation Conf.*, Glasgow, Scotland, 2008.
- [10] S.A.V. Goerdin *et al.*, “Monte Carlo simulation applied to support risk-based decision making in electricity distribution networks,” in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 29 June–2 July 2015 2015. doi: 10.1109/ptc.2015.7232494
- [11] E. Duarte *et al.*, “A practical approach to condition and risk based power transformer asset replacement,” in *2010 IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, San Diego, CA, USA, 6–9 June 2010. doi: 10.1109/elinsl.2010.5549580
- [12] B. Wang *et al.*, “A new MOPSO to solve a multi-objective portfolio selection model with fuzzy value-at-risk,” in *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, pp. 217–226. doi: 10.1007/978-3-642-23854-3_23
- [13] H. Yang *et al.*, “A novel method of decision-making for power transformer maintenance based on failure-probability-analysis,” *IEEE Trans. Elect. Electron. Eng.*, vol. 13, no. 5, p. 689–695, 2018. doi: 10.1002/tee.22618
- [14] E. Bardyk and N. Bolotnyi, “Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data,” *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, vol. 6, no. 8 (90), pp. 4–10, 2017. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118632
- [15] T. L. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process,” *Int. J. Services Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 83–98, 2008. doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
- [16] E.I. Bardyk, “Modelling and assessment of chances of failure of power systems electrical equipment taking into account the after repair resource restoration level,” *Sci. Bulletin National Mining University*, no. 3, pp. 82–90, 2014.
- [17] E.I., Bardyk and N.P. Bolotnyi, “Electric power system simulation for risk assessment of power transformer failure under external short-circuit conditions,” in *2017 IEEE First Ukraine Conf. Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 29 May–2 June 2017. doi: 10.1109/ukrcon.2017.8100527
- [18] E.I. Bardyk, “Models of reliability assessing of electricity supply of auxiliary NPP from external sources with fuzzy defined parameters of failures of equipments,” *Proc. Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine*, Kyiv, Ukraine, 2014, pp. 34–38.
- [19] E. Bardyk and N. Bolotnyi, “Development of a mathematical model for cost distribution of maintenance and repair of electrical equipment,” *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, vol. 6, no. 8 (96), pp. 6–16, 2018. doi: 10.15587/1729-4061.2018.147622

Е.И. Бардик, Н.П. Болотный, Я.С. Коваль

ОПРЕДЕЛЕНИЕ “СЛАБЫХ” ПО НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОЦЕНКИ РИСКА ОТКАЗА ИЗ-ЗА ВОЗМУЩЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Проблематика. Увеличение интенсивности технологических нарушений и тяжести их последствий преимущественно вызвано старением и истощением ресурса работоспособности электрооборудования (ЭО), либерализацией электроэнергетической отрасли. Это обостряет проблему надежности электроэнергетических систем (ЭЭС) и требует определения элементов энергосистем, которые имеют наибольшую вероятность отказа, а также тех, отказы или плановое выведение из эксплуатации которых максимально повышает риск нарушения режима с возможным каскадным развитием аварий. Поэтому актуально разработать

моделей оцінювання ризику відмови обладнання по результатам діагностування його технічного стану, в частині при короткому замиканні (КЗ) во зовнішній мережі.

Цель исследования. Розробити нечітку математичну модель силового трансформатора (СТ) для визначення ймовірності відмови при наявності дефекту обмоток і впливу КЗ во зовнішній мережі; визначити ризик порушення режиму при виводі трансформаторів із роботи.

Методика реализации. Використання підходів, ґрунтованих на теорії нечітких множин і нечіткої логіки, для розробки математичної моделі оцінювання ризику відмови СТ. Визначення “слабких” по надійності СТ енергосистем по результатах оцінювання ризику відмови із-за зовнішніх КЗ здійснено методами нечіткої логіки і ймовірнісно-статистичного моделювання режиму ЕЭС.

Результаты исследования. Обґрунтована необхідність комплексного моделювання режимів ЕЭС для оцінювання ймовірності відмови СТ при впливах у електричній мережі. Проведено моделювання технічного стану обмоток СТ і досліджено вплив КЗ на рівень работоспособності СТ і автотрансформаторів в ЕЭС. Визначені кількісні показники ризику експлуатації ЕЭС при відключенні СТ.

Выводы. Для визначення кількісних показників ризику порушення режиму ЕЭС розроблена лінгвістична математична модель оцінювання ймовірності відмови обмоток СТ при наявності дефекту і дії КЗ в електричній мережі.

Ключевые слова: нечітка логіка, надійність електрообладнання; оцінювання ризику; силові трансформатори.

E.I. Bardik, N.P. Bolotniy, Ya.S. Koval

DETERMINATION OF “WEAK” BY POWER TRANSFORMERS RELIABILITY OF POWER SYSTEMS ACCORDING TO THE RESULTS OF FAILURE RISK ASSESSMENT UNDER EXTERNAL SHORT CIRCUITS

Background. The increase of technological violation intensity and its consequences severity is caused mainly by objectively existing aging and service life depletion of electrical equipment. The power industry liberalization exacerbates the reliable operation problem of the power system and requires identification of power system operation accompanied by the maximum emergency risk with possible cascade accidents development. Therefore, the model development task for assessment of the equipment failure risk based on the diagnostic results of technical condition in particular under short circuit in the external network is relevant today.

Objective. The aim of the work is to develop a fuzzy mathematical model for probability assessment of power transformer failure in the presence of a windings defect, short circuit in external network and emergency risk assessment under power transformers out of service.

Methods. The fuzzy set theory and fuzzy logic were used for developing a mathematical model of risk assessment of power transformer failure. The problems of determining the “weak” in terms of power transformers reliability of power systems based on the results of failure risk assessment due to external short circuits were solved by methods of fuzzy logic and probabilistic-statistical simulation of electric power system modes.

Results. The necessity of complex simulation of electric power system modes is substantiated for probability assessment of power transformer failure under electrical network disturbances. The simulation of technical condition of power transformer windings was carried out. The short circuit influence on operability level of power transformers of electric power system was investigated. The quantitative indicators of operational risk of electric power system were determined under power transformers out of service.

Conclusions. The linguistic mathematical model for estimating the failure probability of power transformer windings in the presence of defect and short circuit in electrical network has been developed to determine the quantitative indicators of emergency risk in power system.

Keywords: fuzzy logic; reliability of electrical equipment; risk assessment; power transformers.

Рекомендована Радою
факультету електроенергетичної та автоматичної
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
17 березня 2021 року

Прийнята до публікації
14 червня 2021 року