

# СЕКЦІЯ 3: ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА УПРАВЛІННЯ НИМИ

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ІМОВІРНОСТІ ВІДМОВИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ В ЕЕС

Бардик Є.І., к.т.н., доц., Болотний М.П., ас., Пустовіт Є.А., Лазарчук І.О., магістранти  
НТУУ «КПІ», кафедра електричних станцій

**Вступ.** Наразі важливим є визначення одиниць електрообладнання ЕЕС, які мають найвищу імовірність відмови і тих, відмови яких можуть призвести до виникнення аварійної ситуації в енергосистемі.

Силкові трансформатори (СТ) сучасних ЕЕС є одними з найвідповідальніших елементів основного електрообладнання ЕЕС від надійності функціонування яких значною мірою залежить надійність складної ЕЕС в цілому [1]. Обмотки СТ в найбільшій мірі піддаються впливам з боку зовнішньої електричної мережі. В першу чергу це стосується коротких замикань, дія котрих в залежності від кількості і величини струмів короткого замикання (КЗ) в обмотках СТ може призвести до їх невідновлювальної відмови [3]. Відмова СТ для ЕЕС є збуренням, яке може спричинити виникнення аварійної ситуації в ЕЕС.

**Постановка задачі.** Найбільш важливими показниками, котрі характеризують рівень технічного стану обмоток СТ є: зношення виткової ізоляції; небезпечні деформації, котрі викликані великими струмами наскрізних КЗ і несинхронними включеннями.

У відповідності з [3] у випадку відсутності розвинутих дефектів ресурс СТ в значній мірі визначається ресурсом паперової ізоляції, котрий залежить від ступені полімеризації паперу.

Другий показник, котрий характеризує можливість відмови СТ є величина небезпечних деформацій обмоток, спричинених дією струмів КЗ і визначається на основі вимірювання опору короткого замикання  $Z_K$ . В рамках даної роботи розглядаються питання моделювання і оцінки ризику відмови СТ, пов'язаного зі зміненням опору КЗ СТ  $\Delta Z_K$ .

В умовах значної кількості факторів, що впливають на ТС СТ і складному характері розвитку деградаційних процесів в ізоляції обмоток. Задача визначення ресурсу є погано формалізуємою і потребує використання якісних оцінок. Необхідність використання як кількісної так і якісної вхідної інформації щодо ТС обмоток СТ і рівня збурень в електричній мережі потребує використання підходу, що ґрунтується на застосуванні експертних оцінок, теорії нечітких множин і нечіткої логіки при побудові даних моделей відмов [1,4].

**Матеріали і результати досліджень.** В якості вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі оцінки ризику відмови СТ при зовнішніх КЗ у

відповідності із загальним підходом [3-6] використаємо наступні:  $\Delta Z_K$  - 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:  $A_3 = \{L_3, M_3, B_3\}$ , 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:  $A_4 = \{VL_4, L_4, M_4, B_4, VB_4\}$ , де  $VL_4, L_4, M_4, B_4, VB_4$  - "дуже низький", "низький", "середній", "високий", "дуже високий" значення ризику відмови СТ відповідно. Функції належності вхідних і вихідної лінгвістичних змінних наведено на рис. 1-4. База правил для оцінки ризику відмови СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі наведена в табл. 1 і містить 27 продукційних правил.

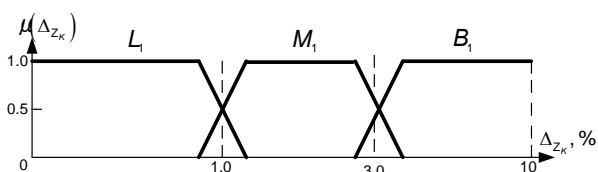


Рисунок 1 – Функції належності для лінгвістичної змінної  $\Delta Z_K$

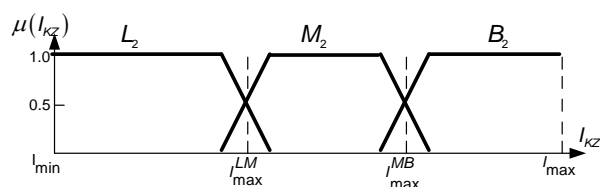


Рисунок 2 – Функції належності для лінгвістичної змінної  $I_{KZ}$

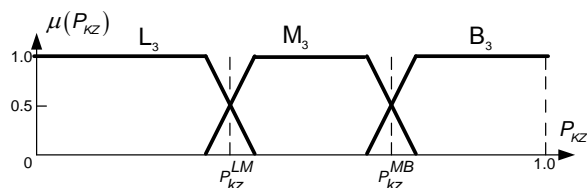


Рисунок 3 – Функції належності для лінгвістичної змінної  $P_{KZ}$

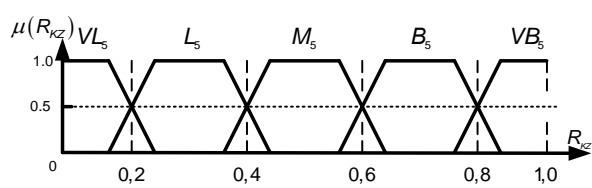


Рисунок 4 – Функції належності для лінгвістичної змінної  $R_{KZ}$

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

$\Delta Z_K = L_1$				$\Delta Z_K = M_1$				$\Delta Z_K = B_1$			
$I_{KZ}$	$L_2$	$M_2$	$B_2$	$I_{KZ}$	$L_2$	$M_2$	$B_2$	$I_{KZ}$	$L_2$	$M_2$	$B_2$
$P_{KZ}$				$P_{KZ}$				$P_{KZ}$			
$L_3$	$VL_4$	$L_4$	$B_4$	$L_3$	$M_4$	$B_4$	$B_4$	$L_3$	$B_4$	$B_4$	$VB_4$
$M_3$	$VL_4$	$M_4$	$B_4$	$M_3$	$M_4$	$B_4$	$VB_4$	$M_3$	$B_4$	$VB_4$	$VB_4$
$B_3$	$L_4$	$B_4$	$VB_4$	$B_3$	$B_4$	$B_4$	$VB_4$	$B_3$	$VB_4$	$VB_4$	$VB_4$

Визначення імовірності струмів в обмотках СТ при КЗ в ЕЕС. На імовірність виникнення небезпечних струмів КЗ в обмотках СТ, викликаних КЗ в електричній мережі впливають наступні фактори [1, 2]: топологія зовнішньої мережі; рівень навантаження у вузлах енергосистеми; елемент мережі, який зазнає пошкодження; вид і місце КЗ; фаза, яка пошкоджується. 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 розглядаємым силовим трансформатором [1, 2]. Алгоритм і математична модель визначення імовірності КЗ в ЕЕС докладно описані в [6].

Зокрема, імовірність виникнення певного виду КЗ  $p_{VID}$  в алгоритмі статистичного моделювання, визначається згідно [5], на основі аналізу отриманих статистичних даних по КЗ даної розглядаємої енергосистеми. Потужність навантаження у вузлах схеми енергосистеми  $S_{Hj}$  в процесі статистичного моделювання стану ЕЕС, якщо  $P_{S_H}$  є випадковим рівномірно розподіленим числом між 0 та 1, визначається:  $S_{Hj} = S_{H \min} + (S_{H \max} - S_{H \min}) \cdot P_{S_H}$ . Імовірнісні інтервали для визначення кількісних характеристик факторів впливу за умови їх рівномірного розподілу на імовірність і рівень струмів КЗ в елементах електричної мережі в алгоритмі статистичного моделювання стану ЕЕС з розглядаємым СТ представлені на рис. 5.

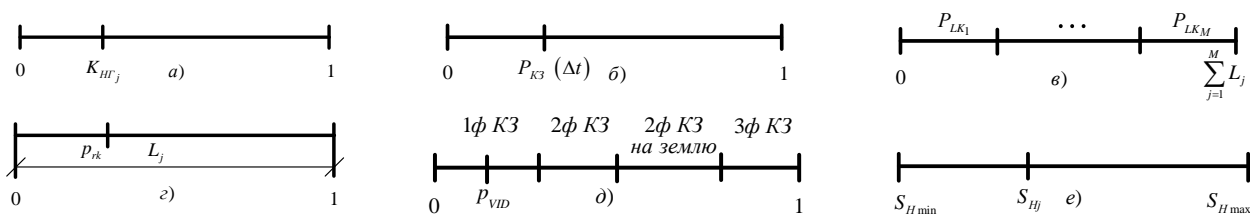


Рисунок 5 – Імовірнісні інтервали для визначення кількісних характеристик факторів впливу на імовірність і рівень струмів КЗ в елементах електричної мережі: а – топології електричній мережі; б – середньої інтенсивності КЗ в електричній мережі; в – імовірності виникнення КЗ на даній ЛЕП; г – місця розташування КЗ на ЛЕП; д – виду КЗ; е – рівня генерації і навантаження у вузлах схеми.

*Результати тестового моделювання.* Досліджуваний трансформатор Т1 працює в електричній мережі еквівалентна заступна схема якої представлена на рис. 6. Тестове ІСМ виконувалось на інтервалі часу спостереження  $\Delta t = 1$  міс з інтенсивністю потоку КЗ  $\omega_{KZ}$  для весняно-літнього періоду 3,5 рік-1. Гістограми частот  $m_{i_{KZ}}$  наскрізних струмів КЗ в обмотках СТ та функція розподілу імовірностей перевищення значень струмів КЗ  $p(I_{KZ})$  з можливого діапазону їх змінення представлені на рис.7. За результатами розрахунків для весняно-літнього періоду величина імовірність виникнення максимального струму однофазного КЗ в обмотці ВН величиною 3,731 кА складає 0,008, а струм, що має найбільшу відносну частоту  $m_{i_{KZ}} = 2,74\%$  дорівнює 0,658 кА з імовірністю перевищення цього значення 0,703.

З використанням в якості вхідних даних значення зміни опору  $\Delta Z_K = 2\%$  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 дефаззифіковане значення ризику відмови СТ, котрі для весняно-літнього періоду дорівнюють 0,7 відповідно.

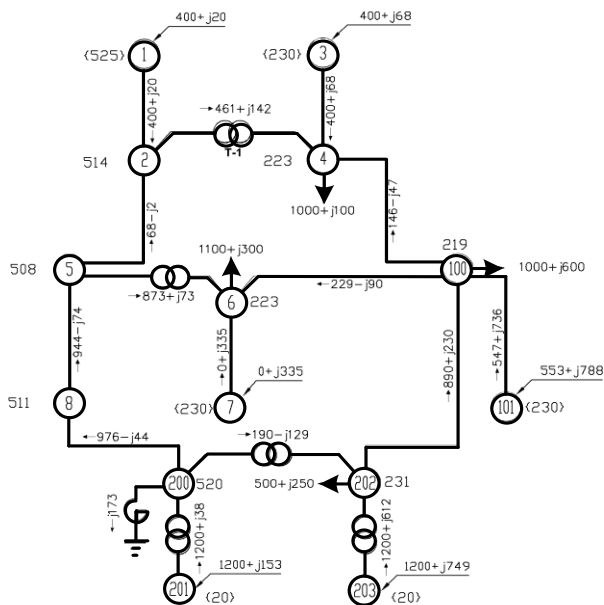


Рисунок 6 – Розрахункова схема тестової шестимашинної моделі підсистеми ЕЕС

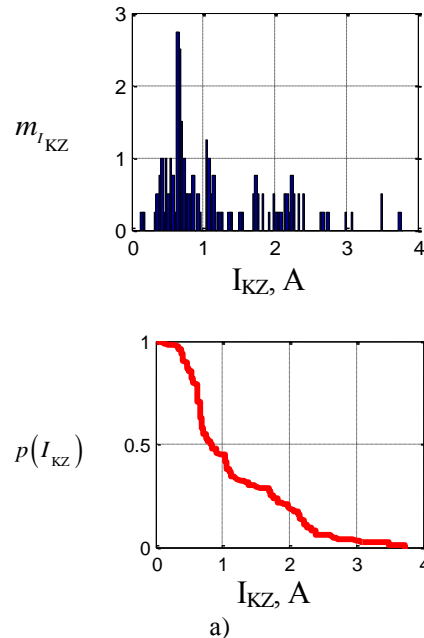


Рисунок 7 – Гістограми частот та функція розподілу імовірностей перевищення значень наскрізних струмів КЗ в обмотці ВН СТ при КЗ в зовнішній електричній мережі

**Висновок.** 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 та режиму електричної мережі в умовах КЗ на ПЛ в зовнішній електричній мережі підтверджують адекватність розробленої математичної моделі.

#### Перелік посилань

1. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних си-стем. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с. (монографія).
2. Бардик Є. І. Моделювання електроенергетичної системи для оцінки ризику виникнення аварій при відмовах елек-тробладнання [Текст] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Електротехніка і енер-гетика, 2013, N Вип. 1.-С.15-22.
3. Анализ методов оценки ресурса бумажной изоляции силовых трансформаторов [Текст] / В. Н. Бондарева [и др.] // Электроэнергетика. - 2009. - N 3. - С. 77-84.
4. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М. : – Телеком, 2007. – 288 с.
5. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002, 384 с.
6. Є.І. Бардик, М.В. Костерев, М.П. Болотний. Імовірісно-статистичне моделювання ЕЕС для оцінки ризику відмови силового трансформатора при короткому замиканні в електричній мережі. Вісник Вінницького політехнічного інституту, випуск 6.-Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2015.