

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Магістерська кваліфікаційна робота

Визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора

Виконав: студент групи ЕПА-18м Вдовиченко В.Є.

Керівник: к.т.н., доц. Розводюк М.П.

Вінниця – 2019 року

Об'єкт, предмет, мета й задачі дослідження

Об'єкт дослідження: процеси зміни технічного стану в обмотках трансформатора.

Предмет дослідження: математичні моделі та структура пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

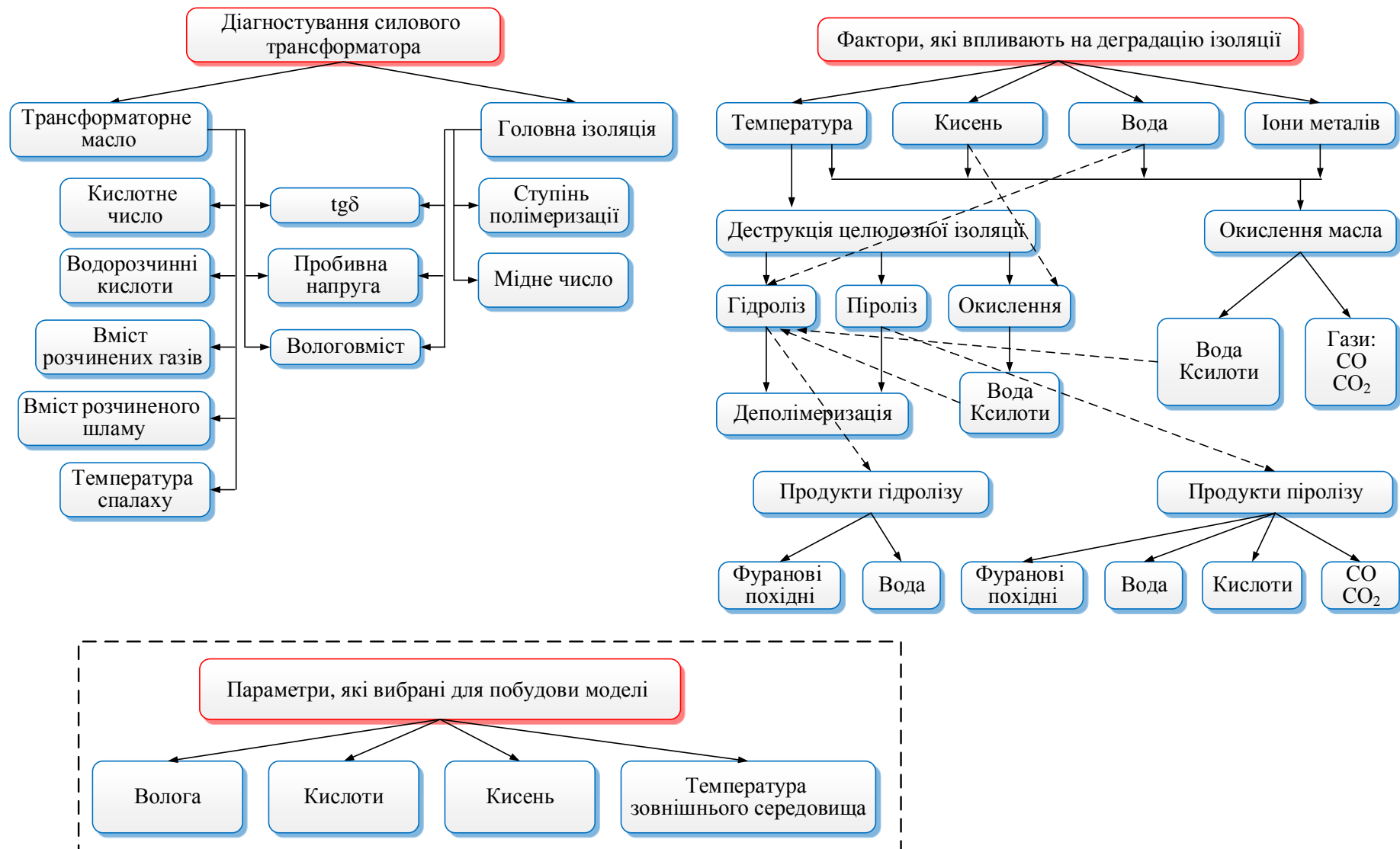
Мета роботи: підвищення надійності роботи силового масляного трансформатора за рахунок визначення залишкового ресурсу його обмоток.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- проаналізувати методи та способи визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора;
- розробити математичну модель для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора;
- синтезувати структуру пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

Розв'язанню поставлених задач присвячена дана робота

Моделі ідентифікації технічного стану силового трансформатора



МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Відносне зношення ізоляції для інтервалу часу ($t_0, t_0 + T$) відповідно до формули Монтзінгера:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} dt, \quad (1)$$

де t_0 – початок відліку;

T – тривалість зношення ізоляції;

Θ_h – температура найбільш нагрітої точки обмотки (приймаємо $\Theta_h = 104^\circ\text{C}$);

Δ – інтервал температур Θ_h , на якому відбувається подвійне зношення ізоляції ($\Delta = 6^\circ\text{C}$ – для міжнародного стандарту IEC 60076-7).

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[V(K_{\text{вол}}, K_{\text{кисл}}, K_{O_2}, K_{\text{зовн},t}) \cdot e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} \right] dt, \quad (2)$$

де V – швидкість відносного зношення ізоляції, в.о.:

$$V = K_{\text{вол}} \cdot K_{\text{кисл}} \cdot K_{O_2} \cdot K_{\text{зовн},t}. \quad (3)$$

Коефіцієнт впливу вологи:

$$K_{\text{вол}} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{вол}} \leq C_{\text{вол.баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha, & \text{якщо } C_{\text{вол}} > C_{\text{вол.баз}} \end{cases} \quad (4)$$

Коефіцієнт впливу кислотного числа:

$$K_{\text{кисл}} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{кисл}} \leq C_{\text{кисл.баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta, & \text{якщо } C_{\text{кисл}} > C_{\text{кисл.баз}} \end{cases} \quad (5)$$

Коефіцієнт впливу вмісту кисню в маслі:

$$K_{O_2} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{O_2} \leq C_{O_2.\text{баз}}; \\ \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma, & \text{якщо } C_{O_2} > C_{O_2.\text{баз}} \end{cases} \quad (6)$$

Коефіцієнт впливу зовнішньої температури:

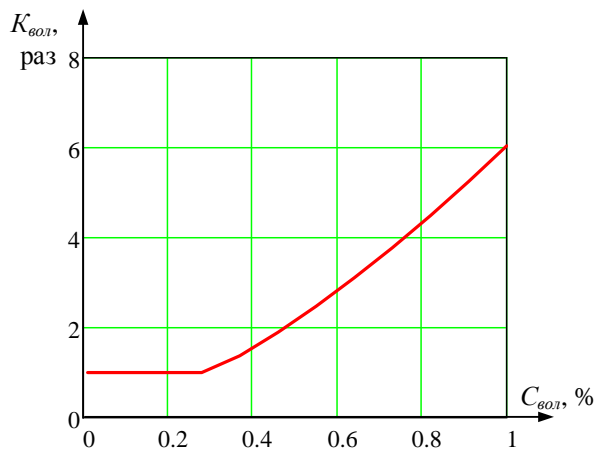
$$K_{\text{зовн},t} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{зовн},t} \leq C_{\text{зовн},t.\text{баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu, & \text{якщо } C_{\text{зовн},t} > C_{\text{зовн},t.\text{баз}} \end{cases} \quad (7)$$

$$V = \left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu. \quad (8)$$

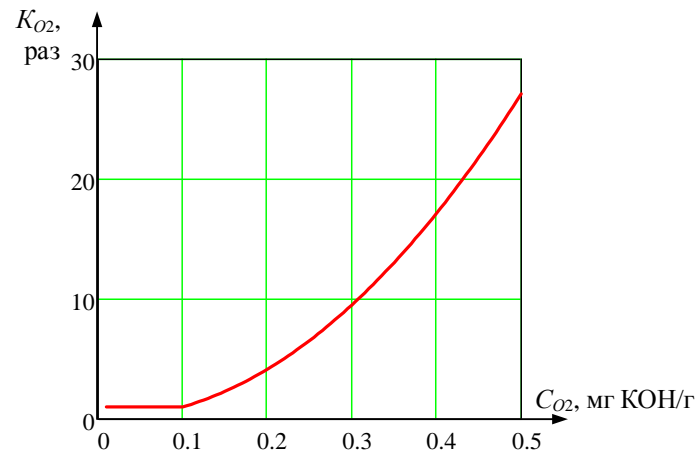
$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[\left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu \times e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} \right] dt. \quad (9)$$

$$L(t_0, t_0 + T) = \left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu \times \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} \right] dt. \quad (10)$$

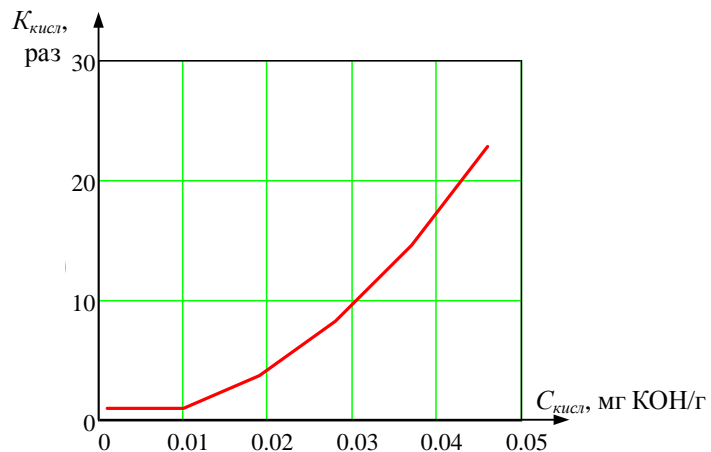
Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток



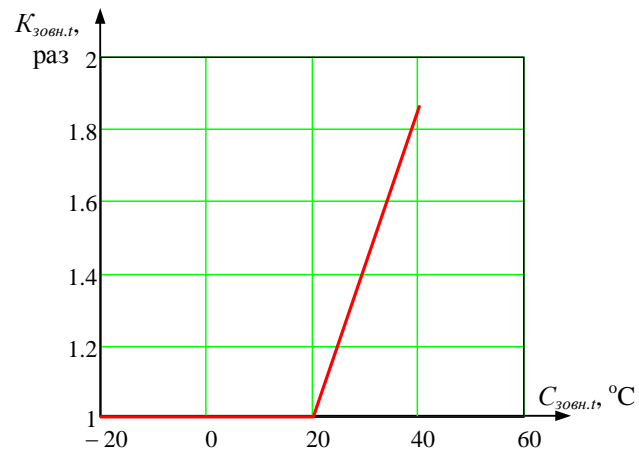
Динаміка зміни коефіцієнт впливу $K_{вол}$ при зміні вмісту вологості твердої ізоляції $C_{вол}$



Динаміка зміни коефіцієнт впливу K_{CO_2} при зміні вмісту кисню C_{O_2} в маслі

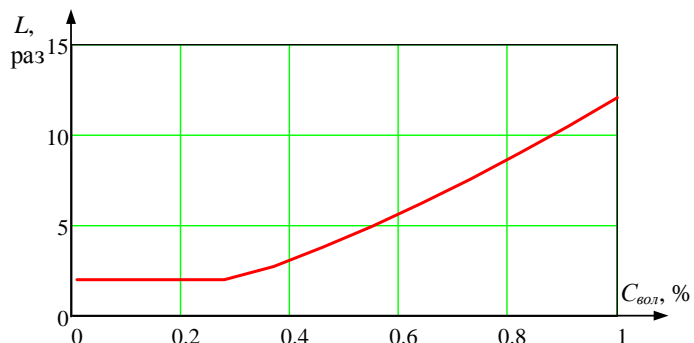


Динаміка зміни коефіцієнт впливу $K_{кисл}$ при зміні вмісту кислот в маслі $C_{кисл}$

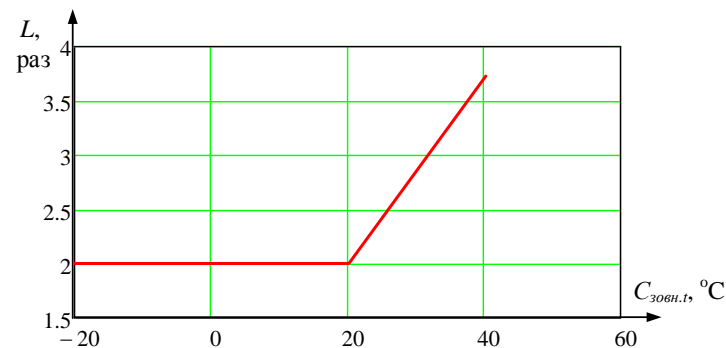


Динаміка зміни коефіцієнт впливу $K_{зовн,t}$ при зміні зовнішньої температури $C_{зовн,t}$

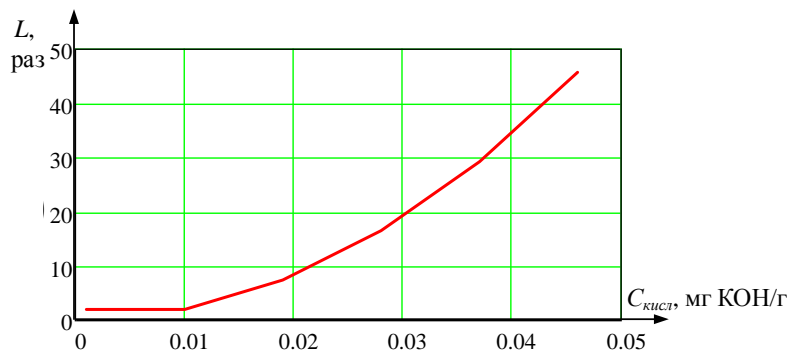
Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток



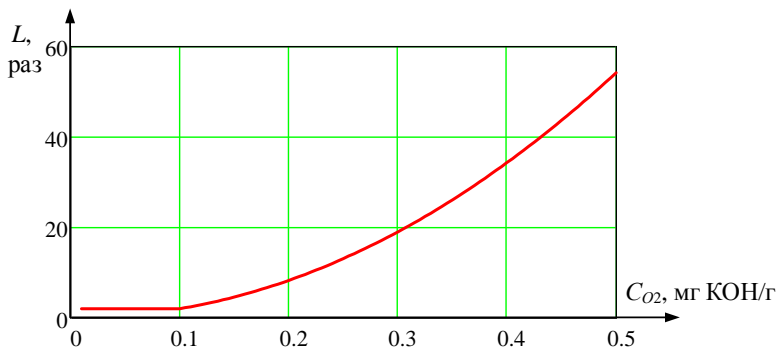
Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту вологості твердої ізоляції



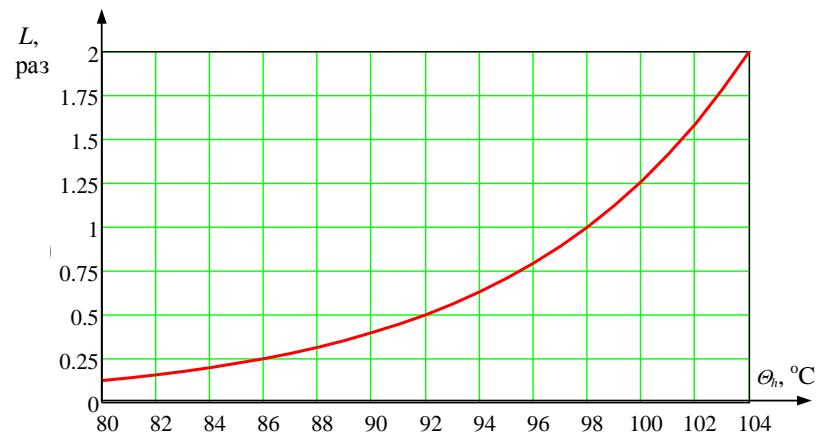
Відносне зношення ізоляції при зміні зовнішньої температури



Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту кислот в маслі



Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту кисню в маслі

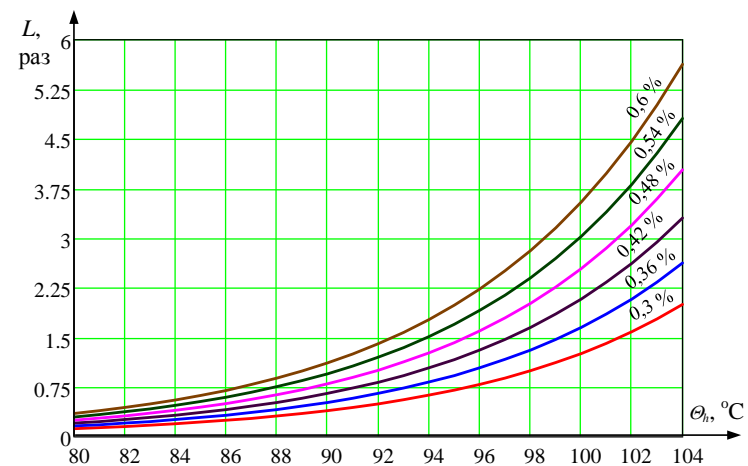


Залежність відносного зношення ізоляції при базових значеннях $C_{вол,баз}$, $C_{кисл,баз}$, $C_{O_2,баз}$ та $C_{зовн.т,баз}$ від температури обмотки

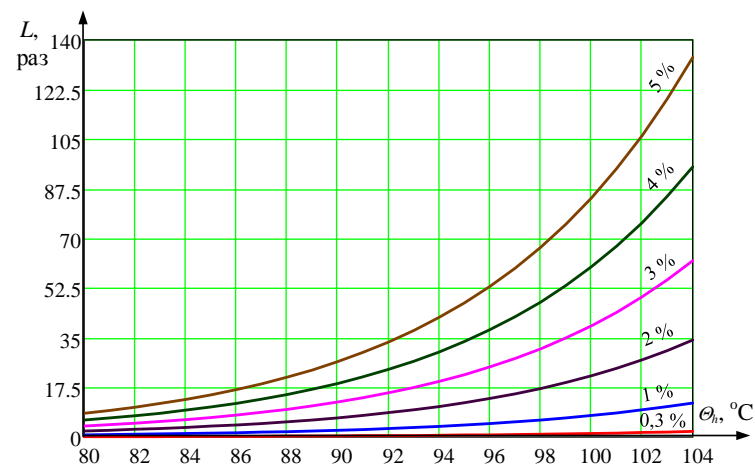
Дослідження впливу зміни вологості твердої ізоляції обмотки на її відносне зношення

Параметри відносного зношення ізоляції
при зміні $C_{вол}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$

Зміна $C_{вол}$		$K_{вол}, \%$	$L(90^\circ\text{C}), \%$	$L(100^\circ\text{C}), \%$	$L(104^\circ\text{C}), \%$
$C_{вол.баз}, \%$	0,3	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{вол.баз}, \%$	0,36	1,31	0,52	1,65	2,63
$1,4C_{вол.баз}, \%$	0,42	1,65	0,66	2,08	3,31
$1,6C_{вол.баз}, \%$	0,48	2,02	0,8	2,54	4,03
$1,8C_{вол.баз}, \%$	0,54	2,41	0,95	3,03	4,81
$2C_{вол.баз}, \%$	0,6	2,82	1,12	3,55	5,63
$3,3C_{вол.баз}, \%$	1	6,03	2,39	7,59	12,05
$6,7C_{вол.баз}, \%$	2	17,11	6,79	21,56	34,23
$10C_{вол.баз}, \%$	3	31,12	12,35	39,21	62,23
$13,3C_{вол.баз}, \%$	4	47,63	18,9	60,01	95,27
$16,7C_{вол.баз}, \%$	5	69,91	26,56	84,31	133,83



Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{вол}$ від $C_{вол.баз}$ до $2C_{вол.баз}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

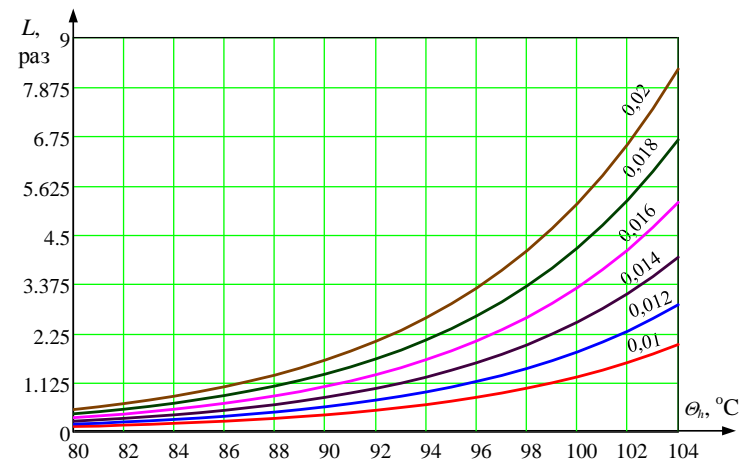


Залежність відносного зношення ізоляції при збільшенні $C_{вол}$ до 5% від $C_{вол.баз}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

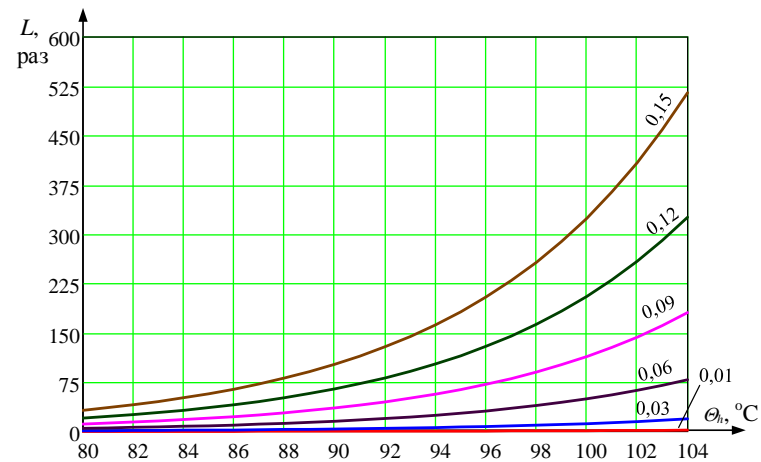
Дослідження впливу кислот в маслі на відносне зношення обмотки

Параметри відносного зношення ізоляції
при зміні $C_{кисл}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.л.баз}$

Зміна $C_{кисл}$		$K_{кисл}$, %	$L(90^\circ\text{C})$, %	$L(100^\circ\text{C})$, %	$L(104^\circ\text{C})$, %
$C_{кисл.баз}$, %	0,01	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{кисл.баз}$, %	0,012	1,45	0,58	1,831	2,906
$1,4C_{кисл.баз}$, %	0,014	1,99	0,79	2,511	3,987
$1,6C_{кисл.баз}$, %	0,016	2,62	1,04	3,302	5,242
$1,8C_{кисл.баз}$, %	0,018	3,34	1,32	4,204	6,673
$2C_{кисл.баз}$, %	0,02	4,14	1,64	5,217	8,282
$3C_{кисл.баз}$, %	0,03	9,51	3,77	11,98	19,02
$6C_{кисл.баз}$, %	0,06	39,37	15,63	49,61	78,75
$9C_{кисл.баз}$, %	0,09	90,41	35,88	113,9	180,81
$12C_{кисл.баз}$, %	0,12	163,05	64,71	205,43	326,1
$15C_{кисл.баз}$, %	0,15	257,62	102,24	324,59	515,25



Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $2C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.л.баз}$ від температури обмотки

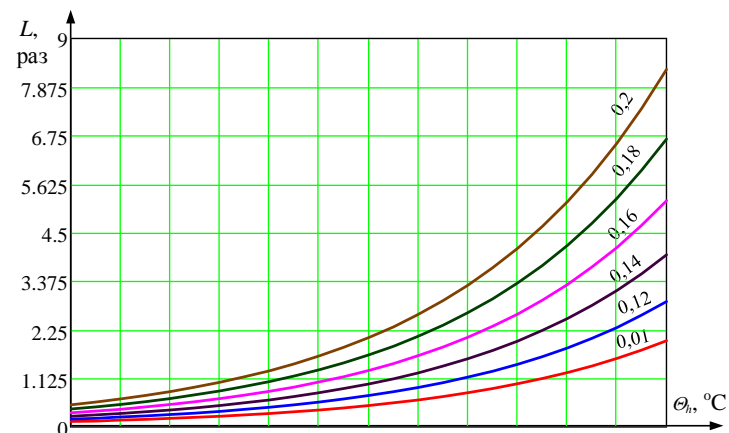


Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $15C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.л.баз}$ від температури обмотки

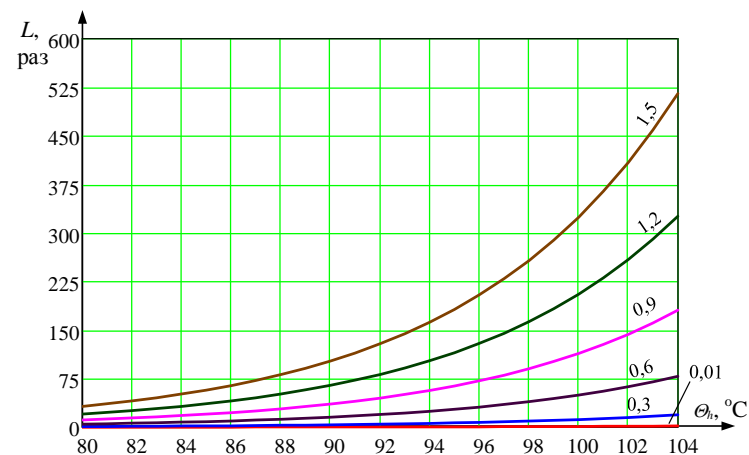
Дослідження впливу кисню в маслі на відносне зношення обмотки

Параметри відносного зношення ізоляції при зміні C_{O_2} та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$

Зміна C_{O_2}		K_{O_2} , %	$L(90^\circ\text{C})$, %	$L(100^\circ\text{C})$, %	$L(104^\circ\text{C})$, %
$C_{O_2.баз}$, %	0,1	1	0,34	1,26	2
$1,2C_{O_2.баз}$, %	0,12	1,45	0,58	1,83	2,91
$1,4C_{O_2.баз}$, %	0,14	1,99	0,79	2,51	3,99
$1,6C_{O_2.баз}$, %	0,16	2,62	1,04	3,3	5,24
$1,8C_{O_2.баз}$, %	0,18	3,34	1,32	4,2	6,67
$2C_{O_2.баз}$, %	0,2	4,14	1,64	5,22	8,28
$3C_{O_2.баз}$, %	0,3	9,51	3,77	11,98	19,02
$6C_{O_2.баз}$, %	0,6	39,37	15,63	49,61	78,49
$9C_{O_2.баз}$, %	0,9	90,41	35,88	113,91	180,81
$12C_{O_2.баз}$, %	1,2	163,05	64,71	205,43	326,1
$15C_{O_2.баз}$, %	1,5	257,62	102,24	324,59	515,25



Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $2C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

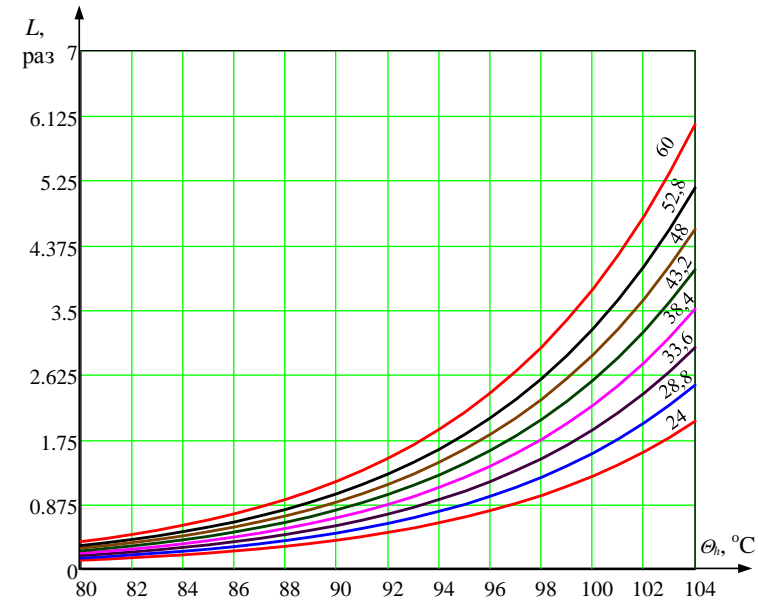


Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $15C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

Дослідження впливу температури зовнішнього середовища на відносне зношення обмотки

Параметри відносного зношення ізоляції при зміні $C_{зовн.т}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$

Зміна $C_{зовн.т}$		$K_{зовн.т}$, %	$L(90^{\circ}\text{C})$, %	$L(100^{\circ}\text{C})$, %	$L(104^{\circ}\text{C})$, %
$C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	24	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	28,8	1,25	0,49	1,57	2,49
$1,4C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	33,6	1,5	0,59	1,89	3
$1,6C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	38,4	1,76	0,7	2,22	3,52
$1,8C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	43,2	2,03	0,8	2,55	4,05
$2C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	48	2,3	0,91	2,9	4,59
$2,2C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	52,8	2,58	1,02	3,25	5,15
$2,5C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	60	3	1,19	3,78	6,01

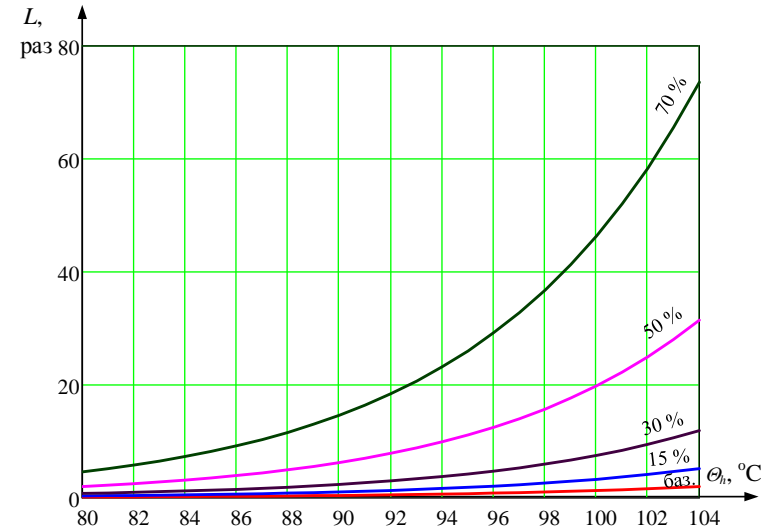


Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{зовн.т}$ від $C_{зовн.т.баз}$ до $2,5C_{зовн.т.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$ від температури обмотки

Дослідження впливу одночасної зміни значень всіх параметрів на відносне зношення обмотки

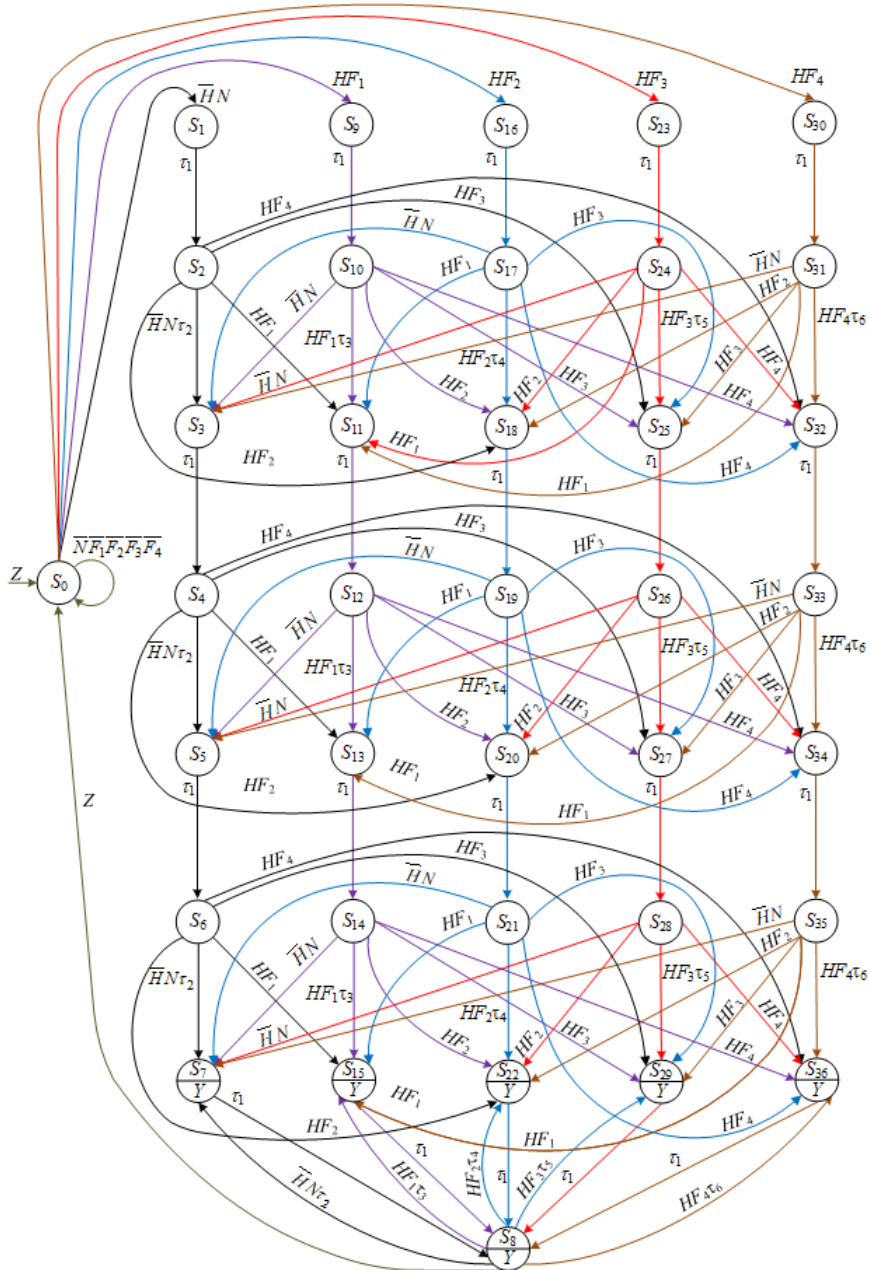
Параметри відносного зношення ізоляції при одночасній рівномірній зміні $C_{вол.}$, $C_{кисл.}$, C_{O_2} та $C_{зовн.т}$

Параметр	Значення параметра, при його збільшенні на			
	15%	30%	50%	70%
$K_{вол.}, \%$	1,23	1,48	1,83	2,21
$K_{кисл.}, \%$	1,33	1,71	2,3	2,3
$K_{O_2}, \%$	1,33	1,71	2,3	2,3
$K_{зовн.т}, \%$	1,18	1,37	1,63	1,89
$L(90), \%$	1,03	2,36	6,24	14,59
$L(100), \%$	3,26	7,49	19,8	46,32
$L(104), \%$	5,17	11,87	31,42	73,53



Залежність відносного зношення ізоляції при одночасній рівномірній зміні $C_{вол.}$, $C_{кисл.}$, C_{O_2} та $C_{зовн.т}$ від температури обмотки

Граф функціонування блока обробки інформації



- Z – сигнал початкового стану блока обробки інформації в момент подачі напруги живлення;
-
- H – сигнал, який свідчить про виникнення режиму перевантаження в роботі трансформатора;
-
- N – сигнал, який відповідає спрацюванню ресурсу нормальному режимі роботи трансформатора;
-
- F_1, F_2, F_3, F_4 – сигнали, які характеризують перевантаження трансформатора за першим, другим, третім та четвертим рівнями, відповідно;
-
- Y – вихідний сигнал, що характеризує повне витрачання робочого ресурсу трансформатора;
-
- S_1, \dots, S_{36} – стани переходу системи

Секвенційна модель функціонування блока обробки інформації

$$\begin{array}{ll}
 ZS_0 \mid S_0; & HF_3 \tau_5 S_{24} \mid S_{25}; \\
 \overline{NF_1 F_2 F_3 F_4 S_0} \mid S_0; & \tau_1 S_{25} \mid S_{26}; \\
 \overline{NHS_0} \mid S_1; & HF_3 \tau_5 S_{26} \mid S_{27}; \\
 HF_1 S_0 \mid S_9; & \tau_1 S_{27} \mid S_{28}; \\
 HF_2 S_0 \mid S_{16}; & HF_3 \tau_5 S_{28} \mid S_{29}; \\
 HF_3 S_0 \mid S_{23}; & \tau_1 S_{29} \mid S_8; \\
 HF_4 S_0 \mid S_{30}; & HF_3 \tau_5 S_8 \mid S_{29}; \\
 \tau_1 S_1 \mid S_2; & \tau_1 S_{30} \mid S_{31}; \\
 \overline{NH\tau_2 S_2} \mid S_3; & HF_4 \tau_6 S_{31} \mid S_{32}; \\
 \tau_1 S_3 \mid S_4; & \tau_1 S_{32} \mid S_{33}; \\
 \overline{NH\tau_2 S_4} \mid S_5; & HF_4 \tau_6 S_{33} \mid S_{34}; \\
 \tau_1 S_5 \mid S_6; & \tau_1 S_{34} \mid S_{35}; \\
 \overline{NH\tau_2 S_6} \mid S_7; & HF_4 \tau_6 S_{35} \mid S_{36}; \\
 \tau_1 S_7 \mid S_8; & \tau_1 S_{36} \mid S_8; \\
 \overline{NH\tau_2 S_8} \mid S_7; & HF_4 \tau_6 S_8 \mid S_{36}; \\
 \tau_1 S_9 \mid S_{10}; & HF_1 S_2 \mid S_{11}; \\
 HF_1 \tau_3 S_{10} \mid S_{11}; & HF_2 S_2 \mid S_{18}; \\
 \tau_1 S_{11} \mid S_{12}; & HF_3 S_2 \mid S_{25}; \\
 HF_1 \tau_3 S_{12} \mid S_{13}; & HF_4 S_2 \mid S_{32}; \\
 \tau_1 S_{13} \mid S_{14}; & HF_1 S_4 \mid S_{13}; \\
 HF_1 \tau_3 S_{14} \mid S_{15}; & HF_2 S_4 \mid S_{20}; \\
 \tau_1 S_{15} \mid S_8; & HF_3 S_4 \mid S_{27}; \\
 HF_1 \tau_3 S_8 \mid S_{15}; & HF_4 S_4 \mid S_{34}; \\
 \tau_1 S_{16} \mid S_{17}; & HF_1 S_6 \mid S_{15}; \\
 HF_2 \tau_4 S_{17} \mid S_{18}; & HF_2 S_6 \mid S_{22}; \\
 \tau_1 S_{18} \mid S_{19}; & HF_3 S_6 \mid S_{29}; \\
 HF_2 \tau_4 S_{19} \mid S_{20}; & HF_4 S_6 \mid S_{36}; \\
 \tau_1 S_{20} \mid S_{21}; & \overline{HNS}_{10} \mid S_3; \\
 HF_2 \tau_4 S_{21} \mid S_{22}; & HF_2 S_{10} \mid S_{18}; \\
 \tau_1 S_{22} \mid S_8; & HF_3 S_{10} \mid S_{25}; \\
 HF_2 \tau_4 S_8 \mid S_{22}; & HF_4 S_{10} \mid S_{32}; \\
 \tau_1 S_{23} \mid S_{24}; & \overline{HNS}_{12} \mid S_5; \\
 & HF_2 S_{12} \mid S_{20};
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 HF_3 S_{12} \mid S_{27}; \\
 HF_4 S_{12} \mid S_{34}; \\
 \overline{HNS}_{14} \mid S_7; \\
 HF_2 S_{14} \mid S_{22}; \\
 HF_3 S_{14} \mid S_{29}; \\
 HF_4 S_{14} \mid S_{36}; \\
 \overline{HNS}_{17} \mid S_3; \\
 HF_1 S_{17} \mid S_{11}; \\
 HF_3 S_{17} \mid S_{25}; \\
 HF_4 S_{17} \mid S_{32}; \\
 \overline{HNS}_{19} \mid S_5; \\
 HF_1 S_{19} \mid S_{13}; \\
 HF_3 S_{19} \mid S_{27}; \\
 HF_4 S_{19} \mid S_{34}; \\
 \overline{HNS}_{21} \mid S_7; \\
 HF_1 S_{21} \mid S_{15}; \\
 HF_3 S_{21} \mid S_{29}; \\
 HF_4 S_{21} \mid S_{36}; \\
 \overline{HNS}_{24} \mid S_3; \\
 HF_1 S_{24} \mid S_{11}; \\
 HF_2 S_{24} \mid S_{18}; \\
 HF_4 S_{24} \mid S_{32}; \\
 \overline{HNS}_{26} \mid S_5; \\
 HF_1 S_{26} \mid S_{13}; \\
 HF_2 S_{26} \mid S_{20}; \\
 HF_4 S_{26} \mid S_{34}; \\
 \overline{HNS}_{28} \mid S_7; \\
 HF_1 S_{28} \mid S_{15}; \\
 HF_2 S_{28} \mid S_{22}; \\
 HF_4 S_{28} \mid S_{36}; \\
 \overline{HNS}_{31} \mid S_3; \\
 HF_1 S_{31} \mid S_{11};
 \end{array}$$

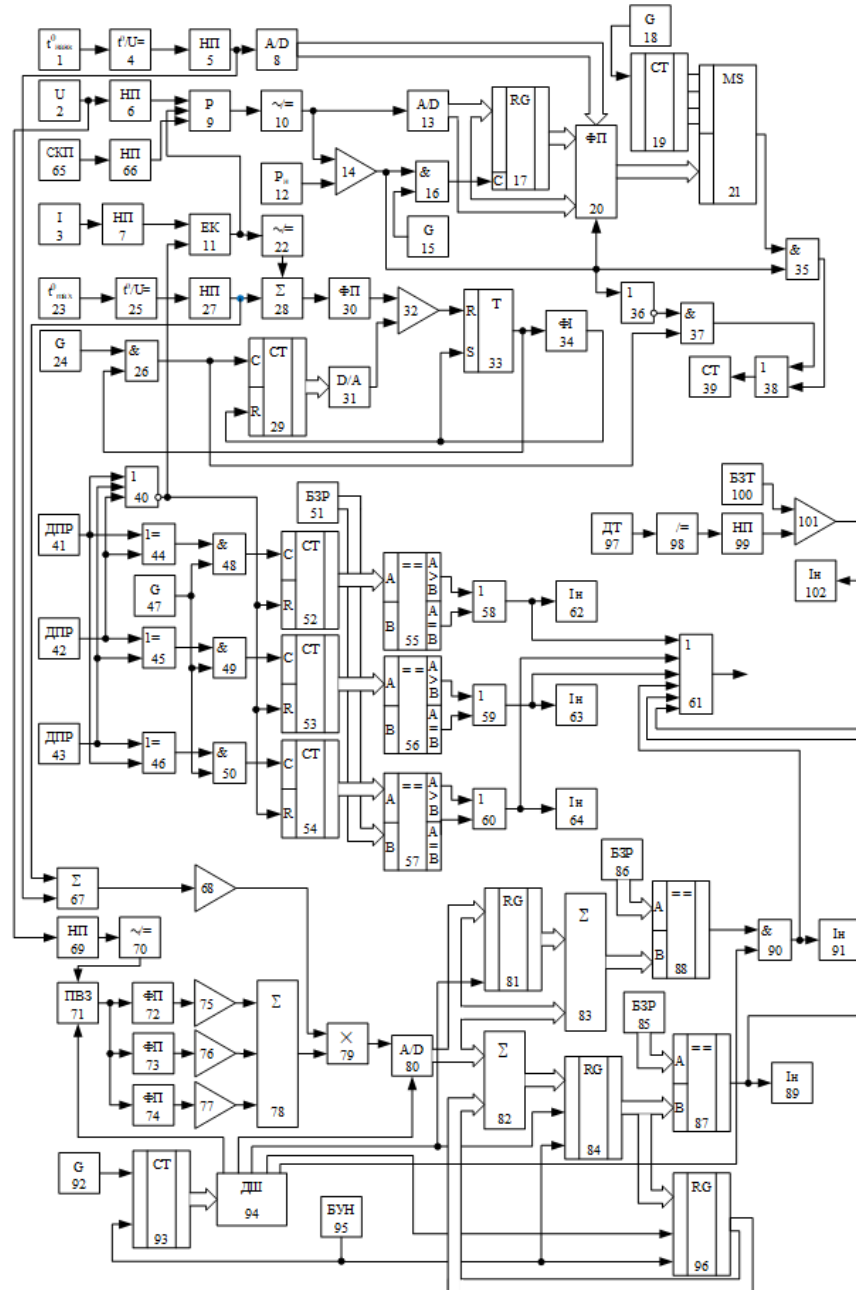
$$\begin{array}{l}
 HF_2 S_{31} \mid S_{18}; \\
 HF_3 S_{31} \mid S_{25}; \\
 \overline{HNS}_{33} \mid S_5; \\
 HF_1 S_{33} \mid S_{13}; \\
 HF_2 S_{33} \mid S_{20}; \\
 HF_3 S_{33} \mid S_{27}; \\
 \overline{HNS}_{35} \mid S_7; \\
 HF_1 S_{35} \mid S_{15}; \\
 HF_2 S_{35} \mid S_{22}; \\
 HF_3 S_{35} \mid S_{29}; \\
 ZS_8 \mid S_0; \\
 S_7 \vee S_8 \vee S_{15} \vee S_{22} \vee S_{29} \vee S_{36} \mid Y.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_0; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{19}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_1; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{20}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_2; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{21}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_3; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{22}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_4; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{23}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_5; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{24}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_6; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{25}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_7; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{26}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_8; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{27}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_9; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{28}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{10}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{29}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{11}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{30}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{12}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{31}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{13}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{32}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{14}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{33}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{15}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{34}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{16}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{35}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{17}; & \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{36}; \\
 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{18}; &
 \end{array}$$

Результат мінімізації секвенційної моделі

$$\begin{array}{lll}
 F_1 \overline{T_1} \tau_3 \mid T_1; & T_3 \tau_5 \mid T_3; & (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H} \mid T_6; \\
 T_1 \tau_1 \mid T_1; & F_4 \overline{T_4} \tau_6 \mid T_4; & [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H}] T_6 \tau_6 \mid T_7; \\
 F_2 \overline{T_2} \tau_4 \mid T_2; & T_4 \tau_6 \mid T_4; & [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H}] T_7 \tau_6 \mid T_8; \\
 T_2 \tau_4 \mid T_2; & NT_5 \tau_2 \mid T_5; & [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4) H \vee T_5 \overline{H}] T_8 \tau_6 \mid T_9; \\
 F_3 \overline{T_3} \tau_5 \mid T_3; & T_5 \tau_1 \mid T_5; & Z \mid \overline{T_6 T_7 T_8 T_9}; \\
 & & T_6 T_7 T_8 T_9 \mid Y.
 \end{array}$$

Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора



Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів

Наукова новизна одержаних результатів:

- удосконалено математичну модель для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора, яка за рахунок введення додаткового коефіцієнту впливу температури зовнішнього середовища дозволяє більш точно розрахувати відносне зношення ізоляції обмотки трансформатора;
- синтезовано структуру пристрою для діагностування трансформатора, яка, на відміну від існуючих, за рахунок введення в структуру пристрою додаткових блоків та зв'язків між ними дозволяє підвищити точність його роботи. Структура пристрою враховує температуру верхніх шарів масла в баку, струм в колі вторинної обмотки, напругу, коефіцієнт потужності, температуру навколишнього середовища, тиск масла в високовольтному вводі, концентрацію газів у маслі високовольтного вводу, швидкість зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також технічний стан пристрою регулювання напруги під навантаженням.

Практичне значення одержаних результатів:

- використання одержаних результатів дозволить підвищити надійність роботи трансформаторів, зменшити кількість простою технологічного обладнання через аварійні ситуації, обумовлені виходом з ладу трансформаторів.

Апробація результатів дослідження

Матеріали обговорювалися на конференціях, конкурсах наукових робіт

- Science, Research, Development. Technics and technology. #16 (Наука, исследования, развитие. Техника и технология. #16) 29.04.2019 – 30.04.2019, Barcelona (Испания);
- Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2019);
- Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт зі спеціальності «Електричні машини та апарати» (Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського, Кременчук, 2019 рік), за результатами чого отримано диплом II ступеня (тема роботи – «Діагностування силових масляних трансформаторів»).

За результатами дослідження опубліковано:

- Розводюк М. П. Визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора на базі нечіткої логіки / М.П. Розводюк, В.В. Овчарук, В.Є. Вдовиченко, І.М. Овчар // Monografia. Pokonferencyjna. Science, research, development #16. Technics and technology. Barcelona 29.04.2019 - 30.04.2019. – Zbiór artykułów naukowych enzowanych. Zbiór artykułów naukowych z Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej (on-line) zorganizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych oraz badawczych z państw obszaru byłego Związku Radzieckiego oraz byłej Jugosławii. (30.04.2019). – Warszawa, 2019. – 84 str. – S.71-77.
- Розводюк М. П. Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, В.Є. Вдовиченко, К.М. Розводюк // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Випуск 3/2019 (47). – С.35-47. DOI: 10.30929/2072-2052.2019.3.47.35-47.
- Розводюк М.П. Визначення відносного зношення ізоляції обмоток силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, В.Є. Вдовиченко, К.М. Розводюк // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2020), м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 1-15 травня 2020 р. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2020/paper/view/8463>
- Пат. 135969 UA, МПК G07C 3/10, G07C 3/14, H02P 29/00. Пристрій для визначення залишкового ресурсу електричного двигуна / Розводюк М.П., Овчарук В.В., Овчар І.М., Вдовиченко В.Є. – № у 201901819; заявл. 22.02.2019; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14. – 16 с. : кресл.

Подані заявки на отримання патенту України на корисну модель:

- Пристрій для визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора
- Пристрій для контролю технічного стану силового масляного трансформатора

Дякую за увагу!

Доповідь завершено.