

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.039.514.25: 621.314.222.6: 621.22.018

*Т. Кабаев, [tkabaev1947@gmail.ru](mailto:tkabaev1947@gmail.ru)*

*Г.Ш. Эралиева, [eralieva.gulmira@mail.ru](mailto:eralieva.gulmira@mail.ru)*

*Ч.М. Бузурманкулова, [chbuzurmankulova@mail.ru](mailto:chbuzurmankulova@mail.ru)*

*Н.А. Суюнтбекова, [nurasuuntbekova@gmail.com](mailto:nurasuuntbekova@gmail.com)*

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,  
Бишкек, Кыргызстан*

### ПЕРЕХОДНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗАГРУЗКИ

Разработана имитационная Simulink – модель (ИМ) расчета температуры магнитопровода, обмотки и масла. ИМ позволяет исследовать переходные тепловые процессы в силовых масляных трансформаторах (СМТ). Отмечено, что ИМ позволяет анализировать широкий спектр различных режимов их работы, таких как: нагрев СМТ при включении его на постоянную нагрузку с коэффициентом загрузки, равной единице, при этом начальная температура всех его элементов равна 20°C; стохастический режим, когда коэффициент загрузки изменяется случайно; режим работы с учетом случайности изменения температуры окружающей среды. Отмечено, что возможно моделирование работы СМТ и для таких случаев, например, как холостой режим, режим охлаждения (уменьшения температуры магнитопровода, обмотки и масла) после отключения СМТ от сети. Приведены результаты численного эксперимента.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор; нагрев; тепловой переходный процесс; тепловая модель; температура обмотки, масла, магнитопровода.

#### Введение

Силовые трансформаторы (СТ) в системе электроснабжения являются одними из наиболее дорогостоящих элементов, следственно обеспечивая допустимую работу в критериях, ближайших к номинальным по температуре и износу изоляции. Такой подход считается важной технико-экономической задачей, потому что долгий ненормальный режим работы трансформатора имеет возможность привести или к катастрофическому износу изоляции или к недоиспользованию его мощности.

Длительная работа трансформаторов в ненормальном режиме нормированных перегрузок определяется при допустимом нагреве магнитопровода, обмотки и масла, который находится в зависимости от класса термостойкости применяемой изоляции.

В силовых трансформаторах на данный момент не существует аппарата, который определил бы точную температуру токоведущих частей. Учитывая вышеизложенную информацию, можем определить нагрузку у высоковольтных трансформаторов, оценивая их с помощью математического моделирования при тепловых процессах.

Таким образом, эта модель переходных тепловых процессов повлияет на точную и эффективную работу по всей энергосистеме [1].

#### Данные и методы

Следующая система дифференциальных уравнений описана для тепловых нестационарных процессов в СТ при процессе нагревания (начальные условия нулевые) [2, 3]:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1}{dt} + A_{1,0} \cdot \vartheta_1 + A_{1,2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) + A_{1,3} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_3) = P_1; \\ C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2}{dt} + A_{2,0} \cdot \vartheta_2 + A_{2,1} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + A_{2,3} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) = P_2; \\ C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3}{dt} + A_{3,0} \cdot \vartheta_3 + A_{3,1} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_1) + A_{3,2} \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_2) = P_3. \end{cases} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) индексы обозначают: 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – масло; 0 – охлаждающая среда; коэффициенты  $A_{i,k}$  – потери, тепловые проводимости, происходящие при передаче между соответствующими тепловыми телами;  $C_1, C_2, C_3$  – теплоемкости соответствующих тел (Вт·ч/°С) ( $C = C_{yd} \cdot G$ ,  $C_{yd}, G$  – соответственно удельная теплоемкость и масса тела, величины справочные);  $\vartheta_1 = (\theta_1 - \theta_0)$ ,  $\vartheta_2 = (\theta_2 - \theta_0)$ ,  $\vartheta_3 = (\theta_3 - \theta_0)$  – высокая температура магнитопровода, обмотки и масла (°С);  $P_1, P_2, P_3$  – электрические потери магнитопровода, обмотки и масла (Вт). Так как, учитывая конструктивные особенности СТ, теплообмен между телами и охлаждающей средой отсутствует, то соответствующие тепловые проводимости равны нулю [2]:  $A_{1,0} = A_{1,2} = A_{2,0} = A_{2,1} = 0$ .

Обратные тепловые проводимости дают тепловые сопротивления и обозначаются следующим образом [4]:  $R_1 = 1/A_{1,3} = 1/A_{3,1}$ ;  $R_2 = 1/A_{2,3} = 1/A_{3,2}$ ;  $R_3 = 1/A_{3,0}$ .

Потери в магнитопроводе трансформатора  $P_1$  равны потерям холостого хода  $\Delta P_{xx}$ , потери в обмотке  $P_2$  равны потерям короткого замыкания  $\Delta P_{kz}$ , а потери в масле отсутствуют [2], поэтому:

$$P_1 = \Delta P_{xx}; P_2 = \Delta P_{kz}; P_3 = 0. \quad (2)$$

Потери короткого замыкания  $\Delta P_{kz}$  можно вычислить по формуле, приведенной в [2]:

$$\Delta P_{kz} = \Delta P_{k.nom} \cdot K_z^2, \quad (3)$$

где  $K_z = S/S_{nom}$  – коэффициент загрузки (КоЗаг) трансформатора;  $S_{nom}$  – номинальная мощность трансформатора;  $\Delta P_{k.nom}$  – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке.

Тогда с учетом выше введенных обозначений систему уравнений (1) можно переписать в виде [4]:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\vartheta_1(t)}{dt} + \frac{\vartheta_1(t)}{R_1} - \frac{\vartheta_3(t)}{R_1} = P_1; \\ C_2 \cdot \frac{d\vartheta_2(t)}{dt} + \frac{\vartheta_2(t)}{R_2} - \frac{\vartheta_3(t)}{R_2} = P_2; \\ C_3 \cdot \frac{d\vartheta_3(t)}{dt} + \frac{\vartheta_3(t)}{R_3} - \frac{\vartheta_1(t)}{R_1} + \frac{\vartheta_3(t)}{R_1} - \frac{\vartheta_2(t)}{R_2} + \frac{\vartheta_3(t)}{R_2} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Как отмечено в [4], получение расчетных соотношений непосредственно из системы (4) является достаточно сложной процедурой, в [4] предлагается вести расчет по электрической тепловой схеме замещения, синтезированной на основе системы (4), для частного случая, когда имеет место установившийся тепловой режим и  $K_z = 1$ , а соотношение для определения  $R_1, R_2, R_3$  предлагается получить из системы (4), приняв величины  $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$  постоянными [4]:

$$R_1 = \frac{\vartheta_{s,m}}{\Delta P_{xx}}; R_2 = \frac{\vartheta_{nnt,m}}{\Delta P_{k.nom}}; R_3 = \frac{\vartheta_m}{\Delta P_{xx} + \Delta P_{k.nom}}, \quad (5)$$

где  $\vartheta_{s,m} = \theta_1 - \theta_3$ ;  $\vartheta_{nnt,m} = \theta_2 - \theta_3$  и  $\vartheta_m = \vartheta_3 = \theta_3 - \theta_0$  соответствуют превышению температур магнитопровода над температурой масла; обмотки над температурой масла, превышение температуры масла над температурой охлаждающей среды  $\theta_0$ ;  $\Delta P_{xx}$  и  $\Delta P_{k.nom}$  являются справочными данными, а величины  $\vartheta_{nnt,m}$  и  $\vartheta_m$  устанавливаются диаграммой распределения температур в трансформаторе по высоте бака, приведенной в [2, 3, 5, 6]. Величину  $\vartheta_{s,m}$  считают равной 25 °С [2, 3]. Эта диаграмма является результатом

исследования большого числа трансформаторов по методу кривых охлаждения. Согласно вышесказанному методу, после установления температуры трансформатор выключают и измеряют его среднее значение сопротивления обмотки, полученные результаты измерений экстраполируют в область рабочих температур. Следовательно, в сопротивлениях  $R_1, R_2, R_3$  учтены косвенно процессы теплопередачи и конвекции [4].

В существующих алгоритмах расчета нагрузочной способности силовых трансформаторов, которые разработаны на основе упрощенных тепловых моделей, не учитывается, что коэффициент загрузки силовых трансформаторов и температура окружающей среды (воздуха) изменяются по стохастическому закону.

**Постановка задачи**

Разработка компьютерной модели в среде Simulink на основе системы дифференциальных уравнений, адекватно описывающих нестационарные тепловые режимы работы силовых трансформаторов, позволяющих исследовать закономерности изменения температуры масла в зависимости от температуры обмоток и магнитопровода при стохастическом изменении загрузки трансформатора и температуры окружающей среды.

**Решение задачи**

Следуя работе [7], построим компьютерный аналог (структурную схему) выражения (4) в среде Simulink, который позволяет исследовать характер изменения основных тепловых параметров СМТ при стохастическом изменении КоЗаг трансформатора и температуры окружающей среды (воздуха)  $\theta_0$ .

Для удобства дальнейших преобразований введем в системе (4) следующие обозначения:

$$\vartheta_1(t) \rightarrow x_1; \frac{d\vartheta_1(t)}{dt} \rightarrow \dot{x}_1; \vartheta_2(t) \rightarrow x_2; \frac{d\vartheta_2(t)}{dt} \rightarrow \dot{x}_2; \vartheta_3(t) \rightarrow x_3; \frac{d\vartheta_3(t)}{dt} \rightarrow \dot{x}_3.$$

В результате получим:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \dot{x}_1 + \frac{1}{R_1} x_1 - \frac{1}{R_1} x_3 = P_1; \\ C_2 \cdot \dot{x}_2 + \frac{1}{R_2} x_2 - \frac{1}{R_2} x_3 = P_2; \\ C_3 \cdot \dot{x}_3 + \frac{1}{R_3} x_3 - \frac{1}{R_1} x_1 + \frac{1}{R_1} x_3 - \frac{1}{R_2} x_2 + \frac{1}{R_2} x_3 = 0. \end{cases}$$

После дальнейших преобразований эта система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} R_1 C_1 \cdot \dot{x}_1 + x_1 - x_3 = R_1 P_1; \\ R_2 C_2 \cdot \dot{x}_2 + x_2 - x_3 = R_2 P_2; \\ R_3 C_3 \cdot \dot{x}_3 + x_3 - \frac{R_3}{R_1} \cdot x_1 - \frac{R_3}{R_2} x_2 + \left(\frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2}\right) \cdot x_3 = 0. \end{cases} \quad (6, 7, 8)$$

Ниже, используя совместно уравнения (6), (7), получены выражения, в одном из которых содержится только  $x_1$ , а в другом  $x_2$ . Решение этих уравнений относительно старших производных  $\ddot{x}_1$  и  $\ddot{x}_2$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 = & - \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) \cdot \dot{x}_1 - \\ & - \left( \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_2 R_3 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3} \right) \cdot \dot{x}_1 - \\ & - \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot x_1 + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot R_3 \Delta P_{k.nom} K_z^2 + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot (R_1 + R_3) \Delta P_{xx}; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\ddot{x}_2 = -\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_2 C_2}\right) \cdot \ddot{x}_2 - \left(\frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_2 R_3 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3}\right) \cdot \dot{x}_2 - \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} x_2 + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot R_3 \Delta P_{xx} + \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3} \cdot (R_2 + R_3) \Delta P_{k.nom} K_z^2. \quad (10)$$

Полученные уравнения описывают тепловые переходные процессы соответственно в магнитопроводе (9) и обмотке СМТ (10). Тепловые переходные процессы в масле определяются уравнением (8). Решив его относительно  $\dot{x}_3$ , получим:

$$\dot{x}_3 = -\left(\frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3}\right) \cdot x_3 + \frac{1}{R_1 C_3} \cdot x_1 + \frac{1}{R_2 C_3} \cdot x_2. \quad (11)$$

Введем следующие обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_2 C_2};$$

$$K_2 = \frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_2 R_3 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3};$$

$$K_3 = \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3}, \quad K_4 = \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3}$$

С учетом этих обозначений выражения (9), (10), (11) примут следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = -K_1 \cdot \ddot{x}_1 - K_2 \cdot \dot{x}_1 - K_3 \cdot x_1 + K_3 \cdot R_3 \Delta P_{k.nom} K_z^2 + K_3 \cdot (R_1 + R_3) \Delta P_{xx}; \\ \ddot{x}_2 = -K_1 \cdot \ddot{x}_2 - K_2 \cdot \dot{x}_2 - K_3 \cdot x_2 + K_3 \cdot R_3 \Delta P_{xx} + K_3 \cdot (R_1 + R_3) \Delta P_{k.nom} K_z^2; \\ \dot{x}_3 = -K_4 \cdot x_3 + \frac{1}{R_1 C_3} \cdot x_1 + \frac{1}{R_2 C_3} \cdot x_2. \end{cases} \quad (12)$$

Разработанная структурная схема (СХ) моделей (рис.1), соответствующая системе (12), построена по известной технологии [8]. СХ позволяет имитировать работу СМТ в различных режимах.

При анализе результатов численного эксперимента, когда будут сопоставляться текущие значения температур магнитопровода, обмотки и масла с их критическими значениями, будем ориентироваться на [4], согласно которой температуры наиболее нагретых точек (ННТ) обмотки, масла и магнитопровода не должны превышать:

- 160 °С для обмотки (по ГОСТ для всех высоковольтных трансформаторов, а согласно руководству МЭК, это значение равно 140 °С;
- 115 °С для масла по ГОСТ;
- 180 °С для магнитопровода по рекомендациям МЭК.

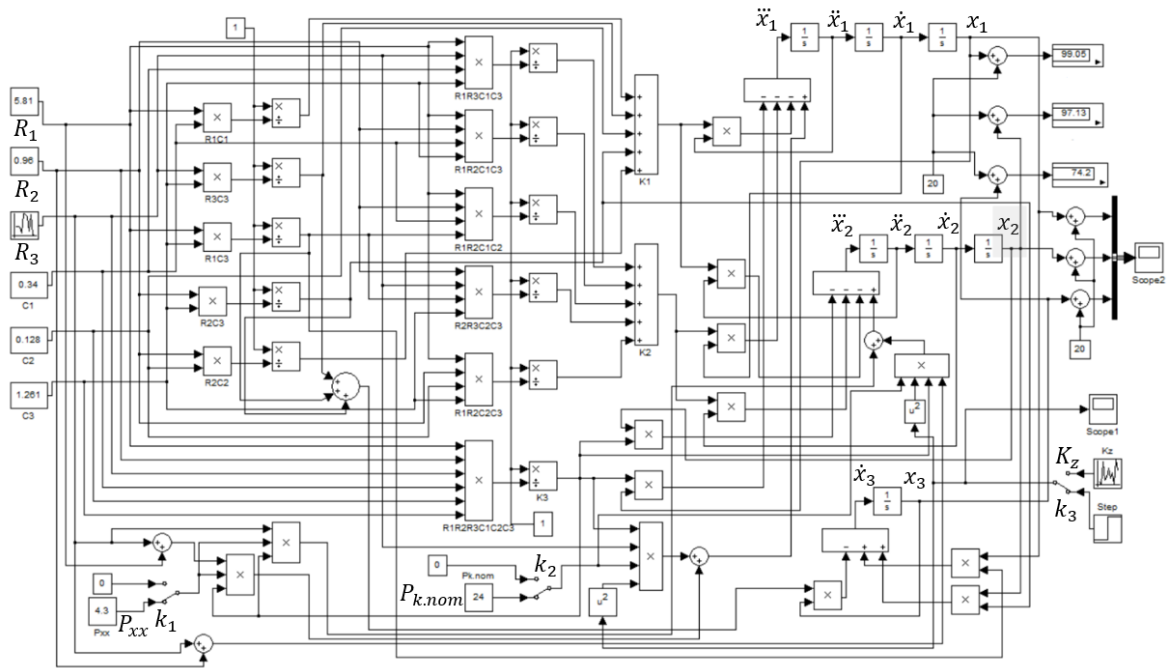


Рисунок 1 – Структурная схема моделей, описывающих процессы изменения температуры магнитопровода –  $\theta_1$ , обмотки –  $\theta_2$  и масла –  $\theta_3$  при стохастическом законе изменении КоЗаг трансформатора и температуры окружающей среды  $\theta_0$ .  
 Остановимся на моделировании тепловых переходных процессов трансформатора типа ТМ – 2500. Численные значения параметров  $\Delta P_{xx}$ ,  $\Delta P_{к.ном}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  рассматриваемого СМТ взяты из табл.1 [4].

Таблица 1–Данные тепловых сопротивлений и теплоемкостей трансформаторов 6/10/0,4 кВ

Параметр	Тип трансформатора					
	ТМ - 250	ТМ - 400	ТМ - 630	ТМ - 1000	ТМ - 1600	ТМ - 2500
$\Delta P_{xx}$ , кВт	0,82	1,05	1,56	2,4	3,0	4,3
$\Delta P_{к.ном}$ , кВт	3,7	5,5	7,6	12,0	18,0	24,0
$G_c$ , кг	415	650	900	1350	1950	2650
$G_o$ , кг	124	148	226	290	460	500
$G_m$ , кг	340	500	770	1225	1465	2270
$R_1$ , °С/кВт	30,49	23,81	16,03	10,42	8,33	5,81
$R_2$ , °С/кВт	6,21	4,18	3,03	1,92	1,28	0,96
$R_3$ , °С/кВт	12,17	8,4	6,0	3,82	2,62	1,94
$C_1$ , кВт·ч/°С	0,0533	0,0833	0,1155	0,1744	0,25	0,34
$C_2$ , кВт·ч/°С	0,0319	0,0381	0,0581	0,0744	0,118	0,128
$C_3$ , кВт·ч/°С	0,188	0,277	0,428	0,681	0,814	1,261

**Результаты численных экспериментов**

**Режим нагрева СМТ при включении его на постоянную нагрузку с  $K_z = 1$ , температура всех его элементов равна 20 °С**

Моделирование режима работы СМТ при  $K_z = 1$  реализуется следующим образом. Ключ  $k_3$  (рис.1) должен занимать нижнее положение. Изменение положения ключа осуществляется с помощью компьютерной мыши.

При этом закон изменения  $k_3$  определяется блоком (Step). Этот блок на своем выходе генерирует постоянный сигнал. Начало формирования сигнала и его значение задается перед началом моделирования. Эти параметры устанавливаются с помощью диалогового окна блока. Продолжительность моделирования установлена равной 20 единицам машинного времени.

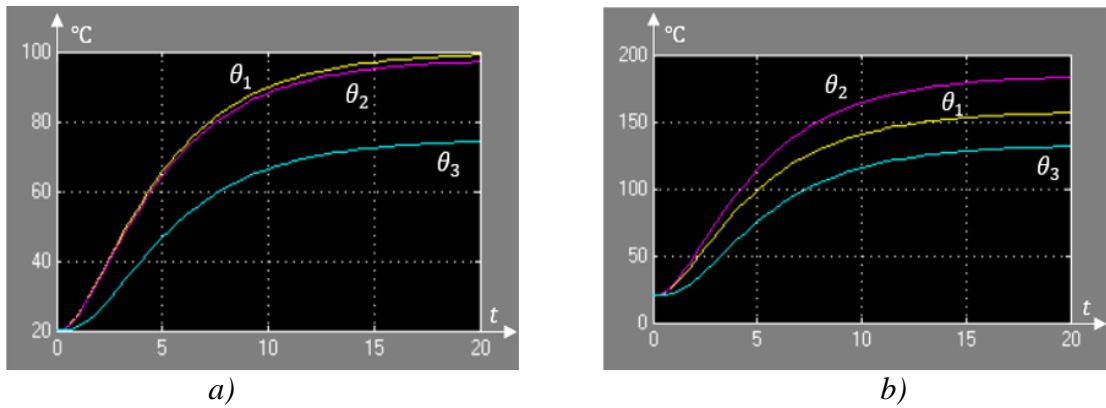


Рисунок – 2. Графики зависимостей температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  от продолжительности моделирования соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^{\circ}\text{C}$ )

а) при  $K_z = 1$ ; и б) при  $K_z = 1,5$

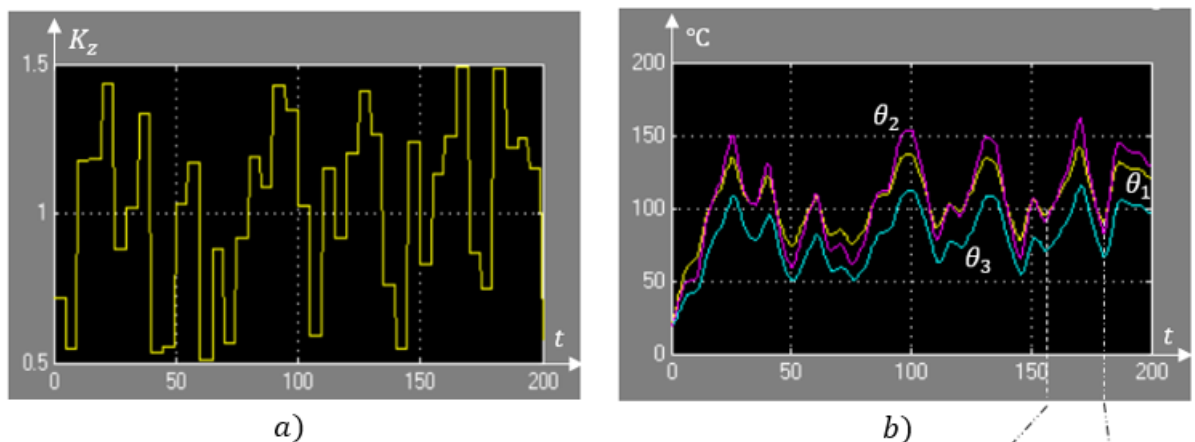
На рис.2, а) показаны графики зависимостей температур  $\theta_1 = (x_1 + 20) ^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta_2 = (x_2 + 20) ^{\circ}\text{C}$ ,  $\theta_3 = (x_3 + 20) ^{\circ}\text{C}$  соответственно магнитопровода, обмотки и масла при  $K_z = 1$ . По завершении моделирования температура магнитопровода, обмотки, масла, соответственно, равна  $99,05 ^{\circ}\text{C}$ ,  $97,13 ^{\circ}\text{C}$ ,  $74,20 ^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, рассмотренный режим работы СМТ является допустимым. На рис.2, б) показан результат повторного численного эксперимента (ЧЭ) при  $K_z = 1,5$ . График показывает, что по завершении процесса моделирования температуры элементов СМТ составляют соответственно: магнитопровода –  $156,6 ^{\circ}\text{C}$ ; обмотки  $183,2 ^{\circ}\text{C}$  и масла  $131,7 ^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, такой режим работы СМТ не приемлем, так как температура обмотки и масла превысили их максимально допустимые значения.

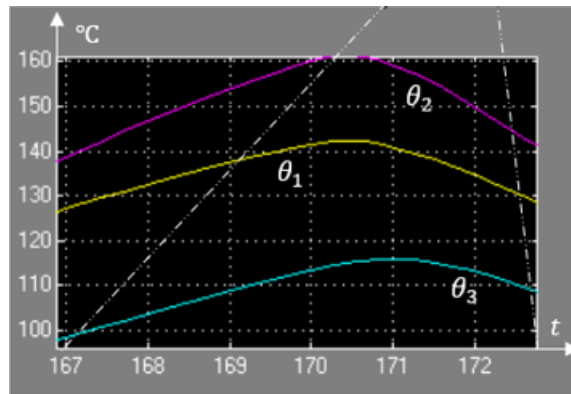
Повторяя такой ЧЭ при различных значениях  $K_z$  многократно, можно установить, что максимально допустимое значение  $K_z=1,28$ . При такой нагрузке температура обмотки соответствует  $141 ^{\circ}\text{C}$ , масла  $103,5 ^{\circ}\text{C}$ , а температура магнитопровода явно ниже допустимого значения  $128,5 ^{\circ}\text{C}$ .

### 1. Стохастический режим (коэффициент загрузки СМТ изменяется случайно)

Моделирование стохастического режима работы СМТ, когда значение  $K_z$  изменяется случайно в заданном интервале его значений, а температура окружающей среды  $\theta_0 = 20 ^{\circ}\text{C}$  фиксирована, реализуется следующим образом.

Ключ  $k_3$  (рис.1) должен занимать верхнее положение. В этом случае стохастический закон изменения  $K_z$  (рис.3, а)) определяется блоком Uniform Random Number (URN).



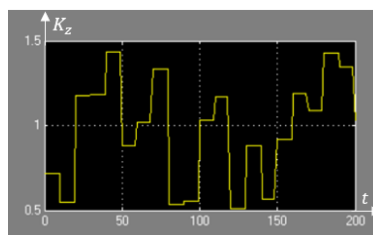


с)

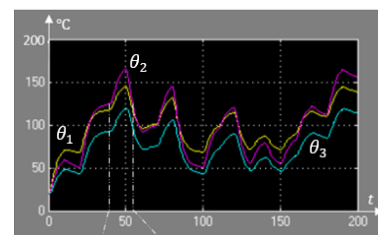
Рисунок 3 – Графики зависимостей: а) – коэффициента загрузки  $K_z \Delta t = 5$ ; б) – температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^{\circ}\text{C}$ ) при  $(K_z)_{max} = 1,5, (K_z)_{min} = 0,5$ ; в) – развёрнутый график тех же зависимостей в интервале времени (167 – 173)

Этот блок генерирует равномерно распределенные случайные числа по интервалу времени, который задается перед началом моделирования. Числовые параметры этого блока такие, как максимальное и минимальное значения случайных чисел, соответствующие максимальному и минимальному значениям  $K_z$ , задаются диалоговым окном.

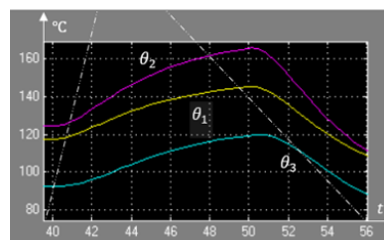
Из рис. 3 в) видно, что при принятых параметрах моделирования максимальная температура обмотки принимает в течение времени, длительностью в 1 единицу машинного времени (емв),  $160^{\circ}\text{C}$ , что допустимо по ГОСТ, а температура масла и магнитопровода соответственно равны  $115^{\circ}\text{C}$  и  $142^{\circ}\text{C}$ , что также допустимо. Однако режим работы СМТ недопустим уже при  $\Delta t = 10$  емв ( $\Delta t$  интервал времени, в течение которого  $K_z$  неизменен), так как температуры обмотки и масла превышают максимально допустимые значения, например, температура обмотки равна  $166^{\circ}\text{C}$ , а масла  $120^{\circ}\text{C}$  (рис.6, б)).



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Графики зависимостей: а) – коэффициента загрузки  $K_z \Delta t = 10$ ; б) – температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^{\circ}\text{C}$ ) при  $(K_z)_{max} = 1,5, (K_z)_{min} = 0,5$ ; в) – развёрнутый график тех же зависимостей в интервале времени (40 – 56)

Отметим, что, кроме рассмотренных режимов работы, имитационная модель в среде Simulink позволяет в заданном интервале времени имитировать и следующие режимы его работы.

## 2. Режим работы СТ с изменением климатических условий окружающей среды

Резкое изменение температурного режима объясняется тем, что в числителе формулы (5) расчета  $R_3$  содержится температура окружающей среды  $\theta_0$ . Случайное изменение этой величины приводит к случайности значения сопротивления  $R_3$ . Поэтому в структурной схеме (рис.1) значение  $R_3$  представлено блоком Simulink, на выходе которого генерируется случайное число, подчиняющееся нормальному закону (Random Number). Выбор такого закона обоснован тем, что, согласно статистическим наблюдениям, температура атмосферы подчиняется этому закону. Параметры блока устанавливаются с помощью его диалогового окна. Из табл. 1. выберем параметры, соответствующие  $R_3 = 1,94 \text{ }^\circ\text{C}/\text{kBt}$ .

В качестве примера рассмотрим режим нагрева СМТ при включении его на постоянную нагрузку с  $K_z = 1,2$ , при этом температура окружающей среды изменяется случайно со средним значением  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и дисперсией  $0,01(^\circ\text{C})^2$  (рис.5).

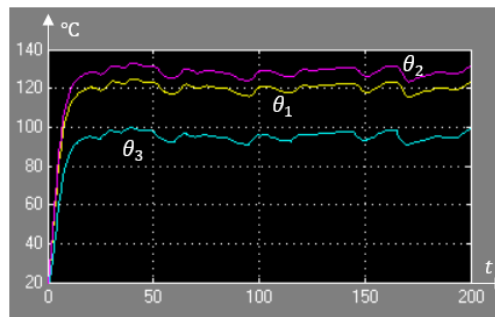


Рисунок 5 – Графики зависимостей: температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^\circ\text{C}$ ) при постоянной нагрузке СМТ с  $K_z = 1,2$ , и случайном изменении температуры окружающей среды

## 3. Холостой режим работы СМТ

Для организации такого режима необходимо ключ  $k_1$  перевести в нижнее положение, а  $k_2$  – в верхнее.

4. **Режим охлаждения** (уменьшения температуры перегрева магнитопровода, обмотки и масла) после отключения СМТ от сети (в интеграторах устанавливаются текущие значения температур магнитопровода, обмотки и масла, а положения ключей  $k_1, k_2$  верхние).

Температуры магнитопровода, обмотки и масла перед отключением СМТ от сети соответственно равны  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ .

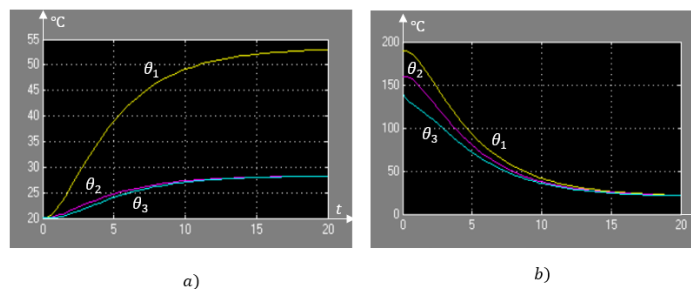


Рисунок 6 – Графики зависимостей температур  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  соответственно магнитопровода, обмотки и масла ( $^\circ\text{C}$ ) от продолжительности моделирования, а) – при холостом режиме работы СМТ; б) – в режиме его остывания



### **Заключение**

Если коэффициент загрузки не изменяется, тогда можем применить упрощенную тепловую модель, которую применяют на сегодняшний день для расчета ННТ обмотки трансформаторов. В реальности он меняется случайным образом, кроме того, температура окружающей среды также случайна.

Разработанная компьютерная модель (структурная схема рис.1), описывающая переходные тепловые процессы в СМТ, имеет более широкие возможности и дает нам эффективные данные, чем с существующими методами при расчете ННТ обмотки, так как определяется на численном решении дифференциальных уравнений теплопереноса при произвольном изменении во времени коэффициента загрузки и температуры окружающей среды.

Широкие возможности разработанной компьютерной (Simulink) модели объясняются тем, что при необходимости, по мере ввода в нее новых блоков, можно быстро менять математическое описание модели, более приближая его к реальности.

### **Литература**

1. Рассальский А.Н., Лучко А.Р., Конограй С.П., Гук А.А. Применение тепловой модели силового автотрансформатора для расчета нагрева его элементов в режиме эксплуатации // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": Сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2009. – № 7. – С. 133–138.
2. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1980.
4. Зализный Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 кВ // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 3–4. – С. 51 – 60.
5. Стандарт МЭК 354. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов (англ., фр.). – 2-е издание, 1991.
6. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987.
7. Сатаркулов К., Калматов У. А., Суюнтбекова Н. А. Анализ процесса охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методами // Проблемы автоматизации и управления. – 2018.– № 2 (35). – С. 42 – 50.
8. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. - СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2005. – 512 с.: ил.