

# ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аплатов М.Е., докт. техн. наук, Голованов А.А.  
ОАО «Электростанция»

Широкое распространение в диагностике электрооборудования получило тепловидение. Картина инфракрасного излучения весьма содержательна с точки зрения диагностической информации о техническом состоянии объекта. Возможность получения поверхностного распределения температурного поля позволяет выявлять многие дефекты, в частности, перегревы внешних контактных соединений, так называемые «тепловые мешки», засорение элементов систем охлаждения трансформаторов и многие другие. Однако продуктивный анализ этой информации требует от исследователя опыта и определенного искусства, что, очевидно, препятствует более широкому и более эффективному внедрению метода в практику. Одним из главных препятствий при этом видится отсутствие методик, которые позволили бы формализовать процесс анализа тепловизионных изображений. Целью настоящей работы является разработка подхода к такой формализации.

Воспользуемся одним из наиболее универсальных и весьма эффективных исследовательских инструментов, каким зарекомендовал себя подход, основанный на электроанalogии, и, в частности, на электротепловой аналогии.

Напомним некоторые электротепловые аналоги [1]: температура  $T$  соответствует электрическому потенциалу  $U$ , тепловой поток  $Q$  — электрическому току  $I$ , процесс теплоотдачи (или теплопередачи) характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$  (или коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ ) и моделируется электрической проводимостью  $G$  или сопротивлением  $R$ .

Суть подхода такова. Полученное с помощью тепловизора распределение температуры на баке трансформатора может быть интерпретировано как распределение потенциала электрического поля, созданного источником, расположенным внутри трансформатора (рис. 1). В качестве прообраза электрического источника (источника ЭДС или источника тока)

будем рассматривать интегральный тепловой источник — активную часть трансформатора. Изменение внутреннего состояния трансформатора или реактора, очевидно, скажется на изменении его внутреннего тепловыделения и, как следствие, на изменении внешнего температурного распределения на баке.

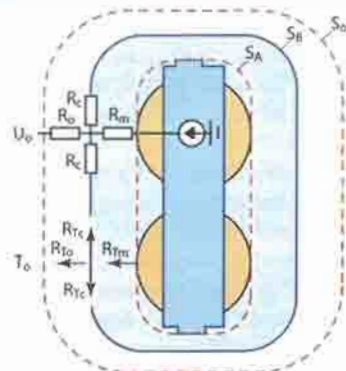


Рис. 1. Тепловая модель трансформатора

Для дальнейшего важно следующее допущение. Будем рассматривать только стационарное тепловое состояние трансформатора или реактора, то есть такой тепловой режим, при котором выделение тепла равно его отводу. Реально практически всегда существует изменение теплового и, соответственно, температурного распределения, однако будем считать такое изменение достаточно медленным.

Разобьем непрерывную поверхность бака трансформатора  $S_B$  на  $n$  площадок. В пределах каждой площадки будем считать температуру постоянной и равной ее среднему значению  $T_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). В целях упрощения модели будем считать тепловой источник заключенным внутри объема  $V_A$ , ограниченного некоторой сглаженной поверхностью  $S_A$ , след которой показан пунктиром на рис. 1. Интегральный тепловой поток  $Q$  разобьем на элементарные трубки  $q_i$ :  $Q = \sum q_i$

(одна из трубок показана пунктиром на рис. 1). Для общности не будем вводить требования равенства сечений трубок на поверхности бака (а также на поверхности  $S_A$ ), поскольку, как будет показано далее, такое ограничение неудобно для практической реализации подхода.

Предположим, что имеется некоторая условная замкнутая поверхность  $S_0$ , расположенная на определенном расстоянии от трансформатора, содержащая внутри себя трансформатор со всеми его элементами, температура которой равна температуре окружающей среды  $T_0$  (см. рис. 1). Элементом этой поверхности, например, является часть площадки, на которой установлен трансформатор. Если продолжить трубки теплового потока, рассеченные поверхностью бака, до пересечения с указанной условной поверхностью (обозначим эту часть  $i$ -ой трубки  $q_{i0}$ ), то построение упрощенной тепловой модели трансформатора можно считать практически завершённой.

Сопоставим каждую элементарную площадку с узлом электрической цепи, каждую элементарную трубку теплового потока — с ветвью цепи, источник теплового потока — с источником ЭДС. Свяжем узлы электрической цепи, соответствующие элементам поверхности бака, дополнительными ветвями, моделирующими тепловую связь указанных элементов между собой за счет теплопроводности стенки бака. Пример построения описанной цепной модели показан на рис. 1.

Отдельно остановимся на способе моделирования системы охлаждения, а также крышки и дна бака. На данном этапе разработки представляется, что имеет смысл моделировать систему охлаждения источником тока или ЭДС. Поскольку в общем случае интенсивность теплового потока в трубопроводах системы охлаждения не известна, а температуры входа и выхода масла, наоборот, как правило, определены, то удобно эквивалентировать этот элемент трансформатора идеальным источником ЭДС. При этом целесообразно помещать точки входа и выхода в узлах цепной модели. Что касается моделирования крышки и дна бака, то, учитывая практическую невозможность получения термограмм этих участков поверхности трансформатора, имеет смысл предварительно представить их изотермами с температурой, равной средней температуре граничных точек  $T_k = \sum T_{ij}/m$  ( $i = j_{k1}, \dots, j_{km}$ ),  $T_d = \sum T_{ij}/m$  ( $i = j_{d1}, \dots, j_{dm}$ ), отразив затем соответствующие допущения в электрической модели. Здесь  $m$  — число площадок разбиения поверхностей крышки и дна бака (с учетом их геометрического подобия). Наличием различных дополнительных элементов конструкции (газоразводных труб, расширителя, вводов и др.) при этом пренебрегаем.

Вполне возможно, что более удобным может оказаться способ моделирования системы охлаждения пассивными «теплоотдающими» ветвями. Критерием при этом, как обычно, будет практическое удобство модели.

Рассмотрим теперь особенности моделирования процессов теплоотдачи и теплопередачи в баке трансформатора. Будем считать коэффициент теплоотдачи постоянным на всей поверхности бака  $\alpha_B = \text{const}$ . Положим также одинаковым коэффициент теплопередачи вдоль стенки бака  $\lambda_B = \text{const}$ . Что касается теплового сопротивления стенки бака в направлении нормали к ее поверхности, то вследствие высокой теплопроводности металла стенки бака и очевидного соотношения  $P_B, h_B \gg d$  ( $P_B$  — периметр бака,  $h_B$  — высота бака,  $d$  — толщина стенки) примем его равным нулю. После принятия этих допущений получаем  $R_{T0}(\alpha_B) \leftrightarrow R_0 = 1/G_0$ ;  $R_{Tc}(\lambda_B) \leftrightarrow R_c = 1/G_c$ , где  $R_{T0}$  — тепловое сопротивление теплоотдачи в окружающую среду элементарной трубки теплового потока;  $R_{Tc}$  — тепловое сопротивление теплопередачи вдоль стенки бака между центрами двух элементарных площадок;  $R_0, G_0$  — соответственно сопротивление и проводимость, моделирующие теплоотдачу с элемента поверхности бака;  $R_c, G_c$  — сопротивление и проводимость, моделирующие передачу тепла посредством теплопроводности вдоль стенки бака;  $\leftrightarrow$  — символ соответствия.

Рассмотрим теперь модель теплопередачи внутри трансформатора. Очевидно, что и тепловые сопротивления разных элементарных трубок и интенсивность теплового потока через элементы поверхности  $S_A$  существенно различаются, что сильно усложняет постановку задачи. Примем для определенности, что тепловые сопротивления трубок одинаковы, тогда все различие в параметрах теплопередачи будет отнесено на счет неравномерности распределения элементарных тепловых источников по поверхности  $S_A$ . Обозначим тепловое сопротивление одной трубки  $R_{Tm}$ , а его электрические аналоги —  $R_m$  и  $G_m$ . С учетом всех принятых допущений и обозначений получаем электрическую модель теплового состояния трансформатора, изображенную на рис. 2.

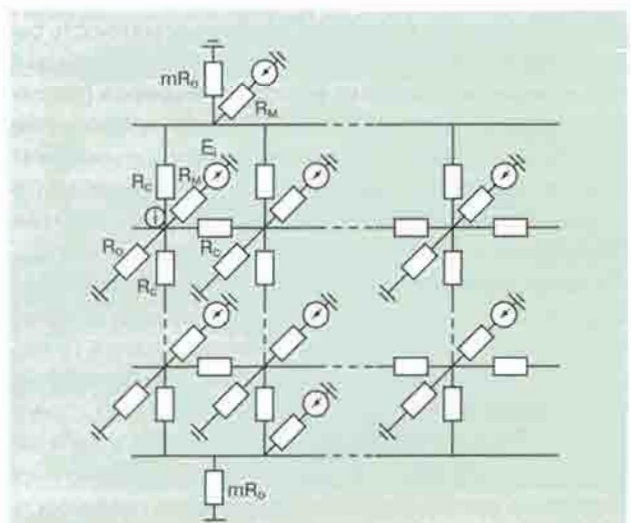


Рис. 2. Электротепловая модель трансформатора

Запишем систему уравнений полученной цепной модели

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n+2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1,n+2} \\ G_{21} & G_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ G_{n+2,1} & \dots & \dots & G_{n+2,n+2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{n+2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Примем в качестве базового (нулевого) узел с потенциалом  $U_0$  (соответствующий температуре  $T_0$ ). Порядок нумерации остальных узлов может быть выбран произвольно. Получаем:

$$\begin{aligned} G_{11} &= nG_c + mG_m + mG_o; \\ G_{n+2,n+2} &= G_{11}; \\ G_{ii} &= G_o + G_m + 4G_c \quad i = 2, \dots, n+1; \end{aligned}$$

$$G_{ij} = \begin{cases} G_c, & \text{если } i\text{-й узел инцидентен } j\text{-му узлу} \\ 0, & \text{если нет} \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, n+2.$$

Определение значений величин  $G_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, n+2$ ) представляет собой самостоятельную задачу. Для ее решения необходимо иметь значения коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности ( $\alpha_B, \alpha_M, \lambda_B$ ). Если значение  $\lambda_B$  можно считать известным (например, из справочника), то значения  $\alpha_B, \alpha_M$  должны быть найдены расчетным или экспериментальным способом. Будем считать, что для решения общей задачи не требуется высокая точность и можно обойтись приближенными оценками указанных величин (которые могут быть взяты из данных лабораторных или натурных экспериментов, выполненных ранее). Таким образом, значения величин  $G_{ij}$  будем считать априори известными.

Рассмотрим на примере шунтирующего реактора РОДЦ-110000/750 использование данного подхода. Выбор типа оборудования в данном случае был обусловлен максимальной открытостью поверхности бака (отсутствием навесных конструкций), наличием подробной совокупности термограмм (рис. 3), а также возможностью осуществить сопоставление с состоянием другого аналогичного реактора. Разобьем поверхность бака на участки так, как показано на рис. 4. Следуя указанной нумерации, составим вектор потенциалов (температур) и матрицу проводимостей (в роли нулевого узла выступает условная внешняя поверхность  $S_0$ ; номера 41 и 42 соответствуют крышке и днищу). Последующее умножение матрицы проводимостей на столбец потенциалов дает нам столбец токов, то есть тепловых потоков. Разделив значения тепловых потоков на соответствующие площади, получаем столбец с удельными тепловыми потоками. Таким образом от распределения температур по поверхностям бака мы переходим к распределению удельных тепловых потоков, исходящих с внутренней условной поверхности, содержащей в себе активную часть. В табл. 1 приведены результаты расчетов и графики распределения температур по поверхности бака и плотностей теплового потока по поверхности  $S_0$ . Структура матрицы проводимостей показана на рис. 5. В табл. 2 показан вид одного из блоков матрицы.



Рис. 3. Термограмма части поверхности бака реактора



Рис. 4. Разбиение поверхности бака на участки

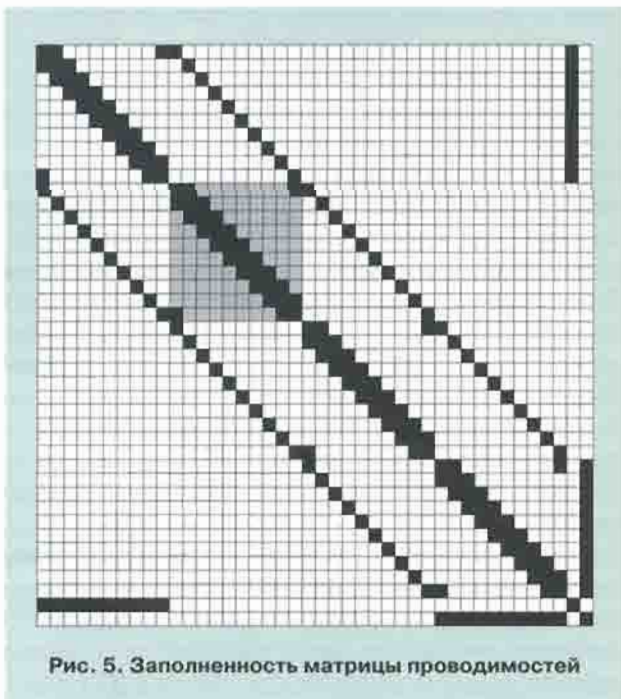


Рис. 5. Заполненность матрицы проводимостей

Результаты расчета

Таблица 1

T	W	Q
52,9	209,0843	575,7804
50,7	215,5732	593,6496
47,9	211,2405	427,5184
47,9	252,7351	413,0638
48	220,8239	446,9137
46,6	161,1884	443,8838
46,6	161,1884	443,8838
48	217,4421	440,0696
48,8	259,9653	424,8806
49,6	249,3718	504,6903
44,2	226,3222	623,2504
45	151,5648	417,382
44,1	191,8852	388,3462
42,2	207,068	338,4267
40,3	166,4085	336,7852
41,7	143,2014	394,3508
41,7	140,5442	387,0332
42	177,094	358,4111
43,9	219,6319	358,9607
45,1	193,7402	392,1005
43,6	147,0163	404,8564
45	157,0047	432,3626
42,5	176,455	357,118
41,7	204,0039	333,4187
38,8	153,8993	311,4687
40	129,5402	356,7303
41,5	139,7347	384,804
40,8	167,0315	338,0462
42,7	208,7453	341,168
44,5	192,1824	388,9477
47,5	200,7733	473,2767
47,5	199,0303	469,168
47,5	255,5504	442,7189
47,3	298,7742	417,9924
47,3	259,7089	449,9231
47,3	203,7027	480,1821
47,3	201,8352	475,7799
47,3	256,2534	443,9367
47,5	299,2797	418,6996
47,5	252,0949	436,7325
50	4026,738	465,1438
47,4	3663,515	423,1866



## ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод работоспособен, но требует совершенствования.

2. Профили распределения тепловых источников для рассмотренных реакторов близки (вне зависимости от внешних условий и режима работы системы охлаждения).

3. Режим работы системы охлаждения, то есть интенсивность массопереноса трансформаторного масла, может быть учтен изменением коэффициента теплопроводности масла.

Таблица 2

Выделенная подматрица (блок)

6,489	-0,439	0	0	0	0	0	0	0	-0,372
-0,439	6,492	-0,372	0	0	0	0	0	0	0
0	-0,372	8,086	-0,288	0	0	0	0	0	0
0	0	-0,288	9,508	-0,288	0	0	0	0	0
0	0	0	-0,288	8,075	-0,372	0	0	0	0
0	0	0	0	-0,372	6,482	-0,439	0	0	0
0	0	0	0	0	-0,439	6,484	-0,372	0	0
0	0	0	0	0	0	-0,372	8,076	-0,288	0
0	0	0	0	0	0	0	-0,288	9,515	-0,288
-0,372	0	0	0	0	0	0	0	-0,288	8,099

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коздоба Л.А. Электромоделирование температурных полей. — Л.: Судостроение, 1964.