

## Мониторинг силовых трансформаторов от НТЦ "АРГО"

В настоящее время для мониторинга силовых трансформаторов разработано определенное количество систем, что связано с возросшей потребностью в оперативной оценке реального состояния стареющего парка оборудования.

Практически все системы мониторинга нацелены на оценку состояния изоляции как наиболее важного и наиболее подверженного разрушению элемента масляного трансформатора. Для этой цели используют оценку режима нагрузки трансформатора, контроль температуры наиболее нагретой точки, определение влагосодержания в бумажной изоляции, определения тангенса угла диэлектрических потерь. Далее в списке приоритетов стоит контроль состояния системы охлаждения, при оценке эффективности которой используются обычно следующие параметры: температура верхних слоев масла, разница температур масла на входе и выходе системы охлаждения, температура окружающей среды, состояние маслонасосов и вентиляторов (рис.1).



Рис. 1. Регистрируемые параметры трансформатора

В НТЦ «АРГО» ведется разработка системы мониторинга, позволяющая удовлетворить основные требования к подобным системам. Основная задача системы – создать возможность получения достоверной информации о состоянии трансформатора и режимах его эксплуатации.

При разработке системы мониторинга основной акцент делался на:

1. Модульный принцип построения, что позволяет гибко находить компромисс между затратами на разработку системы и степенью ее эффективности;
2. Возможность интеграции с различными типами датчиков и измерительных приборов;
3. Создание алгоритмов выявления процессов влияющих на срок службы трансформатора;

В настоящее время в системе производится контроль:

1. **Перегрева обмоток.** Измеряется и рассчитывается по модели температура наиболее нагретой точки обмотки по данным температуры верхних слоев масла и нагрузки;
2. **Старения изоляции.** Расчет старения и общего износа изоляции по температуре наиболее нагретой точки и математической модели обмотки.
3. **Нагрузочной (перегрузочной) способности.** Расчет перегрузочной способности без ущерба для общего срока службы.
4. **Состояния и эффективности системы охлаждения.** Контроль режима работы системы охлаждения. Расчет количества пусков и отработанного ресурса электродвигателей маслонасосов и вентиляторов. Расчет температуры верхних слоев масла и сравнение ее с фактической. Расчет коэффициентов теплопередачи охладителей.

В качестве центрального элемента системы мониторинга используется контроллер МУР 1001.2 TSM, который имеет возможность, по мимо функций АСКУЭ, обслуживать трансформаторы и предназначен для:

- непрерывного измерения, регистрации и отображения основных параметров трансформатора в нормальных, предаварийных и аварийных режимах;
- оценки технического состояния трансформатора по математическим моделям;
- управления системами охлаждения различных типов;
- ручного дистанционного управления системой регулирования напряжения трансформаторов под напряжением (РПН).

В состав ПТК Энергоресурсы входят:

- Автоматизированное рабочее место системы, выполняющее функции сервера локальных вычислительных сетей;
- шкаф мониторинга, реализующий функции контроля текущего состояния трансформатора, а также сбора информации о режимах его работы;

- первичные датчики;
- пакет программ, обеспечивающих работу системы.

Конкретная конфигурация ПТК Энергоресурсы зависит от количества, состава и особенностей конструкций контролируемого оборудования и позволяет наращивать объемы контроля и функций по мере включения нового оборудования или оснащения объектов контроля дополнительными датчиками.

#### **МУР 1001.2 TSM решает следующие задачи:**

1. Управление системой охлаждения, обеспечивающее оптимальное соотношение нагрузки трансформатора, температуры масла и энергопотребления охладителей.
2. Контроль температуры окружающей среды, температуры верхних слоев масла, температуры, температуры наиболее нагретой части обмотки.
3. Контроль суммарной токовой нагрузки трансформатора (профиль мощности).
4. Прием сигналов от внешних датчиков с аналоговым выходным сигналом 4...20 мА.
5. Прием сигналов от интеллектуальных датчиков с выходным интерфейсом RS 485 (датчики влажности, датчики частичных разрядов и пр.).

#### **МУР 1001.2 TSM предназначен для выполнения следующих функций:**

1. Диагностика состояния контролируемого оборудования, в том числе:
  - организация сеансов связи с каждым из датчиков, входящих в подсистему;
  - организация сеансов связи с приборами контроля состояния изоляции и измерения частичных разрядов;
  - организация сеансов связи с приборами учета электроэнергии АСКУЭ.
2. Измерение активной и реактивной мощностей трансформатора, оценка качества электроэнергии.
3. Контроль длительных повышений напряжения.
4. Контроль перегрузок трансформатора.
5. Получение результатов самодиагностики первичных датчиков.
6. Передача управляющих воздействий на включение/отключение маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения трансформатора.
7. Выполнение в реальном времени задач математического моделирования состояния трансформатора.

**В состав программного обеспечения МУР 1001.2 TSM входят следующие алгоритмы:**

1. Контроль температуры верхних слоев масла
2. Старение изоляции
3. Контроль температуры наиболее нагретой точки обмотки
4. Контроль повышений напряжения
5. Контроль содержания влаги в изоляции
6. Контроль состояния и оценка эффективности работы системы охлаждения
7. Расчет предельной температуры ННТ по критерию образования пузырьков

### **Контроль температуры верхних слоев масла**

Значения параметра «температура верхних слоев масла» ( $t$ ) анализируются следующим образом.

Если  $t < 45$ , то генерируется событие (предупреждение): «Температура верхних слоев масла опустилась ниже  $45^{\circ}\text{C}$ ».

Если  $45 \leq t \leq 65$ , то генерируется событие (норма): «Температура верхних слоев масла пришла в норму».

Если  $65 < t \leq 75$ , то генерировать сообщение (предупреждение): «Перегрев масла. Температура верхних слоев масла превышает  $65^{\circ}\text{C}$ ».

Если  $t > 75$ , то генерировать сообщение (тревога): «Перегрев масла. Температура верхних слоев масла превышает  $75^{\circ}\text{C}$ ».

### **Старение изоляции**

В ГОСТ предусмотрены ограничения, связанные с длительными и кратковременными перегрузками трансформаторов, что сопряжено с опасностью внезапного отказа трансформатора и сокращением срока его службы, вызванного увеличением скорости совокупного термохимического износа изоляции.

Принято считать, что в интервале температур от  $80$  до  $140^{\circ}\text{C}$  скорость износа изоляции удваивается при каждом увеличении температуры приблизительно на  $6^{\circ}\text{C}$  (закон Аррениуса). При этом относительная скорость износа изоляции определяется по формуле:

$$K_1(\Theta_h) = 2^{(\Theta_h - \Theta_0)/6} \quad (2.11)$$

где  $\Theta_h$  – температура наиболее нагретой точки обмотки;  $\Theta_0 = 98^{\circ}\text{C}$  – эталонное значение температуры ННТ при номинальной нагрузке для трансформаторов соответствующих требованиям ГОСТ 11677.

В [32] расчет скорости износа ведется без учета влияния влажности изоляции [83]. При учете влияния температуры ННТ и влажности твердой изоляции коэффициент старения определяется как

$$K = K_1(\Theta_h) \cdot K_2(W) \quad (2.12)$$

Функция  $K_2(W)$ , отражающая влияние влажности на процесс старения, определяется как

$$K_2(W) = (W / W_0)^{1.46} \quad (2.13)$$

где  $W_0$  – опорная влажность бумажной изоляции (не более 0,5 %).

### **Контроль температуры наиболее нагретой точки обмотки**

Наиболее критичной для трансформатора и ограничивающей его нагрузку является температура наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки.

При расчете температуры ННТ принимается ряд упрощений, снижающих достоверность расчета в неустановившемся тепловом режиме, которые не позволяют учесть реальные кратковременные изменения нагрузки, приводящие к изменениям скорости старения. Расчет температуры ННТ выполнен в соответствии с рекомендациями, путем решения дифференциальных уравнений теплопереноса при произвольном изменении во времени тока нагрузки и температуры окружающей среды, что наиболее подходит для непрерывного мониторинга трансформатора в реальном времени.

Температура верхних слоев масла фиксируется системой мониторинга. Превышение температуры ННТ над температурой верхних слоев масла  $\Delta\Theta_h$  представляется в виде разности двух составляющих:

$$\Delta\Theta_h = \Delta\Theta_{h1} - \Delta\Theta_{h2} \quad (2.1)$$

Эти составляющие определяются решением дифференциальных уравнений:

$$k_{12} = K^y \cdot \Delta\Theta_{hr} = k_{22} \cdot \tau_w \cdot \frac{d\Delta\Theta_{h1}}{dt} + \Delta\Theta_{h1}, \quad (2.2)$$

$$(k_{12} - 1) \cdot K^y \cdot \Delta\Theta_{hr} = (\tau_o / k_{22}) \cdot \frac{d\Delta\Theta_{h2}}{dt} + \Delta\Theta_{h2}, \quad (2.3)$$

где  $k_{21}$ ,  $k_{22}$ ,  $y$  – параметры расчетной модели, определяемые конструкцией трансформатора;  $K$  – коэффициент нагрузки трансформатора;  $\Delta\Theta_{hr}$  – расчетное превышение температуры ННТ над температурой верхних слоев масла в номинальном режиме;  $\tau_w$ ,  $\tau_o$  – тепловые постоянные времени для обмотки и температуры верхних слоев масла соответственно.

Температура ННТ  $\Theta_h$  определяется как сумма температуры верхних слоев масла  $\Theta_o$  и вычисленного превышения:

$$\Theta_h = \Theta_o + \Delta\Theta_h \quad (2.4)$$

### Контроль повышений напряжения

Контроль повышений напряжения, воздействующих на трансформатор, основывается на и устанавливает уровень превышения напряжения над максимально допустимым рабочим напряжением на стороне ВН, длительность перенапряжений, и их допустимое количество в год (табл.1). Первичная информация о состоянии контролируемых параметров поступает с датчиков тока, напряжения и мощности.

При появлении перенапряжений выдается предупредительная сигнализация, а при недопустимом уровне или недопустимой длительности – аварийная. По результатам работы ведется архив данных и событий.

Таблица 1

индекс $\nu$	Уровень перенапряжения $\nu[k]$ , отн. Ед	$b$	Постоянная времени фильтра, с*	Допустимое время $T_{max}$ ,	Количество в год $N_{max}$ , не более
	$0 < U \leq 1$	512	20,48	неогр	Неогр
0	$1 < U \leq 1,025$	256	10,24	<28800	200
1	$1,025 < U \leq 1,05$	128	5,12	<10800	125
2	$1,05 < U \leq 1,075$	64	2,56	<3600	75
3	$1,075 < U \leq 1,1$	32	1,28	<1200	50
4	$1,1 < U \leq 1,15$	16	0,64	<300	7
5	$1,15 < U \leq 1,2$	8	0,32	<60	5
6	$1,2 < U \leq 1,25$	4	0,16	<20	4
7	$1,25 < U \leq 1,3$	4	0,16	<20	4
8	$1,3 < U \leq 1,35$	4	0,16	<20	4
9	$1,35 < U \leq 1,4$	4	0,16	<20	4
10	$1,4 < U \leq 1,45$	4	0,16	<20	4
11	$1,45 \leq U < 1,5$	4	0,16	<20	4
12	$1,5 \leq U < 1,55$	4	0,16	<20	4
13	$1,55 \leq U < 1,6$	4	0,16	<20	4
14	$1,6 \leq U < 1,65$	4	0,16	<20	4
15	$1,65 \leq U < 1,7$	4	0,16	<20	4
16	$1,7 \leq U < 1,75$	4	0,16	<20	4
17	$1,75 \leq U < 1,8$	4	0,16	<20	4
18	$1,8 \leq U < 1,85$	4	0,16	<20	4
19	$1,85 \leq U < 1,9$	2	0,08	<1	-
20	$1,9 \leq U < 1,95$	0	0	<0.5	-
21	$1,95 \leq U < 2,00$	0	0	<0.1	-
22	$U \geq 2,00$	0	0	недопуст	-

## Контроль содержания влаги в изоляции

Наличие влаги в твердой изоляции приводит к снижению электрической и механической прочности. При каждом удвоении содержания влаги ресурс изоляции снижается наполовину.

Датчики измеряют относительную влажность трансформаторного масла, которая определяется как отношение содержащейся в масле влаги к ее насыщенному содержанию, при определенном давлении и температуре.

Расчет содержания влаги в твердой изоляции производится в реальном времени по измеренной относительной влажности масла и основан на законе равновесия влаги в системе «масло – бумага», обладающей при одной и той же температуре одинаковым относительным насыщением.

По измеренной относительной влажности масла  $\varphi$  определяется абсолютное влагосодержание масла  $W_m$ , г/т:

$$W_m = \varphi \cdot C(\Theta_d), \quad (2.5)$$

где  $\Theta_d$  – значение температуры масла вблизи датчика влажности, °C;  $C(\Theta)$  – функция предельного влагосодержания масла от температуры,

$$C(\Theta) = (229.9 + 9.812 \cdot C_A) \cdot 10^{(4.862 - 0.0182 \cdot C_A)(1 - 343 / (\Theta + 273))}, \quad (2.6)$$

где  $C_A$  – содержание ароматических углеводородов в масле, %.

Затем определяется относительная влажность масла  $\varphi'$  при температуре ННТ по соотношению:

$$\varphi' = W_m / C(\Theta_h). \quad (2.7)$$

По относительной влажности  $\varphi'$  определяется парциальное давление паров воды

$$p = \varphi' \cdot 10^{(8.0589 - 1729.9875 / (\Theta_h + 273.856))}. \quad (2.8)$$

Расчетная влажность твердой изоляции  $W_p$  (%) определяется как

$$W_p = A \cdot e^{-B \cdot \Theta_h} \cdot p^{k+a \cdot \Theta_h}, \quad (2.9)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $k$ ,  $a$  – табличные данные для определенного вида изоляции.

Следует отметить, что выражение (2.9) определяет содержание влаги в твердой изоляции при равновесном состоянии системы. Для учета динамики процессов миграции влаги между маслом и бумагой принимается, что влажность бумаги меняется экспоненциально с постоянной времени  $\tau$ , составляющей порядка 3 ч. При этом текущее значение влажности  $W$  определяется решением дифференциального уравнения:

$$\frac{dW}{dT} = \frac{W_p - W}{\tau} \quad (2.10)$$

## Контроль состояния и оценка эффективности работы системы охлаждения

Штатное функционирование системы охлаждения определяется исправностью всех входящих в нее элементов. Для контроля ее работы используются датчики дискретных сигналов, показывающие состояние автоматов питания и аналоговые датчики, контролируемые ток в цепи двигателей насосов и вентиляторов. Работа системы охлаждения контролируется путем измерения значений параметров, приведенных в табл. 2.

Одновременно с контролем исправности отдельных элементов системы охлаждения осуществляется интегральная оценка эффективности ее работы, производимая путем сравнения расчетной и измеряемой температур верхних слоев масла. Расхождение этих значений на некоторую заданную величину свидетельствует о наличии неисправности.

Таблица 2

Элемент системы охлаждения	Контролируемый параметр	Критерий неисправности
Маслонасос	Токи в фазах двигателя. Наличие потока масла	Отсутствие тока. Неполнофазный режим Повышенный ток. Отсутствие потока масла.
Вентилятор	Токи в фазах двигателя	Отсутствие тока. Неполнофазный режим. Повышенный ток.
Теплообменник	Температура масла на входе. Температура масла на выходе. Температура окружающей среды	

Расчет производится решением дифференциального уравнения:

$$\left[ \frac{1 + K^2 \cdot R}{1 + R} \right]^x \cdot \Delta\Theta_{or} = k_{11} \cdot \tau_0 \cdot \frac{d\Theta_0}{dt} + (\Theta_0 - \Theta_a), \quad (2.14)$$

где  $K$  – коэффициент нагрузки трансформатора;  $R$  – отношение нагрузочных потерь при номинальной нагрузке к потерям холостого хода;  $x$  – показатель степени в тепловом дифференциальном уравнении верхних слоев масла;  $k_{11}$  – константа;  $\tau_0$  – постоянная времени температуры верхних слоев масла;  $\Theta_0$ ,  $\Theta_a$  – текущие температуры верхних слоев масла и охлаждающего воздуха.



## Расчет предельной температуры ННТ по критерию образования пузырьков

При колебаниях нагрузки и температуры окружающей среды и в меньшей степени в установившемся тепловом режиме работы трансформатора, существует неравномерное распределение влаги между трансформаторным маслом, главной и витковой изоляцией. Вода в масле может присутствовать в растворенном виде, в состоянии механической связи с молекулами масла, а также в виде суспензии. В бумажной изоляции вода может находиться в виде пара, свободная вода в капиллярах, поглощенная вода, а также в адсорбированном состоянии на поверхности бумаги. Основная масса воды, в соотношении 100/1 по сравнению с маслом, содержится в твердой изоляции.

Интенсивные переходные тепловые процессы, могут вызвать выделение из бумаги пузырьков газа, образование которых зависит от конструкции и температуры проводника обмотки (170 – 180°C), содержания влаги в твердой изоляции, содержания растворенных газов в масле. При этом наиболее вероятные источники их образования находятся в местах с высокой напряженностью электростатического поля вблизи обмоток.

Косвенно на процесс образования пузырьков может влиять скорость и длительность нарастания температуры и предшествовавшая нагрузка трансформатора. В результате этого снижается электрическую прочность бумажно-масляной изоляции, что представляет опасность внезапного отказа трансформатора при кратковременных превышениях нагрузки выше номинальной.

Перечисленные выше факторы определяют динамику изменения влажности твердой изоляции вблизи наиболее нагретых частей обмотки, т.е. динамику изменения соотношения мгновенных значений температуры и влажности в этой области. Значения допустимых с точки зрения образования пузырьков температур ННТ для трансформаторов с малым газосодержанием масла при длительно воздействующей нагрузке приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Содержание влаги в твердой изоляции, %	0.5	1	3	7
Допустимая температура ННТ, °С	160	130	110	80

При перегрузках, длительность которых не превышает 30 мин, допустимая температура ННТ повышается на 10°C, а если длительность перегрузки менее 10 мин – на 30°C. Для трансформаторов с азотной защитой допустимая температура ННТ снижается на 20°C.

Различные модификации МУР 1001.2 TSM имеют разный состав и конфигурацию коммутационной аппаратуры и обеспечивают разный объем принимаемых сигналов, специфичных для конкретных типов трансформаторов. Представленная комплектация системы мониторинга, обеспечивает необходимый и достаточный набор сигналов. По желанию заказчика система может быть расширена путем подключения аналоговых сигналов от других систем по заранее оговоренным протоколам обмена данными. Допускается подключение дополнительных диагностических подсистем, используя их в качестве интеллектуальных датчиков.

Все данные поступают в базу данных системы мониторинга, из которой получает необходимые сведения экспертная система. Основные потоки данных показаны на рис. 2.

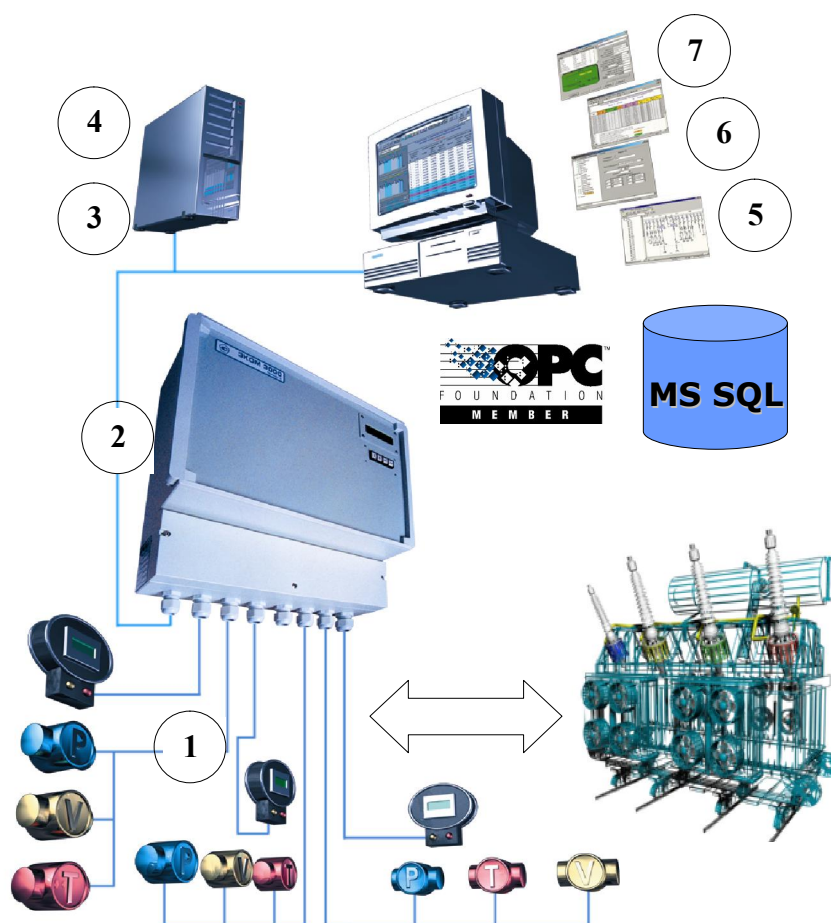


Рис. 2.3. Структурная схема информационного обмена

Система смонтирована в виде отдельного шкафа 120 x 70 x 90 мм с выносным источником бесперебойного питания размерами, устанавливаемого в помещении с температурой воздуха не ниже 5 °С, либо непосредственно у трансформатора в шкафу с

подогревом. Все узлы и датчики устанавливаемые на трансформаторе рассчитаны на эксплуатацию без дополнительного подогрева при температуре - 40 °С.

Стоимость системы и оборудования, без учета проекта и монтажных работ может варьироваться от 100 000 руб. в минимальной комплектации, для мониторинга трансформаторов малой и средней мощности и до 1 000 000 руб. в максимальной комплектации, с полным контролем системы охлаждения и оценкой содержания газов в масле.