

## УПРАВЛЕНИЕ ОХЛАЖДЕНИЕМ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО КРИТЕРИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Поляков М.А., к.т.н., доц.

Запорожский национальный технический университет

Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, кафедра "Электрические аппараты"

тел.(061) 228-16-10, E-mail: polyakov@zntu.edu.ua

*Пропоновані показники технічної та економічної ефективності охолодження потужного масляного трансформатора, принципи їх використання для регулювання охолодження, структури регуляторів системи охолодження на основі критеріїв ефективності та принципи програмної реалізації у вигляді розподіленого додатку*

*Предложены показатели технической и экономической эффективности охлаждения силового масляного трансформатора, принципы их использования для регулирования охлаждения, структуры регуляторов системы охлаждения на основе критериев эффективности и принципы программной реализации в виде распределенного приложения*

### ВВЕДЕНИЕ

Силовые масляные трансформаторы с принудительным охлаждением имеют системы охлаждения с одной или более ступенями, которые содержат регулятор охлаждения, насосы, электродвигатели, вентиляторы и коммутационные аппараты [1].

Как правило, суммарное время, когда система охлаждения находится в режимах OFAN и OFAF, соизмеримо со сроком службы трансформатора. Поэтому, параметры системы охлаждения, в значительной степени, определяют эксплуатационные расходы на трансформатор. Сокращение этих расходов является актуальной задачей в условиях рыночной экономики, удорожания энергоресурсов и комплектующих систем охлаждения. Один из путей решения задачи сокращения эксплуатационных расходов на трансформатор – повышение эффективности регулирования охлаждения.

Как известно [2], оценка эффективности предполагает соизмерение величины экономического или технического эффекта с затратами на его достижение. Применительно к регулированию охлаждения силового масляного трансформатора, оценка эффективности не определена в доступной автору литературе и нуждается в уточнении и детализации.

Целью настоящей работы является определение показателей эффективности охлаждения силового масляного трансформатора и использования их для регулирования охлаждения.

Экономический эффект от работы системы охлаждения базируется на техническом эффекте – экономии ресурса изоляции трансформатора. Расход ресурса изоляции зависит от скорости ее термического износа. Скорость износа изоляции определяется температурой обмотки трансформатора, о которой мы судим, как правило, по данным измерения температуры верхних слоев масла. Принудительное охлаждение приводит к снижению температуры обмоток. В результате чего уменьшается скорость износа изоляции и возникает экономия ресурса изоляции. Вместе с тем, в режимах охлаждения OFAN и OFAF, сама система охлаждения потребляет значительное количество электроэнергии, расходуется ресурс ее элементов и, следовательно, возникают затраты, которые необходимо соизмерять с эффектом экономии ресурса изоляции трансформатора.

Результаты оценки эффективности охлаждения целесообразно использовать в процессе проектирования систем охлаждения для обоснования проектных решений, определения допустимой нагрузки трансформатора и для непосредственного управления сис-

темой охлаждения. В последнем случае система охлаждения должна содержать соответствующий регулятор. Известные регуляторы систем охлаждения являются релейными или нечеткими [3]. В них используется обратная связь по техническому параметру объекта управления – температуре верхних слоев масла. В настоящей работе рассмотрены принципы построения регулятора системы охлаждения с обратной связью по эффективности охлаждения.

Технической основой для выполнения в реальном времени расчетов эффективности охлаждения и использования полученных значений для регулирования охлаждения являются системы мониторинга и управления силовых трансформаторов, которые содержат вычислительные устройства в виде промышленных компьютеров и контроллеров [4].

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ

Оценку эффективности охлаждения будем вести применительно к дискретному регулятору. То есть, полагаем, что решение об изменении режима охлаждения принимается периодически с периодом  $\Delta t$ , а измерения температуры масла, окружающей среды и тока нагрузки трансформатора производятся практически непрерывно.

Важным этапом оценки эффективности является выбор интервала времени для оценки эффекта. В регуляторах на основе текущих значений возмущающих факторов это может быть предыдущий или текущий период регулирования. В регуляторах на основе прогноза изменения дестабилизирующих факторов, это может быть горизонт прогноза, который соизмерим с тепловой постоянной системы охлаждения.

При оценке эффективности за период регулирования в устройстве управления системой охлаждения должно быть смоделировано изменение скорости расхода изоляции во всех режимах и выполнено сравнение с результатами работы системы охлаждения в режиме ONAN. Моделирование скорости расхода ресурса изоляции на горизонт прогноза предполагает моделирование не только термодинамических процессов в трансформаторе, но и моделирование регулятора. Для этих целей могут быть использованы модели, предложенные в работе [3].

Предположим, что система охлаждения имеет одну ступень и работает в режимах ONAN и OFAF, именуемые в дальнейшем, соответственно, "on" и "off". Расход ресурса изоляции в режимах "on" ( $T_{on}$ ) и "off" ( $T_{off}$ ) определим по формулам:

$$T_{on} = \int_{t_1}^{t_2} V_{on}(t) dt; \quad (1)$$

$$T_{off} = \int_{t_1}^{t_2} V_{off}(t) dt, \quad (2)$$

где  $t_1, t_2$  – время для граничных точек текущего интервала регулирования охлаждения, причем  $t_2 > t_1$  и  $t_2 - t_1 = \Delta t$ ;  $V_{on}(t), V_{off}(t)$  – зависимости от времени относительных скоростей расхода ресурса изоляции трансформатора обусловленные термическим старением в режимах "on" и "off", соответственно.

При этом в каждый момент времени скорости  $V_{on}(t), V_{off}(t)$  вычисляются по формуле [5]:

$$V = 2^{(\Theta_i - \Theta_{il})/6}, \quad (3)$$

где  $\Theta_i$  – текущая температура наиболее нагретой точки изоляции трансформатора, которая рассчитывается по методике [5] на основе измерения температуры верхних слоев масла;  $\Theta_{il}$  – температура наиболее нагретой точки изоляции трансформатора, при которой скорость расхода ресурса изоляции трансформатора равна единице (по ГОСТ 14209-97  $\Theta_{il} = 98^\circ\text{C}$ ).

Экономию ресурса изоляции в результате применения охлаждения определим как

$$T = T_{off} - T_{on}. \quad (4)$$

Полученный технический эффект можно соизмерять:

- со временем  $t_{on}$  нахождения системы охлаждения в режиме "on" – техническая эффективность охлаждения в смысле его производительности

$$R_t = T / t_{on}; \quad (5)$$

- с затратами энергии  $A$  на охлаждение – техническая эффективность охлаждения в смысле экономичности энергопотребления

$$R_M = T / A = T / (t_{on} M) = R_t / M, \quad (6)$$

где  $M$  – электрическая мощность, потребляемая системой охлаждения от сети;

- со стоимостью ресурсов всех видов, израсходованных системой охлаждения – технико-экономическая эффективность охлаждения

$$R_c = T / C_{эп}, \quad (7)$$

где  $C_{эп}$  – стоимость эксплуатации системы охлаждения в режиме "on" за период регулирования.

При этом стоимость  $C_{эп}$  определим по формуле:

$$C_{эп} = \Delta t (MC_э + C_{рсо}) + NC_{рк}, \quad (8)$$

где  $C_э$  – стоимость киловатт-часа электроэнергии;  $C_{рсо}$  – стоимость расхода ресурса элементов системы охлаждения за единицу времени ее работы;  $N$  – количество переключений элементов системы охлаждения за период регулирования;  $C_{рк}$  – стоимость расхода коммутационного ресурса элементов системы охлаждения за одну коммутацию (включение/выключение).

Экономическую эффективность охлаждения  $\mathcal{E}_t$  за период регулирования определим как:

- разность величин стоимостей эффекта и затрат
- $$\mathcal{E}_p = TC_{ри} - C_{эп}, \quad (9)$$

где  $C_{ри}$  – стоимость расхода ресурса изоляции трансформатора в единицу времени;

- отношение величин стоимостей эффекта и затрат
- $$\mathcal{E}_o = TC_{ри} / C_{эп}. \quad (10)$$

Если предположить, что в формуле (10) затраты  $C_{эп}$  не зависят от количества переключений, то можно определить экономическую эффективность через техническую эффективность  $R_t$  и отношение стоимостей сэкономленных и потребленных ресурсов

$$\mathcal{E}_o = TC_{ри} / C_{эп} = R_t (C_{ри} / (MC_э + C_{рсо})). \quad (11)$$

Формулы (1)–(11) могут быть использованы для определения эффективности  $\mathcal{E}_r$  охлаждения на горизонт прогноза изменения дестабилизирующих факторов. При этом следует учитывать, что за этот период времени система охлаждения может иметь более одного включения.

Если система охлаждения имеет более одной ступени и(или) каждая ступень работает в режимах ONAN, ONAF и OFAF, то по формулам (1)–(11) вычисляется эффективность охлаждения в каждом режиме.

#### РЕГУЛЯТОР ОХЛАЖДЕНИЯ

Структура регулятора системы охлаждения, использующего приведенные выше определения текущей эффективности охлаждения, изображена на рис.

С точки зрения теории автоматического управления структура регулятора определяется заданием на регулирование, переменными процесса управления, возмущающими воздействиями, управляемыми переменными и типом регулятора.

Возмущающими воздействиями для данной системы управления являются ток  $I$  нагрузки трансформатора и температура  $\Theta_a$  окружающей среды.

В качестве наблюдаемой переменной объекта управления выбрана текущая температура  $\Theta_o$  верхних слоев масла, как показано на рис., или текущая температура обмотки трансформатора, при наличии соответствующего датчика.

Термодинамическая модель трансформатора рассчитывает температуру  $\Theta_{ik}$  наиболее нагретой точки изоляции в интервале  $\Delta t$  регулирования в каждом из возможных режимов охлаждения. Модель трансформатора построена на основе уравнения теплового баланса трансформатора [1]. Параметрами модели являются:  $I_{ном}$  – номинальный ток нагрузки;  $P_{хх}$  – мощность потерь холостого хода;  $Z$  – активное сопротивление обмотки;  $C$  – теплоемкость трансформатора;  $\tau_k$  – тепловая постоянная трансформатора для каждого режима охлаждения.

Блок расчета текущей эффективности охлаждения по формулам (1)–(4) вычисляет величину экономии ресурса изоляции в результате применения охлаждения и по формулам (5)–(10) – значение текущей эффективности охлаждения во всех возможных режимах. При этом в расчетах используются значения электрических мощностей исполнительных элементов системы охлаждения.

Вычисленные значения текущей эффективности в нечетком контроллере сравниваются с нормативной оценкой эффективности. Нечеткий контроллер пред-

ставляет собой нелинейный регулятор, который реализует алгоритм нечеткого вывода Мамдани [3] на основе базы правил регулирования охлаждения и определений лингвистических переменных входных и выходных величин. На выходе контроллера формируется вектор управления исполнительными механизмами системы охлаждения.

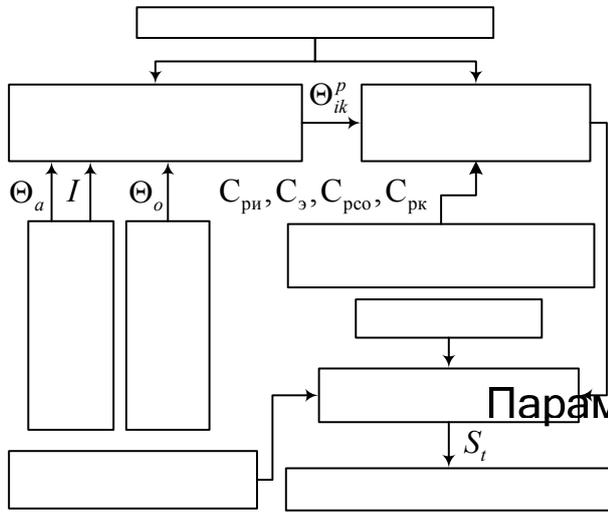


Рис. Структура регулятора охлаждения на основе оценки текущей эффективности охлаждения

Каждый разряд этого  $K$ -разрядного вектора характеризует состояние ("0" – выключен, "1" – включен) одного исполнительного механизма (насос, вентилятор) системы охлаждения. Количество разрядов вектора  $K = Pa$ , где  $P$  – количество ступеней охлаждения;  $a$  – количество элементов управления в ступени охлаждения. В простейшем случае, когда система охлаждения имеет одну ступень и работает в режимах OFAN и OFAF разрядность вектора управления исполнительными механизмами равна единице.

Управление охлаждением на основе критериев эффективности, можно сочетать с управлением по изменению величин возмущающих факторов – переменной управления. Если эти величины попадают на вход нечеткого контроллера и известны окончательные правила в базу правил, то можно использовать нечеткий вывод.

Перспективным видом регуляторов охлаждения являются регуляторы на основе прогноза эффективности охлаждения. Так показал анализ данных мониторинга силовых трансформаторов, изменения токов нагрузки трансформатора носят циклический характер и могут быть предсказаны с определенной степенью достоверности. С этой целью в состав регулятора охлаждения вводится блок прогноза. Принципы реализации этого блока будут изложены в отдельной работе.

В каждом цикле регулирования такой регулятор моделирует процесс охлаждения на горизонт прогноза и выполняет расчет эффективности охлаждения. Полученная оценка эффективности поступает на вход нечеткого контроллера, который выбирает режим охлаждения.

Программная реализация алгоритмов предложенных регуляторов в среде промышленного контроллера системы управления охлаждением трансформатора затруднена из-за ограниченного объема памяти программ и невысокого быстродействия контроллера. Поэтому предлагается распределить функ-

ции регулятора между вычислительными устройствами промышленного компьютера и контроллера

Контроллерная часть регулятора выполняет функции сопряжения с объектом управления – прием и первичную обработку данных от датчиков и управление исполнительными механизмами системы охлаждения.

Основная часть регулятора построена в виде приложения в среде пакета программ MATLAB/Simulink и содержит блоки прогноза, нечеткого контроллера, расчета текущей и прогнозируемой эффективности охлаждения и термодинамической модели трансформатора. Это приложение обменивается данными с контроллерной частью регулятора с использованием DDE – функций Simulink.

Работоспособность предложенных регуляторов проверена путем имитационного моделирования процессов охлаждения в среде MATLAB/Simulink.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенные аналитические выражения технической и экономической эффективности охлаждения силового масляного трансформатора позволяют оценить различные аспекты эффективности, учитываемые при построении регуляторов системы охлаждения.

Эффективность, как цель и критерий управления с помощью, позволяет умножить эффективность системы охлаждения в режимах OFAN и OFAF в интервалах времени, когда экономия ресурса изоляции будет незначительной по сравнению с эксплуатационными расходами на систему охлаждения.

Наиболее перспективным является нечеткий регулятор охлаждения на основе показателей эффективности с прогнозами изменения таких дестабилизирующих факторов как ток нагрузки и температура окружающей среды.

Предлагается использовать в составе интеллектуальной системы управления каждым видом промышленный контроллер и АРМ оператора на базе персонального компьютера.

### База правил

- [1] Алексеенко Г.В., Ашратов А.К., Фрид Е.С. Испытания высоковольтных и мощных трансформаторов и автотрансформаторов часть II, М.–Л., Госэнергоиздат, 1962, 832 с.
- [2] Кузьмин И.В. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления. М.: "Сов. Радио", 1971.
- [3] Поляков М.А. Нечеткий регулятор охлаждения силового масляного трансформатора на основе прогноза изменения возмущающих факторов. // Электротехника і електромеханіка, 2007, №3, С. 47-50.
- [4] Pink T., Stewart P. Power Transformer Control System Development for High Voltage, High Capacity Transformer with load capacity//Proceeding of TechCon@2004 North America (San Antonio, Texas, January 28,29, 2004), pp 73-88.
- [5] ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
- [6] Поляков М.А. Нечеткий регулятор охлаждения силового масляного трансформатора на основе прогноза эффективности охлаждения // – Сб. трудов конф. "Автоматизация: проблемы, идеи, решения" (Севастополь, 5-12 сентября 2007), СевНТУ, 2007.- С. 45.

Поступила 18.10.2007