

НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ

Поляков М.А., к.т.н., доц.

Запорожский национальный технический университет

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

тел (061) 289-16-10, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua

Розглядається структура та принципи побудови нечіткого регулятора охолодження потужного трансформатору, у якому з метою зменшення термічного зносу ізоляції трансформатору використовується лінгвістичні змінні прогнозу зміни струму навантаження та температури навколишнього середовища.

Рассматриваются структура и принципы построения нечеткого регулятора охлаждения силового трансформатора, в котором с целью уменьшения термического износа изоляции трансформатора используются лингвистические переменные прогноза изменения тока нагрузки и температуры окружающей среды.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], принудительное охлаждение существенно снижает термический износ изоляции силового масляного трансформатора. Вместе с тем, работа самой системы охлаждения связана со значительными эксплуатационными расходами и задача регулятора охлаждения, с одной стороны, не допустить ускоренного термического износа изоляции трансформатора в результате ее перегрева, а с другой – минимизировать эксплуатационные расходы на систему охлаждения, которые, в первом приближении, пропорциональны времени ее работы. В известных системах используются релейные регуляторы с обратной связью по выходной переменной объекта управления - текущей температуре обмотки трансформатора или верхних слоев масла. Возмущающими факторами в регуляторе являются ток нагрузки и температура окружающей среды. Недостаточная эффективность регулятора с такой структурой вызвана характером изменения возмущающих воздействий в системе регулирования охлаждения трансформатора, сложностью физических процессов, определяющих температуру элементов его конструкции, в первую очередь температуру изоляции трансформатора. Так, скачкообразный рост тока нагрузки приводит к быстрому повышению температуры обмотки и изоляции трансформатора, а температура масла после включения системы охлаждения уменьшается значительно медленнее, поскольку тепловая постоянная времени масла на два порядка больше тепловых постоянных обмотки и изоляции трансформатора.

В последнее время силовые трансформаторы оснащаются системами непрерывного контроля технического состояния (СНКТС), в состав которых входят промышленные контроллеры и компьютеры, имеющие выход в Интернет [2]. Это позволяет расширить информационную базу для управления охлаждением, в частности использовать базу данных СНКТС для прогнозирования изменений возмущающих факторов и построения регулятора с упреждающим управлением по возмущению (feed forward from process disturbances). Как правило, прогноз носит качественный характер и, поэтому, перспективно применение для управления охлаждением принципов нечеткого управления [3].

СТРУКТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ

С точки зрения теории автоматического управления, структура регулирования охлаждения силового масляного трансформатора определяется целями регулирования, заданием на регулирование, переменными процесса управления, возмущающими воздействиями, режимами охлаждения, управляющими переменными и типом регулятора. Возможные варианты структур регулирования приведены в табл. 1.

В таблице использованы следующие условные обозначения: Θ_o , Θ_{om} – текущая, максимально допустимая температура масла; Θ_i , Θ_{im}^n – текущая, максимально допустимая и прогнозируемая температура обмотки; I , ΔI^n – текущее значение, прогноз изменения тока нагрузки; Θ_a , $\Delta \Theta_a^n$ – текущее значение, прогноз изменения температуры окружающей среды; V ,

Таблица 1

Структуры регулирования охлаждения силового масляного трансформатора

Вариант структуры	Цель регулирования	Задание на регулирование	Переменные процесса управления	Возмущающие воздействия	Управляющие переменные	Тип регулятора
1	Ограничение Θ_{im}	Θ_{om}	Θ_o ,		$N, \Delta N$	Релейный
2	Ограничение Θ_{im}	Θ_{om} , Θ_{im}	Θ_o , Θ_i	I , Θ_a	$N, \Delta N, M$	Релейный, нечеткий
3	Ограничение Θ_{im}^n	Θ_{om} , Θ_{im}	Θ_o , Θ_i	I , Θ_a , ΔI^n , $\Delta \Theta_a^n$	$N, \Delta N, M$	Нечеткий
4	Ограничение V	V_m	V	I , Θ_a	$N, \Delta N, M$	Нечеткий
5	Ограничение V^n	V_m	V	I , Θ_a , ΔI^n , $\Delta \Theta_a^n$	$N, \Delta N, M$	Нечеткий

V_m, V^n – текущая, максимально допустимая и прогнозируемая относительная скорость термического износа изоляции; N – количество ступеней охлаждения, включенных в текущий момент; ΔN – приращение количества включенных ступеней охлаждения в результате регулирования; M – управление включением вентиляторов ступеней охлаждения. Некоторые переменные структур регулирования могут быть заданы в относительной форме: K – коэффициент нагрузки (отношение тока I к номинальному току); ΔK^n – прогноз изменения коэффициента K относительного его текущего значения; $\Delta \Theta_i$ – запас по температуре обмотки ($\Theta_{im} - \Theta_i$) и т. п. Это позволяет повысить универсальность соответствующего регулятора.

Структура 1 является наиболее простой в реализации. Она использует только одну измеряемую величину (Θ_o), не требует выполнения вычислительных операций и может быть реализована аппаратно. В структуре 2, за счет непосредственного измерения Θ_{im} и учета текущих значений возмущающих воздействий (I, Θ_a), более полно реализуется цель регулирования и возможно разделение режимов охлаждения OFAN и OFAF. Переход к структуре 3 позволяет уменьшить усредненную в интервале прогноза температуру Θ_{im}^n за счет опережающего включения и выключения ступеней системы охлаждения. Проиллюстрируем идею опережающего управления по возмущению на примере прогноза тока нагрузки I . Данные [4], полученные СНКТС в период эксплуатации, свидетельствуют о наличии существенных колебаний нагрузки тока нагрузки в течение суток, которые вызваны интенсивной работой общественного транспорта в "часы пик", режимом работы промышленных предприятий, расходами электроэнергии на освещение, бытовые нужды и другими факторами. Действие этих факторов повторяется с периодом суток и недели, что позволяет предсказать характер изменения тока нагрузки I . Если к текущему моменту времени t_1 система охлаждения имеет прогноз резкого увеличения тока I в интервале времени $[t_2, t_3]$, $t_3 > t_2 > t_1$, то это дает возможность уменьшить температуру масла Θ_o к моменту времени t_2 путем включения охлаждения в момент $t_1 \leq t_j < t_2$. В результате чего уменьшится износ изоляции в интервале времени $[t_1, t_3]$ и, возможно при $t > t_3$. Источником прогноза могут служить статистические данные, накопленные СНКТС в предыдущие периоды эксплуатации трансформатора или поступающие извне, например метеорологический прогноз изменения температуры воздуха. Основными параметрами прогноза, существенными для управления охлаждением, являются: временной интервал прогноза, значение и погрешность определения прогнозируемой величины в интервале прогноза. Временной интервал прогноза выбирается равным двум - трем тепловым постоянным времени системы охлаждения.

Структура 4 дополнена блоком расчета скорости V , интегрируя которую по времени можно непрерывно определять относительное сокращение срока службы изоляции в результате термического износа и оценивать остаточный ресурс изоляции трансформатора. Скорость V определим по формуле [1]:

$$V = 2^{(\Theta_i - \Theta_{i1})/6}, \quad (1)$$

где Θ_{i1} – температура наиболее нагретой точки изоляции трансформатора, при которой относительная скорость термического износа изоляции равна единице (для бумажной изоляции температура Θ_{i1} принимается равной 98°C).

Учет в структуре 5 значений прогнозов изменения возмущающих факторов также позволяет уменьшить скорость V^n .

СТРУКТУРА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Как уже отмечалось, реализация структур регулирования охлаждения, приведенных в табл. 1, возможна с применением регулятора нечеткого типа. Структура нечеткого регулятора описывается лингвистическими переменными, базой правил нечетких продукций и алгоритмом нечеткого вывода [3]. Каждая лингвистическая переменная определена как кортеж $\langle \beta_j, T_j, X_j \rangle$, где β_j – название; T_j – базовое термножество; X_j – область определения нечетких переменных j -ой лингвистической переменной. Термножество T_j задается перечислением лингвистических термов с описанием их функций принадлежности. Для ограничения объема базы правил нечетких продукций, в предлагаемом автором регуляторе мощность термножества принята равной трем элементам – NB (отрицательное большое), Z (близкое к нулю), PB (положительное большое). В качестве функций принадлежности выбраны: для NB - zmf (Z - образная); для Z - trapmf (трапецевидная) или pимf (L -образная); для PB - smf (S -образная). Перечисленные функции принадлежности являются кусочно-линейными и задаются относительно небольшим числом точек. Границы областей X_j определены техническими характеристиками трансформатора и рекомендациями руководства по нагрузке [1]. База правил нечетких продукций содержит, в зависимости от требований к качеству регулирования, количества входных и выходных лингвистических переменных, содержит от 10 до 30 правил типа «ЕСЛИ "множество подусловий, соединенных операцией нечеткой конъюнкции или дизъюнкции" ТО "заклучение"». Подусловия и заключения в правилах представляют собой нечеткие высказывания относительно используемых лингвистических переменных. В предлагаемых регуляторах использован широко распространенный алгоритм нечеткого вывода Мамдани.

Поскольку описываемые регуляторы предполагается реализовывать в промышленных контроллерах, то специфицирование регуляторов выполнено на языке FCL (Fuzzy Control Language) в соответствии со стандартом IEC 61131-7. В качестве примера, приведем функции принадлежности термов (рис. 1) и фрагмент специфицирования на языке FCL (рис. 2) лингвистической переменной "прогноз изменения коэффициента нагрузки".

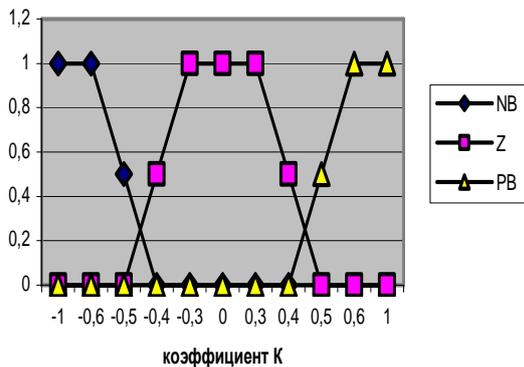


Рис. 1. Функции принадлежности термов NB, Z, PB лингвистической переменной "прогноз изменения коэффициента нагрузки"

```

FUNCTION_BLOK регулятор
VAR_INPUT
прогноз изменения коэффициента нагрузки: REAL;
END_VAR
FUZZIFY прогноз изменения коэффициента нагрузки
TERM NB := (-0,6, 1) (-0,4, 0)
TERM Z := (-0,5, 0) (-0,3, 1) (0,3, 1) (0,5, 0)
TERM PB := (0,4, 0) (0,6, 1)
END_FUZZIFY
END_FUNCTION_BLOK

```

Рис. 2. Фрагмент спецификации лингвистической переменной "прогноз изменения коэффициента нагрузки" на языке FCL

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Описанные выше структуры регуляторов моделировались в среде пакета программ MATLAB. Модель системы охлаждения, кроме собственно регулятора, содержит блоки генерации возмущающих воздействий и их прогнозов, термодинамическую модель трансформатора и блок оценки качества регулирования.

Для настройки регулятора параметры зависимостей от времени возмущающих воздействий стандартной формы выбраны в соответствии с [1]. Температура окружающей среды изменяется по синусоидальному закону с периодом равным суткам, а ток нагрузки рассматривается как ступенчатая функция, состоящая из одной ступени направленной вверх, и через некоторое время одной ступени, направленной вниз.

Блок генератора прогнозов формирует значение ΔI^n , $\Delta \Theta a^n$ возмущающих воздействий I , Θa на срок прогноза относительно текущих значений этих воздействий. Прогноз моделируется на основе модели смещенного во времени на срок прогноза текущего значения возмущающего воздействия. При этом прогнозируемое значение возмущающих воздействий усредняется в окрестности точки времени прогноза.

Нечеткий регулятор представляет собой блок fuzzy logic controller, конфигурированный в пакете Fuzzy Logic входящем в MATLAB.

Термодинамическая модель трансформатора формирует значение температуры верхних слоев масла, как результат процессов нагрева и охлаждения, которые описываются уравнением теплового баланса.

Параметры модели зависят от режима охлаждения.

Блок оценки качества регулирования формирует два критерия: технический - расход L ресурса изоляции трансформатора в результате термического износа и экономический - экономическая эффективность регулирования охлаждения. Расход L определяется путем интегрирования скорости V по времени в интервале моделирования. При этом, скорость V рассчитывается по формуле (1), если температура Θ_i находится в пределах ($80 \leq \Theta_i \leq 140^\circ\text{C}$ по [1]), в которых уменьшение V в интервалы времени когда коэффициент $K < 1$ компенсируется увеличением V в интервалы времени когда коэффициент $K > 1$. При $\Theta_i < 80^\circ\text{C}$ принимается $V = 0,125$, а при $\Theta_i > 140^\circ\text{C}$ - $V = 128$. Экономическая эффективность регулирования охлаждения определена как разность между ценой сэкономленного ресурса изоляции и затратами на систему охлаждения. При этом такие эксплуатационные расходы на систему охлаждения как расход электроэнергии, расход ресурса электродвигателей, вентиляторов и насосов приняты пропорциональными времени, когда охлаждение включено, а для коммутационных элементов - пропорциональными количеству включений.

Моделирование процессов охлаждения проводилось на временном интервале равном суткам для трансформатора (АТДЦН 100000/220/150) с одной ступенью системы охлаждения, работающей в режимах ONAN и OFAF. Параметры модели системы охлаждения выбраны таким образом, чтобы моделируемые тепловые процессы соответствовали результатам тепловых испытаний реального трансформатора, а средняя относительная скорость износа изоляции равнялась единице при нагреве изоляции током нагрузки с параметрами, рекомендованными для режима систематических нагрузок по [1] и регулировании охлаждения с помощью релейного регулятора. В результате моделирования системы охлаждения с нечетким регулятором при тех же токах нагрузки расход ресурса изоляции снизился на 7-9%.

Пример результатов моделирования процессов охлаждения трансформатора с одной ступенью охлаждения в режимах ONAN и OFAF приведен на рис. 3.

На рис. 3 изображены сверху вниз графики температуры верхних слоев масла, тока нагрузки, прогноза изменения тока нагрузки, температуры окружающей среды, прогноза изменения этой температуры, режима охлаждения ("1" соответствует режиму OFAF, а "0" - ONAN) и расхода ресурса изоляции.

Один из вариантов предложенных структур регулирования реализован [5] в виде части программного обеспечения промышленного контроллера SLC (компания Rockwell Automation, США), которые применяются в учебно-научной лаборатории АСУ ТП Запорожского национального технического университета. Программирование алгоритма регулирования выполнено на языке программирования LD по стандарту IEC 61131-3 в среде пакета RSLogix программирования контроллеров. Программа регулятора протестирована путем сравнения с результатами моделирования идентичной системы в среде пакета Fuzzy Logic. Максимальное время программного скана программы в контроллере SLC500 составило около трех

секунд, что приемлемо при регулировании тепловых процессов с большими постоянными времени. Для уменьшения времени загрузки процессора контроллера задачей нечеткого регулирования предполагается в дальнейшем выполнять ее в среде приложений SCADA – системы или MATLAB исполняемых на промышленном компьютере СНКТС, используя функции DDE для обмена данными между этими приложениями и контроллером.

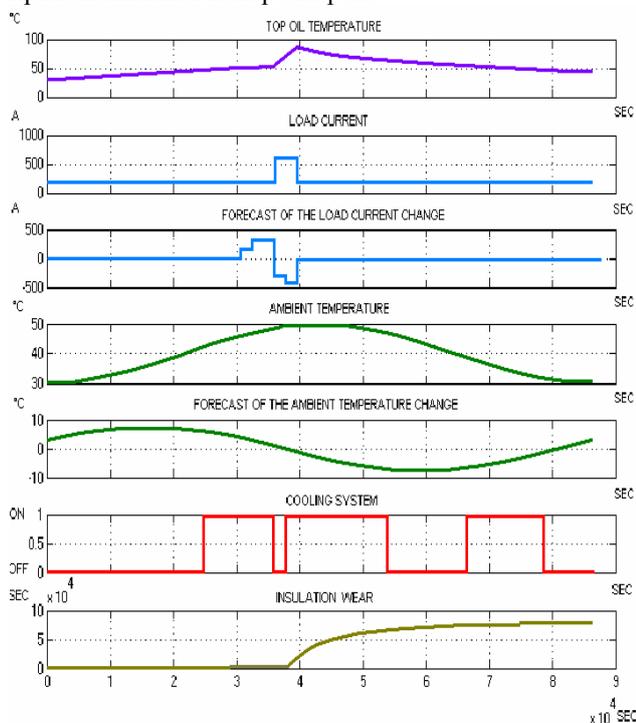


Рис. 3. Пример моделирования процессов охлаждения трансформатора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение в структуру регулирования охлаждения лингвистических переменных прогнозов изменения коэффициента нагрузки трансформатора и температуры окружающей среды позволило повысить качество регулирования и снизить на этой основе термический износ изоляции силового масляного трансформатора.

Предполагается использование предложенных нечетких регуляторов в СНКТС трансформаторов производства ОАО "Запорожтрансформатор".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов.
- [2] Pink T, Stewart P. Power Transformer Control System Developments providing improved reliability and increased overload capacity / /Proceeding of TechCon@2004 North America (San Antonio, Texas, January 28,29, 2004), pp 73-88.
- [3] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003, - 736 с /Мастер решений/.
- [4] Рассальский А.Н. Доклад "Диагностика трансформаторного оборудования на подстанциях 220-750 кВ посредством непрерывного контроля основных параметров в режиме эксплуатации" // Второй международный научно-технический семинар "Современные методы оценки технического состояния и способы повышения надежности оборудования подстанций", (г. Москва, 25-29 октября 2004 г.). Исполнительный комитет Электроэнергетического Совета СНГ совместно с ОАО РАО "ЕЭС России", ОАО "ФСК ЕЭС".
- [5] Поляков М.А. Нечеткое регулирование охлаждения силового масляного трансформатора. – Сб. трудов конф. "Автоматизация: проблемы, идеи, решения" (Севастополь, 12-15 сентября 2006), СевНТУ, 2006.

Поступила 18.09.2006