

УДК 681.5

# ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АДАПТИВНОЙ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Снижение срока службы силового трансформатора из-за термических перегрузок — одна из основных проблем, на решение которой направлено действие автоматики ограничения перегрузки оборудования. В статье рассмотрены недостатки функционирования автоматики по принципу с фиксированной уставкой. Предложен принцип функционирования автоматики, основанный на прогнозировании допустимого времени нагрева трансформатора с помощью математического моделирования тепловой системы. На основе исследования сделан вывод о возможности разработки новых систем адаптивной автоматики по принципу прогнозирования времени нагрева силового трансформатора.

## ■ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ АВТОМАТИКИ

Для защиты от опасных перегрузок по условиям нагрева электросетевого оборудования используется автоматика ограничения перегрузки оборудования (АОПО). АОПО осуществляет непрерывный контроль тока во всех фазах, обеспечивает срабатывание при превышении в любой из трех фаз по защищаемому элементу током заданной величины уставки срабатывания при заданной температуре окружающей среды, а также формирование различных управляющих воздействий через заданные выдержки времени [1].

АВТОРЫ:

**А.М. Константинов,**  
**М.О. Госьков,**  
Дальневосточный  
государственный  
университет путей  
сообщения РФ

#автоматика ограничения перегрузки оборудования; #адаптивная автоматика; #силовой трансформатор; #математическая модель; #электроэнергетическая система



Одной из основных задач автоматизированных систем управления является оперативное управление, которое заключается в поддержании определенного регулируемого параметра или совокупности параметров в заданных допустимых границах. Для управления параметром в АСУ ТП могут использоваться выходные управляющие сигналы на управление коммутационными аппаратами и средствами регулирования технологического режима (положением РПН, регулируемые СКРМ, фазоповоротными устройствами, устройствами продольной компенсации, вставками постоянного тока и др.) [2].

Согласно современным требованиям АСУ ТП в энергетике должны обеспечивать решение задач комплексной автоматизации, в том числе:

- достижение максимальной эффективности при транспортировке электроэнергии в электросетевом комплексе;
- повышение надежности энергетических систем за счет снижения количества ошибок персонала;
- переход к эксплуатации подстанций без постоянного обслуживающего персонала [2].

Современные системы защиты трансформатора от термических перегрузок работают по принципу фиксированной уставки, когда при превышении заданной температуры производится подача управляющих воздействий, направленных на последующее охлаждение [3]. Данный принцип является максимально простым и доступным, однако имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, АОПО с фиксированной уставкой лишена возможности выбора более точного управляющего воздействия при нагреве трансформатора с различной скоростью. Времени после срабатывания АОПО при превышении уставки и нагрева трансформатора до критических температур может быть недостаточно для охлаждения, так как у тепловой системы трансформатора высокая инерционность. Для завершения процесса охлаждения трансформатору требуется от нескольких десятков минут до нескольких часов. Во-вторых, даже правильно выставленные фиксированные уставки срабатывания АОПО не гарантируют адекватного реагирования системы, так как в процессе эксплуатации силового трансформатора меняются и параметры его термодинамической системы, теплопроводности материалов изоляции и масла. Это связано с явлением старения изоляции, появлением примесей в трансформаторном масле и т.д.

Данные, полученные ранее при изучении срабатывания АОПО ЛЭП, показывают, что применение сложных и более точных методов для математического описания те-

пловой системы защищаемого оборудования при расчете характеристик срабатывания адаптивной АОПО позволяет уменьшить количество срабатываний автоматики, повысить пропускную способность оборудования и его надежность [4, 5]. Так, например, применение адаптивного алгоритма с токовой уставкой, корректируемой по температуре окружающей среды, для реализации АОПО воздушных линий Заинской ГРЭС подтвердило на практике повышение точности работы автоматики по сравнению с классическим методом реализации АОПО с фиксированной уставкой [5].

Цель настоящего исследования — разработка принципа, позволяющего использовать адаптивную АОПО для защиты силового трансформатора от перегрева. Такой принцип функционирования автоматики ограничения перегрузки оборудования силового трансформатора может быть основан на вычислении времени, за которое трансформатор нагреется до критических значений. Это время зависит от скорости протекания процесса нагрева, и основанный на вычисленном значении алгоритм управления позволит запускать различные управляющие воздействия для максимально эффективного охлаждения силового трансформатора. Данный принцип поможет избежать избыточных управляющих воздействий, неблагоприятных для энергосистемы и, наоборот, обеспечить быстрый запуск систем охлаждения трансформатора.

Для борьбы с повышением температуры трансформатора при нагрузке используются специальные системы охлаждения трансформатора. Современные модели трансформаторов позволяют использовать одновременно несколько способов охлаждения трансформатора с возможностью их запуска при помощи ручных или автоматических управляющих воздействий [1]. Такие системы называются комбинированными и используются для интенсивного охлаждения при повышенной температуре окружающего воздуха и для повышения мощности трансформатора в периоды максимумов нагрузки [6]. Комбинированная система охлаждения может применяться для форсированного запуска более эффективного способа

...ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ  
ТРАНСФОРМАТОРА ОСНОВАН НА  
ВЫЧИСЛЕНИИ ВРЕМЕНИ, ЗА КОТОРОЕ  
ТРАНСФОРМАТОР НАГРЕЕТСЯ ДО  
КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ...

охлаждения трансформатора в условиях повышения выделяемой внутри трансформатора тепловой мощности и при снижении охлаждающей способности охладителя (трансформаторного масла, окружающего воздуха и конструктивных элементов трансформатора).

Для того чтобы определить допустимое время нагрева трансформатора, необходимо иметь математическую модель тепловой системы трансформатора, способную предсказать поведение тепловой системы в зависимости от начальных условий, считываемых с датчиков. Для этих целей может быть применена ранее предложенная математическая модель, использующая адаптирующий расчетный параметр для повышения достоверности показаний, который рассчитывается под каждый тип электроэнергетического оборудования [7, 8]. В настоящей статье предложена альтернативная математическая модель, основанная на расчете установившихся температур элементов трансформатора по межгосударственным стандартам и последующем нахождении времени переходного процесса из текущего теплового режима в установившийся.

### ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА ТРАНСФОРМАТОРА

При рассмотрении термодинамической системы силового трансформатора обычно используют ряд упрощений и допущений для математического описания процесса теплообмена. Классическая задача термодинамики рассматривает теплообмен между двумя однородными телами. Под однородным телом с точки зрения нагрева подразумевается тело с бесконечно большой внутренней теплопроводностью, имеющее по всему своему объему одинаковую температуру и удельную теплоемкость [9]. В процессе теплообмена внутри трансформатора участвует множество различных тел, однако для упрощения расчета и описания предлагается оставить в задаче только наиболее значимые из них. С учетом этого упрощения термодинамическую систему трансформатора можно рассматривать как систему из трех однородных тел: обмотки, металлического магнитопровода и жидкого масла [9]. Важно отметить, что в реальности коэффициент теплопроводности веществ зависит от температуры. Для металлических обмоток и магнитопровода зависимость теплопроводности в диапазоне температур от 40 °С до 200 °С имеет незначительное искривление и близка к линейной. В связи с малым относительным изменением коэффициента теплопроводности принято допущение, что коэффициенты теплопроводности трех тел постоянны [9].

Для вывода дифференциальных уравнений был рассмотрен процесс охлаждения трансформатора из начальных условий. В процессе охлаждения обмотка и магнитопровод передают свое тепло маслу, а масло — охлаждающей

среде. Передача теплоты между обмоткой и магнитопроводом не учитывается, так как расположенные между ними изоляционные цилиндры значительно препятствуют эффективному теплообмену между ними. Также исключается из процесса теплообмена влияние изоляции проводников обмотки, они включены в теплоемкость самой обмотки. В данном примере принимается допущение об однородности тел, в связи с чем не будут учитываться перепады температур по толщине стенки радиатора на контакте масла с окружающей средой. Для упрощения расчета также принимается, что процесс охлаждения масла происходит в основном за счет теплообмена масла и воздуха, влияние излучения при этом не учитывается.

Объединив дифференциальные уравнения теплообмена между элементами силового трансформатора, можно получить упрощенную математическую модель, описывающую изменение с течением времени превышения средней температуры обмотки, магнитопровода и масла трансформатора над температурой окружающей среды [9].

$$\begin{cases} -\frac{m_1 c_1}{F_1 \alpha_1} \cdot \frac{d(\Delta\vartheta_1)}{\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_3} = dt, \\ -\frac{m_2 c_2}{F_2 \alpha_2} \cdot \frac{d(\Delta\vartheta_2)}{\Delta\vartheta_2 - \Delta\vartheta_3} = dt, \\ -\left[ \frac{m_1 c_1}{F_3 \alpha_3} \cdot \frac{d(\Delta\vartheta_1)}{\Delta\vartheta_3} + \frac{m_2 c_2}{F_3 \alpha_3} \cdot \frac{d(\Delta\vartheta_2)}{\Delta\vartheta_3} + \frac{m_3 c_3}{F_3 \alpha_3} \cdot \frac{d(\Delta\vartheta_3)}{\Delta\vartheta_3} \right] = dt, \end{cases}$$

где  $m_1, m_2, m_3$  — масса обмоток, магнитопровода и масла соответственно, кг;

$F_1, F_2, F_3$  — площадь поверхности теплообмена между обмотками и маслом, магнитопроводом и маслом и воздухом соответственно, м<sup>2</sup>;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — коэффициенты теплопередачи;

$\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \Delta\vartheta_3$  — превышение средней температуры над температурой окружающей среды для обмоток, магнитопровода и масла соответственно, °С.

Решением данной системы уравнений будет семейство трех экспоненциальных кривых, описывающих изменение температуры трех тел в течение времени:

$$\begin{cases} \Delta\vartheta_1 = C_{11} e^{p_1 t} + C_{21} e^{p_2 t} + C_{31} e^{p_3 t} + C_0, \\ \Delta\vartheta_2 = C_{12} e^{p_1 t} + C_{22} e^{p_2 t} + C_{32} e^{p_3 t} + C_0, \\ \Delta\vartheta_3 = C_{13} e^{p_1 t} + C_{23} e^{p_2 t} + C_{33} e^{p_3 t} + C_0, \end{cases}$$

где  $p_1, p_2$  и  $p_3$  — корни характеристического уравнения для системы дифференциальных уравнений, с<sup>-1</sup>;

$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_0$  — решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений, зависящие от начальных условий охлаждения (температуры обмоток, магнитопровода и масла в момент отключения трансформатора).

Полученные зависимости представляют собой систему кривых, которые при постоянных внешних условиях (постоянная температура окружающего воздуха, постоянная нагрузка на трансформатор) стремятся к значению установившейся температуры на удалении  $t = \infty$ . Уравнение расчета установившегося значения превышения температуры рассчитывается в соответствии с данными опыта номинальной нагрузки трансформатора по выражению, предложенному МЭК [9, 10]:

$$\Delta\vartheta_{1,уст} = \Delta\vartheta_{3,ном} \left( \frac{1 + \gamma K^2}{1 + \gamma} \right)^m + 1,1(\Delta\vartheta_{1,ном} - \Delta\vartheta_{3,ном}) K^{2n},$$

где  $m$  — показатель, принимаемый равным 0,8 при естественной циркуляции масла и равным 1 при принудительной циркуляции воздуха в системе охлаждения согласно рекомендациям МЭК;

$K = S / S_{ном}$  — коэффициент, учитывающий отношение текущей нагрузки трансформатора  $S$  (в кВА) к номинальной мощности  $S_{ном}$  (в кВА);

$\gamma = P_k / P_0$  — отношение активных потерь короткого замыкания к активным потерям холостого хода;  $n$  — показатель, принимаемый равным 0,8 при естественной циркуляции масла, равным 0,9 при принудительной циркуляции масла и равным 1 при направленной циркуляции масла.

Для получения семейства экспоненциальных кривых, описывающих изменение температуры тел трансформатора, предлагается применять численный метод решения, использующий в качестве исходных данных геометрические параметры трансформатора, термодинамические параметры материалов и массу элементов трансформатора [9].

$$\begin{cases} m_1 c_1 = Q_1; & m_2 c_2 = Q_2; & m_3 c_3 = Q_3; \\ F_1 \alpha_1 = P_1; & F_2 \alpha_2 = P_2; & F_3 \alpha_3 = P_3. \end{cases}$$

$$p^3 + \frac{Q_1 Q_2 P_1 + Q_1 Q_2 P_2 + Q_1 Q_2 P_3 + Q_1 Q_3 P_2 + Q_2 Q_3 P_1}{Q_1 Q_2 Q_3} \cdot p^2 +$$

$$+ \frac{Q_1 P_1 P_2 + Q_1 P_2 P_3 + Q_2 P_1 P_2 + Q_2 P_1 P_3 + Q_3 P_1 P_2}{Q_1 Q_2 Q_3} \cdot p + \frac{P_1 P_2 P_3}{Q_1 Q_2 Q_3} = 0.$$

Для того чтобы через начальные условия найти постоянные  $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{31}, C_{32}, C_{33}$ , мы применяли метод решения через полиномы Лагранжа. Для этого составляется матрица  $A$ , которая имеет вид [9]:

$$A = \begin{vmatrix} -\frac{P_1}{Q_1} & 0 & \frac{P_1}{Q_1} \\ 0 & -\frac{P_2}{Q_2} & \frac{P_2}{Q_2} \\ \frac{P_1}{Q_3} & \frac{P_2}{Q_3} & -\frac{P_1 + P_2 + P_3}{Q_3} \end{vmatrix}.$$

$$\begin{cases} L_1(A) = \frac{A^2 - (p_2 + p_3)A + p_2 p_3 E}{(p_1 - p_2)(p_1 - p_3)}; \\ L_2(A) = \frac{A^2 - (p_1 + p_3)A + p_1 p_3 E}{(p_2 - p_3)(p_2 - p_1)}; \\ L_3(A) = \frac{A^2 - (p_1 + p_2)A + p_1 p_2 E}{(p_3 - p_1)(p_3 - p_2)}; \end{cases}$$

где  $E$  — единичная матрица.

Полученные полиномы Лагранжа матрично умножаются на матрицу, рассчитываемую по начальным условиям среднего превышения температуры каждого тела трансформатора над температурой воздуха и установившимся значениям превышения температуры каждого тела [9]:

$$\begin{cases} \begin{vmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{vmatrix} = L_1(A) \cdot \begin{vmatrix} \Delta\vartheta_{01} - \Delta\vartheta_{1,уст} \\ \Delta\vartheta_{02} - \Delta\vartheta_{2,уст} \\ \Delta\vartheta_{03} - \Delta\vartheta_{3,уст} \end{vmatrix}; \\ \begin{vmatrix} C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \end{vmatrix} = L_2(A) \cdot \begin{vmatrix} \Delta\vartheta_{01} - \Delta\vartheta_{1,уст} \\ \Delta\vartheta_{02} - \Delta\vartheta_{2,уст} \\ \Delta\vartheta_{03} - \Delta\vartheta_{3,уст} \end{vmatrix}; \\ \begin{vmatrix} C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \end{vmatrix} = L_3(A) \cdot \begin{vmatrix} \Delta\vartheta_{01} - \Delta\vartheta_{1,уст} \\ \Delta\vartheta_{02} - \Delta\vartheta_{2,уст} \\ \Delta\vartheta_{03} - \Delta\vartheta_{3,уст} \end{vmatrix}; \end{cases}$$

ГРАФИК ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА

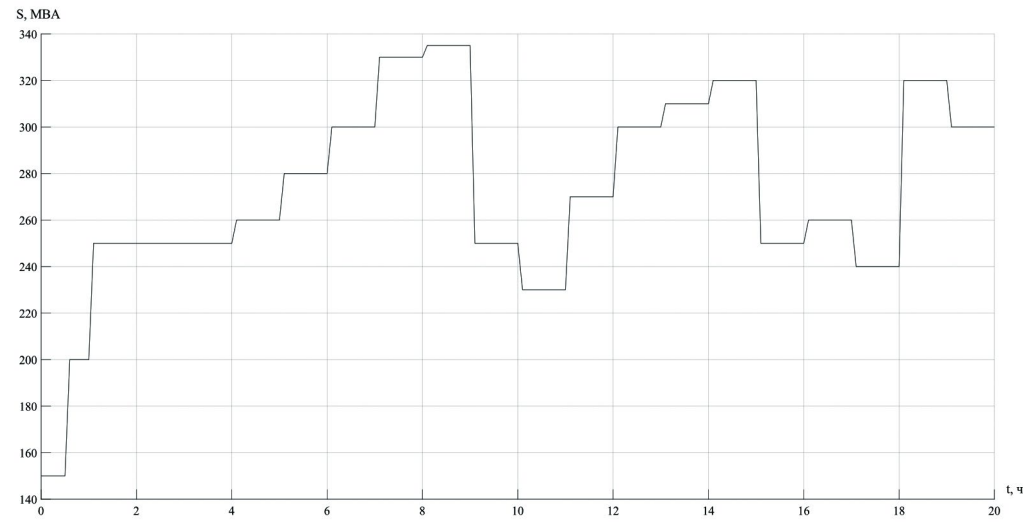


Рис. 1.

Полученный набор уравнений позволяет производить расчет параметров для семейства экспоненциальных кривых в любой момент времени при известных начальных условиях, параметрах теплопроводности тел трансформатора и при известном значении установившегося превышения температуры каждого тела над температурой внешней среды.

Для упрощения расчета установившегося превышения температуры каждого тела над температурой внешней среды предлагается использовать отстройку начальных параметров от параметров, полученных экспериментально при номинальном режиме работы трансформатора. В данном опыте трансформатор вводится в работу на номинальный режим, измеряются установившиеся температуры трех тел, актуализируются потери короткого замыкания и холостого хода в трансформаторе.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ТРАНСФОРМАТОРА**

Полученные дифференциальные уравнения и методы численного решения задачи Коши использовались нами для составления математической модели нагрева трансформатора при динамической нагрузке. Данная модель позволяет на основе показаний датчиков температуры наиболее нагретой точки обмотки и масла и данных об электрической нагрузке и температуре внешней среды осуществлять краткосрочное прогнозирование изменения температуры тепловой системы силового трансформатора. Математическая модель позволяет вычислять значение температуры каждого тела трансформатора

в режиме динамического изменения нагрузки, а также сообщать, через какое время система достигнет критической величины нагрева.

Ниже представлены графики, полученные на математической модели для расчета уставки срабатывания АОПО. В ходе эксперимента в модель были внесены параметры трансформатора ТДЦ-250000/220. На рис. 1 представлена зависимость нагрузки трансформатора от времени. На рис. 2 в одних и тех же координатных осях отображены зависимости установившейся температуры обмотки, текущей температуры обмотки, текущей температуры масла, текущей температуры магнитопровода от времени, кроме того, на график дополнительно нанесена линия, отображающая величину критической температуры обмотки, при которой не допускается эксплуатация данного трансформатора. Предполагается, что модель в ходе вычисления будет осуществлять краткосрочный прогноз поведения тепловой системы и сообщать оператору автоматике информацию о факте превышения спрогнозированной установившейся температуры элемента трансформатора критического значения и о времени, доступном для эксплуатации трансформатора в текущем нагрузочном режиме. График зависимости допустимого времени нагрева, мин., от времени эксплуатации силового трансформатора, представлен на рис. 3.

Таким образом, функционирование АОПО трансформатора по данной математической модели будет реализовывать принцип адаптивной автоматике, так как автоматика будет предсказывать превышение температуры до наступления недопустимого режима.

ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРА

А — МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ПРЕВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛА НАД ТЕМПЕРАТУРОЙ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА; Б—Г — ПРЕВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАД ТЕМПЕРАТУРОЙ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА ДЛЯ ОБМОТОК, МАГНИТОПРОВОДА И МАСЛА СООТВЕТСТВЕННО; Д — УСТАНОВИВШЕЕСЯ ЗНАЧЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛА НАД ТЕМПЕРАТУРОЙ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Рис. 2.

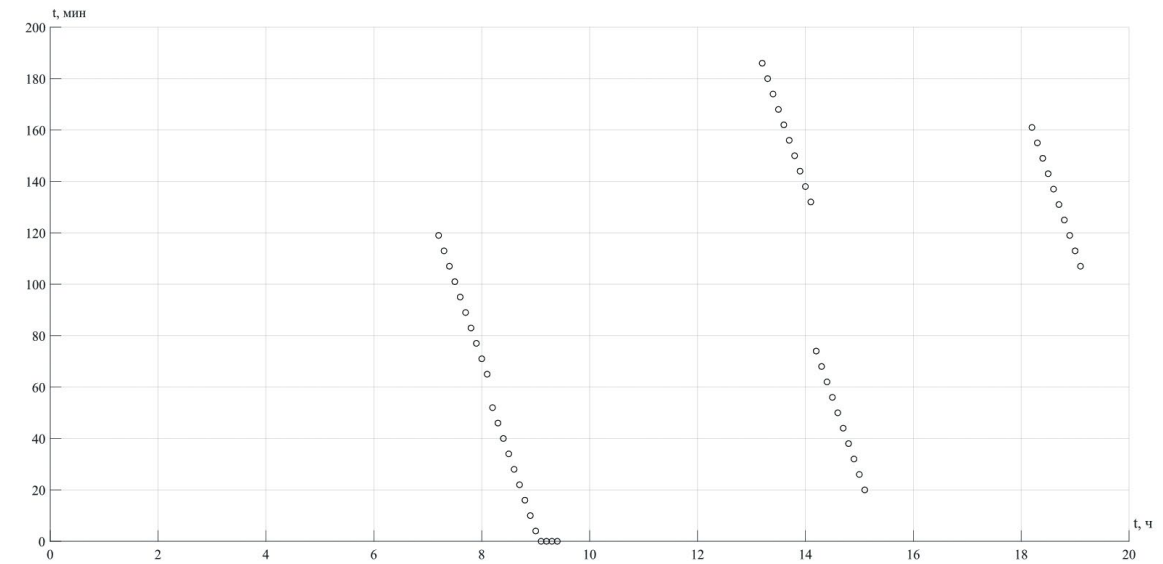
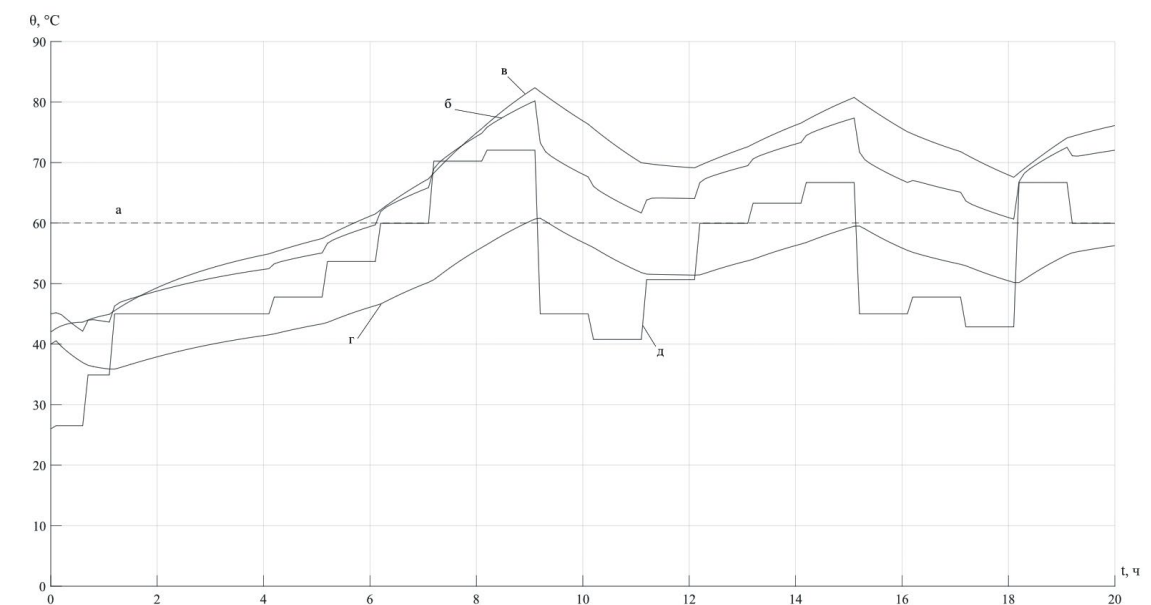


ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАГРЕВА ТРАНСФОРМАТОРА

Рис. 3.



ДАННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКРЫВАЕТ  
НАПРАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ СИСТЕМ  
АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКИ  
ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ПРИНЦИПЕ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА

В зависимости от скорости протекания данного процесса будут выданы различные значения допустимой длительности нагрева трансформатора, что позволит использовать различные управляющие воздействия. Так, например, при длительности допустимого нагрева, достаточной для охлаждения основной системой охлаждения, может включаться основная система охлаждения, при недостаточной длительности может включаться форсированное охлаждение, а при малой длительности нагрева, недостаточной для охлаждения любыми доступными методами, — производиться выдача управляющих воздействий на различную по величине разгрузку трансформатора.

#### ■ ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты исследования подтверждают возможность создания АОПО силовых трансформаторов, использующих алгоритм определения уставки срабатывания, зависящей от текущей температуры элементов силового трансформатора и скорости его нагрева. Для разработки самого устройства автоматики еще необходимо: определить микропроцессорное устройство, обладающее достаточными характеристиками для своевременного вычисления уставки и выдачи управляющих воздействий; разработать алгоритм действия автоматики, в который заложены сценарии выдачи управляющих воздействий.

Данное исследование открывает направление разработки новых систем автоматики ограничения перегрузки оборудования, основанных на принципе прогнозирования времени нагрева силового трансформатора. Полученные выводы могут быть применены производителями систем защиты силовых трансформаторов и прочего электроэнергетического оборудования для создания более совершенных устройств автоматики.

В результате проведенного исследования сформулирован принцип функционирования адаптивной АОПО силового трансформатора, основанный на вычислении времени, за которое трансформатор нагреется до недопустимого режима. Это время зависит от скорости протекания процесса нагрева, и основанный на вычисленном значении

алгоритм управления позволит запускать различные управляющие воздействия для максимально эффективного охлаждения силового трансформатора. Данный принцип поможет избежать избыточных управляющих воздействий автоматики ограничения перегрузки трансформатора и тем самым повысить его пропускную способность. На математической модели нагрева трансформатора проверена возможность вычисления времени нагрева, необходимого для работы АОПО по предложенному принципу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 59012820-29.020.002-2018. Стандарт организации АО СО ЕЭС «Релейная защита и автоматика. автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики ограничения перегрузки оборудования. Нормы и требования. — Москва: АО СО ЕЭС, 2018.
2. СТО 56947007-25.040.40.227-2016. Стандарт организации ПАО ФСК ЕЭС «Типовые технические требования к функциональной структуре автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций Единой национальной электрической сети». — Москва: ПАО ФСК ЕЭС, 2016.
3. СТО 59012820.29.240.008-2008. Стандарт организации АО «СО ЕЭС» «Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования». Москва: АО СО ЕЭС, 2008. — С. 42-43.
4. Константинов А.М., Госьков М.О. Алгоритм автоматического ограничения перегрузки оборудования с адаптивной уставкой срабатывания // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы V Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 06-11 декабря 2021 г. — Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. — С. 50-54.
5. Разумов Р.В., Петров А.А., Трифионов Д.В. и др. Особенности применения автоматики ограничения перегрузки оборудования с адаптивной токовой уставкой. Примеры реализации проекта АОПО на Заинской ГРЭС и ПС Тамань // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 3 (24). — С. 58-64.
6. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. — М., 2007.
7. Зализный Д.И. Адаптивное моделирование тепловых процессов электроэнергетического оборудования в реальном времени // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2015. № 4 (63). — С. 44-52.
8. Зализный Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 кВ // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2001. № 3-4. — С. 51-60.
9. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Пер. с венгерского. Под ред. Г.Е. Тарле. — М.: Энергия, 1980.
10. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. — М.: Стандартинформ, 2009.



ГРУППА КОМПАНИЙ

Акционерное общество  
«ЭЛСИ Энергопроект»



## АО «ЭЛСИ Энергопроект» Проектирование электросетевых объектов. Просто и профессионально.

- ✓ 12 лет в проектировании;
- ✓ 2000 км. воздушных линий;
- ✓ 225 МВА общая мощность подстанций;
- ✓ Индивидуальный подход;
- ✓ Сочетание типовых и инновационных решений;
- ✓ Гарантия 36 месяцев.

- ВЛ от 6 – 10 кВ до 750 кВ;
- КЛ от 10 кВ до 220 кВ;
- ПС от 10/0,4 кВ до 220/35/6 кВ;
- ВОЛС

г. Новосибирск, тел.: (383) 363-73-90  
e-mail: vnpo@elsi.ru

