

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

СУКОВ Сергей Феликсович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ НОРМИРОВАНИЯ  
НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ  
КОМПЛЕКТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность 05.09.03 — «Электротехнические  
комплексы и системы, включая их управление  
и регулирование (промышленность)»

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



00825562 (S)

Работа выполнена в Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Научный руководитель:

доктор технических наук,

профессор

МАКАРОВ М. И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,

профессор

КУРЕННИЙ Э. Г.

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник

НАБОКОВ Э. П.

Работодательская организация - Всеукраинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного электрооборудования (ВНИИВЗ, г. Донецк)

Защита диссертации состоится "24" декабря 1992 г. в 14 час. на заседании специализированного совета К 068.20.01 при Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте: 340000, Донецк, ул. Артема, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого политехнического института.

Автореферат разослан "24" ноября 1992 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
канд. техн. наук, доцент

СИДОРЕНКО И. Т.

ЛННБ ім. В. Стефаника  
АН УРСР

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В отечественной и мировой практике электроснабжения горных работ существует устойчивая тенденция к росту электропотребления и установленной мощности электроприемников, что ведет к необходимости соответствующего увеличения единичной мощности участковых комплектных трансформаторных подстанций (КТП). Уже в конце 70-х годов в качестве практической задачи выдвигалась разработка взрывобезопасных трансформаторов и подстанций единичной мощностью 1000 кВА и выше, однако прогноз массо-габаритных показателей показывает, что масса таких подстанций достигала бы 7-8 тонн, а габаритные размеры приблизились бы к типовому сечению горных выработок, в которых они устанавливаются. Таким образом, задача создания взрывобезопасных трансформаторных подстанций повышенной единичной мощности наталкивается на принципиальные трудности и до настоящего времени остается нерешенной.

Возникшее противоречие между потребностями предприятий угольной промышленности в источниках электроснабжения горных работ повышенной единичной мощности и возможностями их разработки и производства на данном этапе, может быть разрешено за счет повышения эффективности использования уже существующих подстанций, которая, как свидетельствуют результаты многочисленных исследований, остается крайне низкой по ряду субъективных и объективных причин. К числу последних относится, в частности, отсутствие методик оценки допустимых нагрузок и норм нагрузочной способности КТП. В этих условиях большое значение имеет разработка методов нормирования нагрузочной способности взрывобезопасных комплектных трансформаторных подстанций при изменяющихся условиях эксплуатации и произвольно заданной нагрузке, позволяющих расширить диапазон допустимых нагрузок КТП и решить актуальную задачу повышения эффективности их использования.

Цель работы - обоснование и разработка методов оценки допустимой нагрузки взрывобезопасных КТП на основе учета закономерностей нагрева и износа изоляции подстанций при изменяющихся условиях эксплуатации и произвольно заданной нагрузке, включая стохастическую, обеспечивающих рациональное использование нормированной нагрузочной способности подстанций при сохранении требуемого уровня надежности.

Идея работы заключается в учете резкопеременного и стохастического характера процессов нагружения, нагрева и теплового износа изоляции, а также нелинейности и нестационарности КТП как тепловой системы при разработке методов нормирования и норм нагрузочной способности подстанций.

Научные положения, разработанные лично соискателем и их новизна:

– математическая модель комплектной трансформаторной подстанции, описывающая динамику процессов нагрева характеристических точек и износа изоляции подстанций, учитывающая нелинейность и нестационарность тепловых параметров КТП, а также влияние на них изменяющихся факторов окружающей среды и условий эксплуатации;

– метод параметрической идентификации тепловой модели КТП по результатам активного эксперимента, основанный на установленной взаимосвязи между переходными функциями нагрева подстанции и характеристиками модели КТП как системы с переменными параметрами;

– зависимости статистических параметров нагрева подстанции в характеристических точках от вероятностных характеристик случайных процессов изменения вторичного напряжения и токовой нагрузки КТП, а также зависимость от этих характеристик интенсивности теплового износа изоляции подстанций;

– автоматизированные методы нормирования нагрузочной способности взрывобезопасных комплектных трансформаторных подстанций при произвольно заданной нагрузке, включая стохастическую, учитывающие зависимость нагрузочной способности подстанций как от текущих, так и от предшествующих нормированию режимов работы и условий эксплуатации.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

подтверждается применением статистических методов исследования и теории планирования эксперимента; использованием специальной измерительной и регистрирующей аппаратуры; обоснованностью принятых допущений; представительным объемом экспериментальных данных, полученных в стендовых и шахтных условиях; широким использованием вычислительной техники при обработке экспериментальных данных и построении математических моделей; достаточной степенью адекватности разработанных моделей реальному объекту (погрешность моделирования температуры не превышает 5.2% для наиболее нагретой точки и 6.8% для остальных характеристических точек подстанции); внедрением основных результатов и выводов в проектную практику и нормативные документы.

Научное значение работы заключается в развитии теории нагрева и теплового износа изоляции рудничных КТП при детерминированной и стохастической нагрузке на основе установленных закономерностей, характеризующих взаимосвязи между факторами, ограничивающими допустимую нагрузку подстанций, и условиями эксплуатации КТП, включая режимные параметры.

Практическая ценность работы состоит в обосновании и оценке численных значений критериев допустимой нагрузки рудничных трансформаторных подстанций как комплектных устройств и использовании установ-

ленных зависимостей и моделей для разработки методов оценки и нормирования нагрузочной способности КТП, ориентированных на применение в составе САПР.

В результате выполненных исследований разработано методическое и аппаратное обеспечение экспериментальных исследований процессов нагружения и нагрева КТП в стендовых и шахтных условиях и впервые получены данные о режимах нагрева подстанций в реальных условиях эксплуатации; разработаны автоматизированные методы и установлены нормы нагрузочной и перегрузочной способности взрывобезопасных КТП серии ТСВП при детерминированном и стохастическом описании нагрузки для широкого диапазона изменения условий эксплуатации подстанций; создано устройство контроля ресурса КТП.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты выполненных исследований использованы:

-институтом ВНИИВЭ при разработке новой ресурсосберегающей серии комплектных взрывобезопасных подстанций КТПВ и подготовке "Методики испытаний на нагрев подстанций КТПВ, ЗТСВ-КП и ТСВП-630/6-1,2". Разработанная тепловая модель взрывобезопасной трансформаторной подстанции используется при проведении расчетов и проектировании новых образцов сухих герметизированных трансформаторов;

-Донецким энергозаводом при модернизации КТП серии ТСВП и при проведении тепловых испытаний экспериментальных образцов трансформаторных подстанций с первичным напряжением 10 кВ;

-шахтой им.М.Горького при оценке эффективности использования эксплуатирующихся на шахте взрывобезопасных КТП и рационализации участковых систем электроснабжения;

-шахтой "Куйбышевская" при проектировании схем электроснабжения технологических участков шахты и выборе устанавливаемой мощности КТП.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и получили одобрение на всесоюзном семинаре "Основные направления развития взрывозащищенного электрооборудования в XII пятилетке" (Донецк, 1986 г.), республиканской конференции "Пути повышения надежности и безопасности электрооборудования и электроснабжения угольных шахт" (Донецк, 1987 г.), всесоюзном научно-техническом совещании "Состояние и прогрессивные методы повышения надежности, долговечности горношахтного оборудования в угольной промышленности" (Донецк, 1990 г.), всесоюзном научно-техническом совещании "Состояние и проблемы развития систем автономного электроснабжения" (Суздаль, 1991 г.), II международном симпозиуме "Автоматическое управление энергообъектами ограниченной мощности" (Санкт-Петербург, 1992 г.), конференции "Методы и средства управления энергопотребле-

нием" (Киев, 1992 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 научных работ, из них одно авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов и заключения. Содержание работы изложено на 141 страницах машинописного текста, иллюстрированного 45 рисунками. Работа содержит 11 таблиц, список использованной литературы из 117 наименований на 11 страницах и 10 приложений на 42 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Взрывобезопасные трансформаторные подстанции являются комплексными устройствами и состоят из четырех основных узлов: силового герметизированного трансформатора с воздушным охлаждением, распределительного устройства высшего напряжения (РУВН), распределительного устройства низшего напряжения (РУНН) и ходовой части.

Условия эксплуатации рудничных КТП значительно отличаются от условий эксплуатации трансформаторных подстанций общего назначения из-за особенностей рудничной атмосферы, ограниченности рабочего пространства, специфики питаемых потребителей и характера графика нагрузки. Наличие относительно частых изменений условий эксплуатации шахтных КТП, резкопеременный стохастический характер графиков нагрузки со значительными выбросами и провалами тока, тяжелый вентиляционный режим и другие особенности эксплуатации трансформаторов в шахтных условиях обуславливают невозможность прямого использования разработанных для общепромышленных трансформаторов методов выбора и нормирования нагрузочной способности.

Учитывая, что задача нормирования нагрузочной способности в конечном итоге сводится к оценке допустимой нагрузки КТП по условиям нагрева, очевидна целесообразность обращения к исследованиям тепловых процессов в трансформаторных подстанциях с целью построения математических моделей, позволяющих с достаточной степенью точности определить параметры теплового состояния КТП в заданном режиме работы.

Анализ закономерностей тепловых процессов в сухих трансформаторах показал, что математическую модель нагрева подстанции целесообразно строить исходя из представления КТП в виде физической системы взаимосвязанных в тепловом отношении тел с использованием для исследования процессов нагрева этой системы теоретических основ метода эквивалентных тепловых схем, обобщенного на случай нестационарного нагрева. Сформированная в результате теоретических исследований тепловая модель КТП представляет собой многомерную динамическую сис-

тому. В качестве входных и параметрических воздействий модели выступают коэффициенты загрузки подстанции по току  $k_1$  и напряжению  $k_u$ , а выходными параметрами являются величины температур нагрева КТП в характеристических точках, ограничивающие величину допустимой нагрузки подстанции.

Исходя из требований нормативных документов и результатов тепловых испытаний подстанций, проводимых Донецким энергозаводом и институтом ВНИИЭЗ, такими точками являются наиболее нагретая точка обмоток силового трансформатора, определяющая максимальную величину теплового износа изоляционных материалов обмоток, а также наиболее нагретые точки наружной поверхности взрывобезопасной оболочки подстанции, РУНН, блока защиты от утечек и автоматического выключателя КТП.

Тепловая модель подстанции в наиболее нагретой точке трансформатора (НТТ) представляет собой нелинейную динамическую систему второго порядка с переменными параметрами (рис.1). Тепловые процессы в данной схеме описываются дифференциальными уравнениями

$$\begin{cases} P_c(k_u) = C_1 \frac{d\theta_1}{d\tau} + \Lambda_{12}(\theta_1 - \theta_2) + \Lambda_1\theta_1; \\ P_n(k_1) = C_2 \frac{d\theta_2}{d\tau} + \Lambda_{12}(\theta_1 - \theta_2) + \Lambda_2\theta_2, \end{cases}$$

где  $P_c(k_u)$  - потери в стали трансформатора в функции от  $k_u$ ;

$P_n(k_1)$  - потери в меди в функции от  $k_1$ ,

а передаточные функции по каналам тока и напряжения имеют вид:

$$W_1 = P_n(k_1) \frac{K_1(1+T_2p)}{K} / \left( \frac{T_1 \cdot T_2}{K} p^2 + \frac{T_1 + T_2}{K} p + 1 \right); \quad (1)$$

$$W_u = P_c(k_u) \left( \frac{K_1 \cdot K_2}{K} \right) / \left( \frac{T_1 \cdot T_2}{K} p^2 + \frac{T_1 + T_2}{K} p + 1 \right), \quad (2)$$

где  $K=1-K_1K_2K_0$ ;  $K_1, T_1$  зависят от величины  $k_1$ ;  $K_2, T_2$  зависят от  $k_u$ .

В других анализируемых точках требуемая точность моделирования динамики процесса нагрева может быть обеспечена в рамках классической теории. Структурная схема полученных моделей представлена на рис.1, а передаточные функции описываются выражениями:

$$W'_1 = P'_n(k_1)/(1+T_1p); \quad W'_u = P'_c(k_u)/(1+T_up). \quad (3)$$

В модели учитывается также влияние параметров микроклимата на

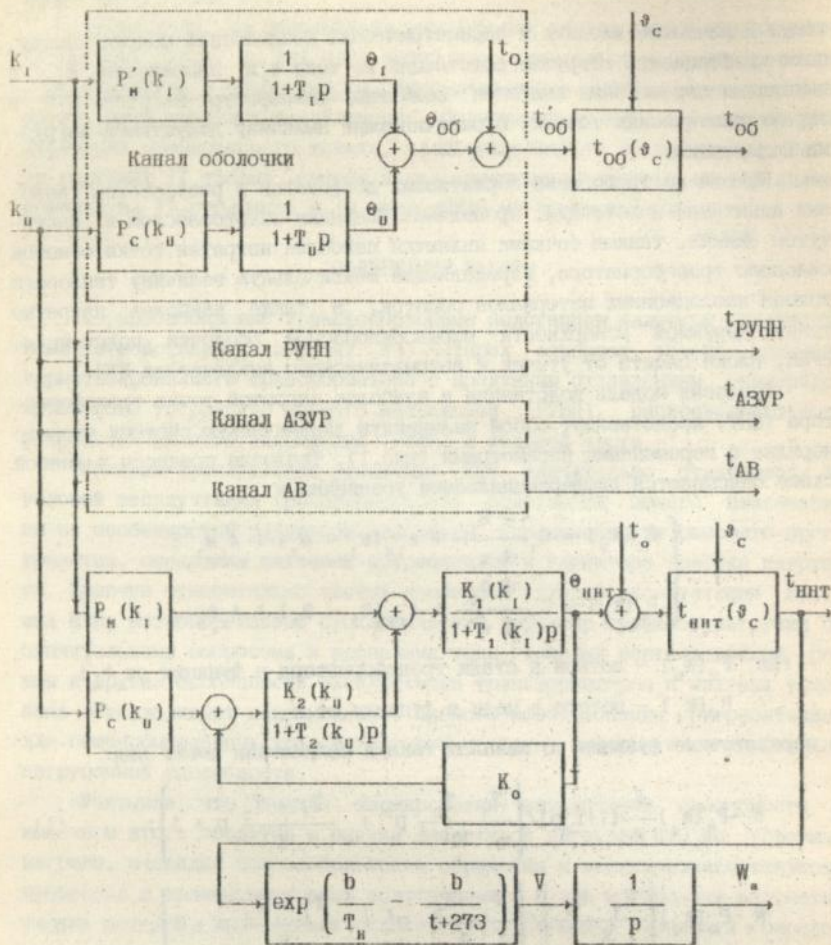


Рис. 1

нагрев КТП, в частности влияние скорости воздушной струи  $\vartheta_c$  на нагрев кожуха и силового трансформатора подстанции.

Одним из основных параметров, ограничивающих допустимую нагрузку подстанций, помимо температуры нагрева характеристических точек является тепловой износ витковой изоляции трансформатора КТП. Использование основных положений теории надежности (модель "слабейшего звена") в сочетании с анализом физической сущности исследуемых процессов

(модель Эйринга кинетики физико-химических процессов) и результатов ресурсных испытаний трансформаторов 2ТСВ, проведенных институтом ВНИИЭ, позволило обобщить и систематизировать методику оценки характеристик старения изоляции КТП и установить количественные зависимости ресурса, интенсивности и абсолютной величины теплового износа изоляции КТП серии ТСВП от температуры:

$$R(T) = e^{a+b/T}, \quad V(T) = e^{b/T_H - b/T}, \quad W_a(T) = \int_0^{\tau} V dt = e^{(b/T_H) \tau} \int_0^{\tau} e^{-b/T} dt,$$

где  $T$  - абсолютная температура нагрева, К;

$T_H$  - нормативная температура нагрева, К;

$a, b$  - коэффициенты (для КТП серии ТСВП  $a = -46.9$ ,  $b = 27065$ ).

Таким образом, в результате проведенных исследований сформирована модель, связывающая критерии нагрузочной способности КТП с режимом работы и условиями эксплуатации взрывобезопасных трансформаторных подстанций. Обобщенная модель КТП (рис.1) имеет четыре входа и шесть выходов. В качестве входных факторов используются коэффициенты загрузки подстанции по току  $K_I$  и напряжению  $K_U$ , температура окружающей среды  $t_o$  и скорость воздушной среды  $\varphi_c$ . Первые пять выходных параметров модели характеризуют температуру нагрева подстанции в различных характеристических точках, а шестой - величину абсолютного износа изоляционных материалов  $W_a$ , т.е. выходные параметры модели полностью охватывают группу факторов, способных тем или иным образом ограничить величину и длительность допустимой нагрузки КТП в процессе эксплуатации. Полученная модель была реализована в виде программного модуля, написанного на языке Pascal.

Поставленные в работе задачи, и в частности параметрическая идентификация разработанной тепловой модели, требуют проведения большого объема экспериментальных исследований, связанных с долговременной регистрацией различных электрических и температурных параметров КТП как в лабораторных, так и в шахтных условиях. Для соответствующего аппаратного обеспечения указанных видов измерений была разработана специальная измерительная аппаратура, к числу основных достоинств которой следует отнести отсутствие необходимости обслуживания в процессе записи информации, малые габариты и возможность непосредственной обработки записанной информации на ЭВМ.

Разработанная аппаратура была использована для проведения стендовых испытаний КТП на нагрев. В качестве объекта испытаний использовалась трансформаторная подстанция типа ТСВП-400/6-УХЛ5, являющаяся

тишопредставителем серии взрывобезопасных трансформаторных подстанций мощностью от 100 до 630 кВА напряжением 6 кВ. Общая длительность экспериментов составила около 110 часов, а объем данных – более 1300 точек по каждому из входных и выходных параметров модели. На основе полученных в ходе испытаний экспериментальных данных была проведена параметрическая идентификация тепловой модели КТП, т.е. установлены динамические и статические параметры передаточных функций (1)–(3).

Из вида передаточных функций тепловой модели КТП для наиболее нагретой точки трансформатора следует, что переходные функции этой системы по каналам тока и напряжения описываются выражениями:

$$h_i = \theta_{H1} + (\theta_{y1} - \theta_{H1}) \left[ 1 + \frac{T_c - T_a}{T_a - T_b} e^{-t/T_a} + \frac{T_b - T_c}{T_a - T_b} e^{-t/T_b} \right], \quad (4)$$

$$h_u = \theta_{Hu} + (\theta_{yu} - \theta_{Hu}) \left[ 1 - \frac{T_a}{T_a - T_b} e^{-t/T_a} + \frac{T_b}{T_a - T_b} e^{-t/T_b} \right], \quad (5)$$

где  $\theta_{H1}$ ,  $\theta_{y1}$  – начальное и установившееся значения нагрева;

При этом справедливы следующие соотношения между параметрами передаточных функций (1), (2) и переходных функций (4), (5):

$$\frac{T_1 T_2}{K} = T_a T_b; \quad \frac{T_1 + T_2}{K} = T_a + T_b; \quad T_2 = T_c; \quad P_H = \theta_{y1} \frac{K}{K_1}; \quad P_c = \theta_{yu} \frac{K}{K_1 K_2}.$$

На основании этих соотношений была произведена аппроксимация экспериментальных переходных функций нагрева и определены параметры тепловой модели подстанции в наиболее нагретой точке:

$$K_1 = 0,9k_1^2 - 1,92k_1 + 2,02; \quad T_1 = 127,3k_1^2 - 272,1k_1 + 286,4, \text{ мин};$$

$$K_2 = \begin{cases} 0,763 & \text{при } k_u = 0 \\ 1 & \text{при } k_u \neq 0; \end{cases} \quad T_2 = \begin{cases} 375,6 \text{ мин} & \text{при } k_u = 0 \\ 280 \text{ мин} & \text{при } k_u \neq 0; \end{cases}$$

$$K_0 = 0,097; \quad P_H = 125,9k_1^{1,91}; \quad P_c = 22,3k_u^{3,69};$$

Аналогичным образом были получены параметры модели и для других характеристических точек подстанции. При обработке принималось во внимание, что практически в каждой из анализируемых точек, согласно результатам экспериментов, в той или иной степени проявляется эффект чистого запаздывания сигнала относительно входных воздействий тока и напряжения.

Предварительная проверка адекватности полученной модели КТП по результатам стендовых испытаний позволила сделать вывод о хорошем

соответствии результатов моделирования реальным процессам, протекающим в подстанции при входных воздействиях в виде ступенчатых изменений напряжения и тока нагрузки.

Для оценки точности моделирования нагрева и износа изоляции КТП при резкопеременных графиках нагрузки были проведены шахтные исследования режимов работы подстанций, включающие в себя регистрацию тока, вторичного напряжения и температуры нагрева трансформатора КТП. Исследования проводились на шахте им. М.Горького п/о "Донецкуголь". Объектами исследования являлись две трансформаторные подстанции серии ТСВП мощностью 400 кВА и одна - 250 кВА. Общая продолжительность исследований составила более 60 рабочих смен. В результате статистической обработки экспериментальных данных о режиме нагружения и нагреве КТП установлено, что случайные величины вторичного напряжения и температуры нагрева КТП подчиняются нормальному закону распределения, а данные по токовой нагрузке - нормальному закону с ограничением на нулевом уровне. Автокорреляционные функции процессов изменения тока и напряжения имеют вид соответственно экспоненциальной и экспоненциально-косинусной функций с периодом, близким к длительности одной рабочей смены. Автокорреляционные функции имеют затухающий характер, что, в сочетании с анализом вида полученных реализаций, позволяет принять допущение о стационарности и эргодичности этих процессов.

Проверка адекватности модели с использованием в качестве входных воздействий реальных величин напряжения и тока нагрузки, зафиксированных в процессе указанных исследований, показала, что результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями как по температуре, так и по износу изоляции КТП и погрешность моделирования указанных характеристик не превышает соответственно 6 и 11%.

Для определения неизвестных параметров закона теплового старения изоляции КТП, в частности нормативной температуры нагрева изоляционных материалов, были проведены определятельные эксплуатационные испытания на надежность КТП серии ТСВП на шахтах п/о "Донецкуголь" и "Шахтерсканатрацит". В результате исследований установлено, что нормативная температура нагрева изоляционных материалов КТП серии ТСВП составляет  $192^{\circ}\text{C}$ , что значительно превышает величину, устанавливаемую нормативными документами для изоляции класса нагревостойкости П.

Проведенные экспериментальные исследования и соответствующая обработка полученных результатов позволили установить все искомые характеристики модели КТП, т.е. осуществить ее полную параметрическую идентификацию. Полученная модель была положена в основу разработки автоматизированных методов нормирования нагрузочной способности КТП.

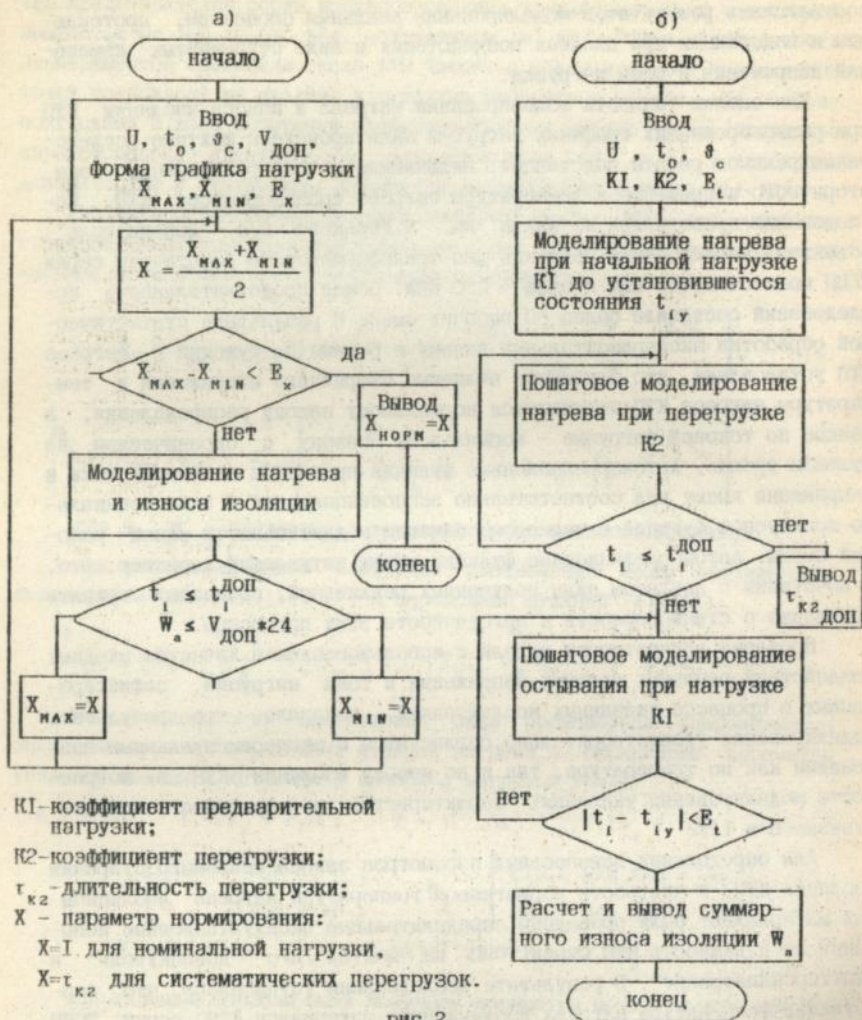


рис.2

В соответствии с результатами проведенных исследований и требованиями нормативных документов были установлены предельные величины параметров, являющихся критериями допустимой нагрузки подстанций. К числу этих параметров относятся величины температур нагрева характеристических точек и допустимая скорость теплового износа изоляции  $V_{доп} = (S - W_{факт}) / (S - W_{норм})$ , где S - нормативный срок службы подстанции,

$W_{\text{факт}}$ ,  $W_{\text{норм}}$  - фактический и нормативный износ изоляции на момент нормирования нагрузочной способности.

Нормирование нагрузочной способности производилось как для детерминированной нагрузки подстанции, заданной в виде ступенчатого графика, так и для вероятностно заданной нагрузки.

Нормирование нагрузочной способности при детерминированной нагрузке заключалось в определении номинальной нагрузки КТП при постоянной и перемежающейся загрузке, нормировании систематических перегрузок и нормировании аварийных перегрузок.

Алгоритм нормирования номинальной нагрузки и систематических перегрузок имеет итерационный характер и приведен на рис.2,а. Установленные в результате нормирования графики допустимых систематических перегрузок при различном уровне предварительной нагрузки для нормативных условий эксплуатации приведены на рис.3. Аналогичные результаты получены в работе и для условий эксплуатации, отличающихся от нормативных. В частности, установлены зависимости номинальной нагрузки и систематических перегрузок от температуры окружающей среды, скорости воздушной струи, величины питающего напряжения и остаточного ресурса изоляции. В работе установлены также нормы аварийных перегрузок трансформаторной подстанции ТСВП-400 как при нормативных условиях эксплуатации так и при условиях эксплуатации, отличающихся от нормативных. Алгоритм по которому осуществлялось нормирование аварийных перегрузок представлен на рис.2,б.

Вероятностный подход к задаче нормирования нагрузочной способности шахтных трансформаторных подстанций приводит к необходимости установления количественных зависимостей вероятностных характеристик нагрева и теплового износа изоляции подстанций от параметров режима работы и условий эксплуатации КТП. К числу последних относятся характеристики законов распределения и корреляционных функций токовой нагрузки и вторичного напряжения подстанций, величина температуры окружающей среды и скорость воздушной струи в месте установки КТП.

Для получения требуемых зависимостей был проведен комплекс машинных экспериментов, основу которых составляло статистическое моделирование процессов изменения тока нагрузки и вторичного напряжения КТП, являющихся входными характеристиками тепловой модели подстанции. При проведении исследований был применен аппарат планирования многофакторных экспериментов. Схема КТП, как объекта имитационных экспериментов с использованием центрального композиционного ротатбельного плана второго порядка, приведена на рис.4.

Обработка результатов моделирования позволила установить значащие факторы и параметры искомым регрессионных зависимостей:

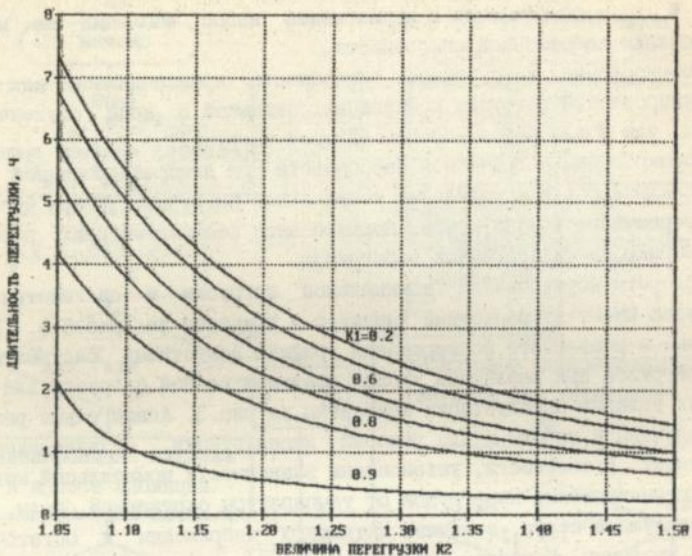


рис.3

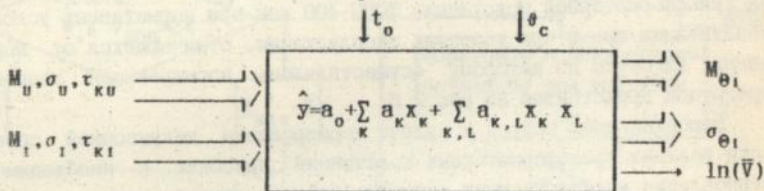


рис.4

$$M_{l1} = a_0 + a_{1u} M_u + a_{3l} M_l + a_{4l} \sigma_l + a_{13} M_u M_l + a_{34} M_l \sigma_l + a_{33} (M_l)^2 + a_{44} (\sigma_l)^2, \quad (6)$$

$$M_{l2-5} = a_0 + a_{3l} M_l + a_{4l} \sigma_l + a_{33} (M_l)^2 + a_{44} (\sigma_l)^2, \quad (7)$$

$$\sigma_{l1} = a_0 + a_{1u} M_u + a_{3l} M_l + a_{4l} \sigma_l + a_{6kl} \tau_{kl} + a_{13} M_u M_l + a_{34} M_l \sigma_l + a_{36} M_l \tau_{kl} + a_{46} \sigma_l \tau_{kl} + a_{33} (M_l)^2 + a_{44} (\sigma_l)^2 + a_{66} (\tau_{kl})^2, \quad (8)$$

$$\sigma_{l2-5} = a_0 + a_{3l} M_l + a_{4l} \sigma_l + a_{6kl} \tau_{kl} + a_{34} M_l \sigma_l + a_{36} M_l \tau_{kl} + a_{46} \sigma_l \tau_{kl} + a_{33} (M_l)^2 + a_{44} (\sigma_l)^2 + a_{66} (\tau_{kl})^2, \quad (9)$$

$$\ln \bar{V} = a_0 + a_{1u} M_u + a_{3l} M_l + a_{4l} \sigma_l + a_{70} t_0 + a_{8c} \theta_c + a_{34} M_l \sigma_l + a_{36} M_l \tau_{kl} + a_{46} \sigma_l \tau_{kl} + a_{33} (M_l)^2 + a_{44} (\sigma_l)^2 + a_{66} (\tau_{kl})^2 + a_{88} (\theta_c)^2, \quad (10)$$

где  $a_{ij}$  — коэффициенты, значения которых приведены в диссертационной работе.

Полученные выражения были положены в основу решения задачи нормирования нагрузочной способности взрывобезопасных трансформаторных подстанций при вероятностно заданной нагрузке. Учитывая нормальный характер распределения температур нагрева характеристических точек КТП, можно записать следующую систему ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (M_{t_1} + 3\sigma_{t_1} + t_0) * f_{\text{НПТ}}(\vartheta_c) \leq t_{\text{Доп}}^{\text{НПТ}} ; \\ M_{t_2} + 3\sigma_{t_2} + t_0 \leq t_{\text{Доп}}^{\text{АЗУР}} ; \\ M_{t_3} + 3\sigma_{t_3} + t_0 \leq t_{\text{Доп}}^{\text{АВ}} ; \\ M_{t_4} + 3\sigma_{t_4} + t_0 \leq t_{\text{Доп}}^{\text{РУНП}} ; \\ (M_{t_5} + 3\sigma_{t_5} + t_0) * f_{\text{ОО}}(\vartheta_c) \leq t_{\text{Доп}}^{\text{ОО}} ; \\ \ln \bar{V} \leq \ln (V_{\text{Доп}}) . \end{array} \right. \quad (II)$$

Полученные в результате решения системы неравенств (II) зависимости допустимого среднеквадратического отклонения тока  $\sigma_I$  от его математического ожидания  $M_I$  при различных параметрах условий эксплуатации КТП типа ТСВН-100 приведены на рис. 5.

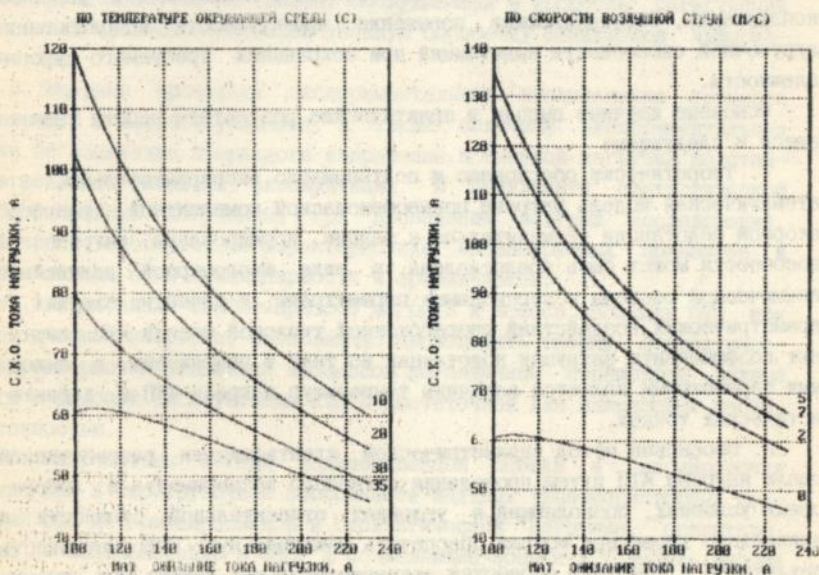


рис. 5

Разработанные методы оценки и нормирования нагрузочной способности шахтных трансформаторных подстанций в качестве основного критерия допустимости нагрузки используют величину фактического теплового износа изоляции трансформатора КТП. Для получения этой информации разработано и создано устройство интегрального контроля ресурса шахтных КТП, осуществляющее непрерывный учет величины теплового износа изоляции подстанций в процессе эксплуатации. Устройство обеспечивает определение износа изоляции по температуре нагрева наиболее нагретой точки КТП с погрешностью не более 10%. Получаемая с его помощью информация может быть использована для оценки реальной нагрузочной способности КТП и решения ряда других важных задач, связанных с надежностью, установлением фактических сроков службы и нормативов потребности угольной промышленности во взрывобезопасных трансформаторных источниках электроснабжения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе научно обоснованы критерии и разработаны методы оценки допустимых нагрузок взрывобезопасных КТП при детерминированных и стохастических режимах работы и изменяющихся условиях эксплуатации, обеспечивающие повышение эффективности использования нагрузочной способности подстанций при сохранении требуемого уровня надежности.

Основные научные выводы и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Теоретически обосновано и подтверждено экспериментально, что математическая модель нагрева взрывобезопасной комплектной трансформаторной подстанции применительно к задаче нормирования нагрузочной способности может быть представлена в виде многомерной нелинейной динамической системы с переменными параметрами. В качестве входных и параметрических воздействий разработанной тепловой модели КТП выступают коэффициенты загрузки подстанции по току и напряжению, а выходными параметрами являются величины температур нагрева КТП в характеристических точках.

2. Обоснован метод параметрической идентификации разработанной модели нагрева КТП путем проведения активного эксперимента в лабораторных условиях, позволяющий в условиях относительной сложности и нелинейного характера модели обеспечить максимальную информативность результатов и простоту обработки экспериментальных данных при приемлемом уровне трудоемкости экспериментов.

3. Установлены количественные закономерности теплового износа

изоляционных материалов трансформаторных подстанций серии ТСВП в процессе эксплуатации и определена нормативная температура нагрева изоляционных материалов КТП. Разработано и создано устройство контроля ресурса взрывобезопасных трансформаторных подстанций.

4. Разработана обобщенная модель нагрева и износа изоляции КТП, включающая в себя помимо тепловой модели подсистему моделирования теплового износа изоляции КТП и учитывающая влияние параметров микроклимата на нагрев ее характеристических точек. Разработанная модель и реализующий ее программный модуль пригодны как для алгоритмизации теплового расчета подстанций при заданных режимах работы и условиях эксплуатации, так и для решения обратной задачи, т.е. нормирования указанных режимов и условий по установленным ограничениям нагрева и износа изоляции.

5. Разработано методическое и аппаратное обеспечение для проведения экспериментальных исследований режимов работы взрывобезопасных КТП в стендовых и шахтных условиях. Созданная измерительная аппаратура обеспечивает долговременную регистрацию вторичного напряжения, тока и температуры нагрева подстанции с высокой точностью, стабильностью и надежностью, не требует обслуживания в процессе регистрации и позволяет проводить непосредственную обработку записанной информации на ЭВМ.

6. Впервые проведены экспериментальные исследования процесса нагрева КТП в шахтных условиях, а также получены экспериментальные данные об изменении вторичного напряжения и токовой нагрузки подстанций в реальных условиях эксплуатации. В результате статистической обработки данных, полученных при проведении шахтных исследований, установлены вероятностные характеристики анализируемых процессов и сделаны выводы о их стационарности и эргодичности.

7. Установлены закономерности нагрева и износа изоляции КТП при стохастической нагрузке, позволяющие производить оценку статистических характеристик указанных процессов по заданным параметрам режима работы и условий эксплуатации КТП с достаточной для инженерных расчетов точностью.

8. Разработаны методы количественной оценки и нормирования нагрузочной и перегрузочной способности шахтных трансформаторных подстанций при детерминированной и стохастической нагрузке, ориентированные на использование в САПР и позволяющие повысить точность выбора и улучшить эффективность использования мощности взрывобезопасных трансформаторов и КТП.

9. Результаты работы и предложенные рекомендации по повышению эффективности использования нагрузочной способности взрывобезопасных

трансформаторных подстанций внедрены на Донецком энергозаводе, в институте ВНИИВЭ и на двух шахтах п/о "Донецкуголь". Суммарный экономический эффект, полученный в результате внедрения, составляет 973,5 тыс.руб.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Макаров М.И., Суков С.Ф., Плетнев А.И. Основные виды и причины отказов взрывобезопасных трансформаторных подстанций типа ТСВП// Уголь Украины.- 1988.- №8- С.36-37.

2. Макаров М.И., Суков С.Ф. Расчет теплового износа изоляции шахтных взрывобезопасных трансформаторных подстанций. М., 1987.- 14с.- Деп.в ЦНИЭУголь, № 4229.

3. Плетнев А.И., Макаров М.И., Суков С.Ф. Эксплуатационная надежность взрывобезопасных трансформаторных подстанций серии ТСВП// Основные направления развития взрывозащищенного электрооборудования в XII пятилетке: Тез. докл. всесоюз. семинара.- М., 1986.- С.23-24.

4. Гостищев В.Н., Ручкин А.Г., Суков С.Ф. Повышение технического уровня взрывобезопасных трансформаторных подстанций серии ТСВП в части их надежности// Уголь.- 1989.- №3- С.40-41.

5. А.с. I492294 СССР. МКИ<sup>4</sup> GOIR II/00. Счетчик износа витковой изоляции трансформатора/ С.Ф.Суков, М.И.Макаров, А.И.Плетнев, О.А.Павлий (СССР).- 4 с.: ил.

6. Макаров М.И., Суков С.Ф. Нормирование нагрузочной способности шахтных трансформаторных подстанций// Автоматическое управление энергообъектами ограниченной мощности: Тез. докл. II междунар. симп.- Санкт-Петербург, 1992.- С.24-25.

7. Суков С.Ф., Селевич С.А. САПР систем электроснабжения технологических участков угольных шахт// Автоматическое управление энергообъектами ограниченной мощности: Тез. докл. II междунар. симп.- Ст.-Петербург, 1992.- С.77-78.

8. Турупалов В.В., Макаров М.И., Суков С.Ф. Нормирование структурной надежности систем электроснабжения горных предприятий// Автоматическое управление энергообъектами ограниченной мощности: Тез. докл. II междунар. симп.- Ст.-Петербург, 1992.- С.51-52.

9. Суков С.Ф., Макаров М.И., Шумейко К.Ю. Аппаратура регистрации параметров режима работы электрических машин и аппаратов// Состояние и проблемы развития систем автономного электроснабжения: Тез. докл. всесоюзн. науч.-техн. совещания- Суздаль, 1991.- С.143-144.

10. Макаров М.И., Суков С.Ф. Устройство контроля ресурса взрывобезопасных комплексов трансформаторных подстанций// Состояние и проблемы развития систем автономного электроснабжения: Тез. докл. всесоюзн. науч.-техн. совещания- Суздаль, 1991.- С.145-146.

Подп. в печать 20.11.92 Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Бумага одоброточна. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 0,93 . Усл. кр.-отг. 1,16 . Уч.-изд. л. 10 , Тираж 120 экз.

Заказ № 9-625.

Донецкий политехнический институт, 340000, Донецк, ул. Артема, 58.

ДМПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

Ab 26.184

**AB 26.184**