

Электротехника

11 2011



МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ –
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издаётся с января 1930 года

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

МАКАРЕВИЧ Л.В. (председатель совета), МЕЩЕРЯКОВ В.М., ОРЛОВ Ю.А., КОВАЛЕВ Ф.И.,
ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И. (заместитель председателя совета), ГЛОВАЦКИЙ А.В., ЧИБИРКИН В.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **РОЗАНОВ Ю.К.**, доктор техн. наук, проф.,
БЕЛКИН Г.С., доктор техн. наук, БЕСПАЛОВ В.Я., доктор техн. наук, проф., БРЯНЦЕВ А.М.,
доктор техн. наук, ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., канд. техн. наук, ДОЛКАРТ В.М., доктор техн. наук, ИНЬКОВ Ю.М.,
доктор техн. наук, проф., КОЗЯРУК А.Е., доктор техн. наук, проф., КОПЫЛОВ И.П., доктор техн. наук, проф.,
ЛАЗАРЕВ Г.Б., канд. техн. наук, ЛУРЬЕ А.И., канд. техн. наук, МОСКАЛЕНКО В.В., канд. техн. наук, проф.,
НИКУЛИН А.А., канд. техн. наук, ПАНИБРАТЕЦ А.Н., канд. техн. наук, СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В., доктор
техн. наук, проф. (зам. главного редактора), ТУБИС Я.Б., канд. техн. наук

Полная версия журнала в формате PDF размещена на
сайте Российской универсальной научной электронной
библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru.

В редакции можно подписаться на журнал с любого
месяца и приобрести отдельные номера.

Журнал переводится на английский язык в полном
объёме и выходит в США в издательстве "ALLERTON
PRESS, INC" (18 West 27th Street New York N.Y. 10001).

Подписаться на журнал можно в почтовых
отделениях связи по объединённому каталогу
Департамента почтовой связи. Подписной индекс
— 71111.

При перепечатке ссылка на журнал
«Электротехника» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой
зрения авторов статей.
За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несёт.
Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.
Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (495) 361-95-96
E-mail elektrotehnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Редактор З.П. Фёдорова
Компьютерная вёрстка Н.Н. Мерзляков

Сдано в набор 11.09.2011 Выход в свет 20.11.2011 Формат 60х88 1/8.
Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 251
Цена свободная. Тираж 750 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный 01330.

СОДЕРЖАНИЕ

Петроченков А.Б. 50 лет кафедре микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ)	2
Казанцев В.П., Костыгов А.М., Кузнецов М.И., Москоков А.Ю. Аналитическая процедура определения параметров высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором после ремонта	4
Ковригин Л.А., Боронников А.А., Сидельников Л.Г. Экспериментальное определение напряжения возникновения и гашения частичных разрядов в кабельных линиях	7
Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б. Моделирование электрической нагрузки для настройки систем управления конвертируемыми газотурбинными установками	11
Шербинин А.Г., Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю., Савченко В.Г. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в кабельном канале	16
Петроченков А.Б., Бочкарёв С.В., Ромодин А.В., Елтышев Д.К. Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов	20
Зиннатуллин Р.Р., Казаков А.В., Труфанова Н.М. Автоматизированная система управления процессом наложения пластмассовой изоляции кабелей методом экструзии	24
Казанцев В.П., Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И. Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния	28
Файзрахманов Р.А., Франк Т., Кычкин А.В., Фёдоров А.Б. Рациональное управление потреблением энергии с помощью информационной системы энергоменеджмента My-JEVis	35
Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Автоматизация автономных многоагрегатных электростанций на основе нечёткого регулирования с применением нейронной технологии	40
Кузнецов М.И., Ромодин А.В., Костыгов А.М. Экспериментальное исследование управления потоком реактивной мощности в электрической системе с трёхобмоточным трансформатором	46
Петроченков А.Б., Солодкий Е.М. О методах построения моделей отказов сложных систем	50
Кухарчук И.Б., Ковригин Л.А. Расчет тока нагрева греющего кабеля в нефтяной скважине	54
Хорошев Н.И., Казанцев В.П. Применение правил нечёткой логики при эксплуатации электротехнического оборудования	59
Авторы опубликованных статей	65
К 100-летию со дня рождения видного учёного-электротехника, доктора технических наук, профессора Льва Поликарповича Петрова . 3с. обл	

CONTENTS

A.B. Petrochenkov. 50 years to the chair "Microprocessor Automation Means" of Perm state technical university.	2
V.P. Kazantsev, A.M. Kostygov, M.I. Kuznetsov, A.Yu. Moskokov. Asynchronous high voltage short-circuited electric engines analytical procedure tests after repair	4
L.A. Kovrigin, A.A. Boronnikov, L.G. Sidel'nikov. Experimental determination of the inception voltage and the quenching of partial discharges in cable lines	7
D.V. Kavalerov, A.D. Petrochenkov. The simulation of power system for search of convert gas-turbine units control systems options	11
A.G. Scherbinin, N.M. Trufanova, E.Yu. Navalikhina, V.G. Savchenko. Determine by the performance of cables in cable channel	16
A.B. Petrochenkov, S.V. Bochkaryov, A.V. Romodin, D.K. Eltyshv. Planning of the electrotechnical equipment operational process with use of markovian processes theory	20
R.R. Zinnatullin, A.V. Kazakov, N.M. Trufanova. Automated process control system overlap plastic insulated cables by extrusion	24
V.P. Kazantsev, A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, N.I. Khoroshev. Some aspects of electro engineering equipment exploitation technology on the basis of engineering short-term forecast method	28
R.A. Faizrahmanov, T. Frank, A.V. Kychkin, A.B. Fyodorov. Efficient energy controlling with informative energy management system My-JEVis	35
Yu.N. Khizhnyakov, A.A. Yuzhakov. Automation autonomous mnogoagregatnyh power on the basis of fuzzy control with neural technology	40
M.I. Kuznetsov, A.V. Romodin, A.M. Kostygov. Experimental research of management of a reactive power stream in electric system with the three-circuit transformer	46
A.B. Petrochenkov, E.M. Solodkii. About methods of construction of models of refusals of difficult systems	50
I.B. Kukharchuk, L.A. Kovrigin. Calculation of current heating heating cables in an oil well.	54
N.I. Khoroshev, V.P. Kazantsev. Fuzzi logic rules application at electroengineering equipment exploitation.	59
Autors of published article	65
To the 100-anniversary from birthday scholar distinguished Vologodskiy Petrova 3. p. cover	

50 лет кафедре микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ)

Научно-исследовательско-образовательная работа, осуществляемая кафедрой микропроцессорных средств автоматизации (в 1991 г. кафедра сменила название, до этого она называлась «Автоматизированный электропривод»), связана с историей развития кафедры. Первые научные направления были посвящены совершенствованию преобразовательной техники систем управления электроприводом. В дальнейшем, на рубеже 70-х годов, кафедра начала активно разрабатывать направления, связанные с автоматизацией технологических процессов и производств, преимущественно на микропроцессорной основе. Наиболее высокий уровень работ был достигнут в области испытательных технологий в авиационной промышленности (системах автоматического управления газотурбинными двигателями), а также в энергетическом машиностроении (испытания трансмиссий большегрузных БелАЗов). Далее эволюция научного развития кафедры состояла в наращивании интеллектуального потенциала прежде всего, в оптимизации управления различными технологическими объектами и создании новых информационных технологий.

Таким образом, кафедра, поступательно развиваясь в указанных направлениях (ключевыми фразами, характеризующими её деятельность, являются: «оптимизация», «современные информационные технологии», «математизация», «современные методы идентификации», «моделирование в сложных средах, сложных объектах»), не теряла базового потенциала, который был наработан («силовые каскады», «преобразовательные устройства», «робототехнические комплексы», «методы развития микропроцессорных систем автоматизации»). Это оказалось актуальным, поскольку в силу меняющейся структуры востребованности технологий в пространстве России в последнее время наблюдалось некоторое ослабление интересов к авиационной тематике, зато все то, что было наработано в силовой части, оказалось очень полезным в сочетании с современными информационными технологиями в области модернизации современных систем

энергетики, и это направление постепенно для кафедры становится глобальным.

В сегодняшнее поле деятельности кафедры микропроцессорных средств автоматизации (МСА) включены такие крупнейшие предприятия Пермского региона, как «Пермские моторы», «Авиадвигатель», «Мотовилихинские заводы», «ПЕРМЭНЕРГО». Наиболее интересные разработки касаются многоуровневой модернизации энергетического комплекса, начиная от задач управления и обработки информации на автоматизированном рабочем месте энергетика до планирования и организации ремонта электрооборудования, — это энергетика перерабатывающих отраслей, в частности, предприятия концерна «ЛУКОЙЛ».

Кафедра активно участвует в международных проектах. В настоящее время наиболее эффективными являются проекты, связанные с рядом европейских стран — Германией, Швейцарией, Болгарией, Австрией. Есть работы, связанные с Канадой (университет Ryerson), США (Университет Техаса, Луисвилльский университет). С 2008 г. 10–15 лучших студентов кафедры ежегодно проходят стажировку в формате проектной недели преддипломной практики в Университете Прикладных наук Анхальт (Германия). Четвёртый год кафедра ведёт совместный проект MDAC (Модульный центр сбора данных) с Институтом независимых исследований Цюриха (Швейцария). В 2011/2012 учебном году на кафедре запускается совместная с Университетом Прикладных наук Анхальт подготовка студентов-магистрантов по направлению 220700.68 «Автоматизация технологических процессов и производств» (с выдачей двойных дипломов).

Кафедра является ядром современных направлений развития услуг образования и технологий, в частности, при активном участии кафедры создан Научно-образовательный центр энергосбережения (НОЦЭС). Большинство преподавателей кафедры работают в НОЦЭС и повышают свою квалификацию как преподаватели курсов, общаясь с производственной аудиторией. Кафедра активно участвует в модернизации управления национальным иссле-

довательским университетом, один из компонентов которого — подготовка и трудоустройство кадров по линии заказных специализаций. Кроме того, кафедра является вузовским центром CALS-технологий, координатором пилотных проектов этого направления для предприятий Пермского региона.

Все перечисленные компоненты дают основание рассматривать кафедру как сформировавшуюся структуру, которая предлагает абитуриентам и студентам достаточно широкие варианты определения себя как в области научного поиска и последующей реализации в выбранной научной направленности, так и в формировании специалиста высокой квалификации, активно востребованного современными технологическими рынками, имеющими хороший потенциал обеспечения этих специалистов.

Кафедрой успешно апробированы и поддерживаются различные образовательные траектории. В 2010/2011 учебном году кафедра МСА выпустила 175 специалистов различных форм подготовки. Профессорско-преподавательский состав кафедры включает в себя около 40 высококлассных специалистов, в том числе 5 профессоров, успешно развивается аспирантура и докторантура.

К основным направлениям научно-исследовательской деятельности кафедры можно отнести:

- разработка цифровых систем управления ротационными стендами для испытаний изделий авиакосмической техники;

- разработка методики безнагрузочных испытаний низковольтных и высоковольтных асинхронных двигателей;

- математическое моделирование и исследование мини-энергосистем на основе газотурбинных двигателей;

- системы технической диагностики и учёта энергетического оборудования. ИПИ/CALS-технологии в энергетике;

- энергосберегающие технологии предприятий; разработка прикладных программ по оценке энергетической эффективности объектов энергетического комплекса;

- проектирование и изготовление специального оборудования.

Кафедра МСА является базовой в Пермском национальном исследовательском политехническом университете. За последние 2 года внедрены научно-исследовательская лаборатория «Средства энергооптимизации и

энергоресурсосбережения», а также лаборатория для построения современных систем стендовых испытаний на базе модульной реконфигурируемой архитектуры с использованием современных модулей сбора информации и управления исполнительными механизмами. В научно-исследовательской работе активно задействованы магистранты и аспиранты кафедры, 17 студентов работают с оплатой.

В 2011/2012 учебном году наиболее актуальными кафедральными разработками являются:

- НИОКТР «Разработка методологии и программно-технических средств интеллектуализации единого центра многоцелевых испытаний газотурбинных установок до 40 МВт» между ОАО «Протон-Пермские моторы» и ПНИПУ в рамках Постановления (руководитель — заведующий кафедрой МСА А.Б. Петроченков);

- НИР «Разработка комплекса математических моделей электрогенератора и электросети (КМЭС)» для ООО «Авиадвигатель» (руководитель — заведующий кафедрой МСА А.Б. Петроченков);

- Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных — кандидатов наук МК-2773.2011.8 «Управление техническим состоянием электроэнергетических объектов с целью повышения параметров их энергоэффективности»;

- НИР «Разработка муниципальной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности г. Пермь на период 2011–2015гг.» (руководитель — директор НОЦЭС, доцент кафедры МСА А.В. Ромодин, научный руководитель — заведующий кафедрой МСА А.Б.Петроченков).

Выбранный коллективом вектор развития кафедры МСА, направленный в интересах комплексной подготовки специалистов с высоким уровнем компетенции на основе сквозного использования современных информационных (CAE/CAD/CAM/PDM/CALS) технологий, заключается в обеспечении принципиально нового качества образования за счёт системной интеграции теории, эксперимента (экспериментальное оборудование и методики экспериментальных исследований), опыта и знаний в смежных предметных областях (образование, структуры производства, инновации, интеллектуальная собственность, электротехническая отрасль) на основе моделирования и

использования возможностей современных информационных технологий для совершенствования существующих образовательных программ и создания новой методологии обучения, в том числе при оптимизации проектно-конструкторских и технологических решений, а также мето-

дов их реализации в организации производства и управлении предприятиями.

А.Б. Петроченков, заведующий кафедрой «Микропроцессорные средства автоматизации» ПНИПУ, доц., канд. техн. наук

Аналитическая процедура определения параметров высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором после ремонта

КАЗАНЦЕВ В.П., КОСТЫГОВ А.М., КУЗНЕЦОВ М.И., МОСКОКОВ А.Ю.

Рассмотрена аналитическая процедура определения номинальных параметров высоковольтных асинхронных короткозамкнутых двигателей после ремонта в условиях отсутствия достоверных каталожных данных или недостаточности экспериментальных данных.

Ключевые слова: асинхронный короткозамкнутый двигатель, аналитическая процедура, определение параметров, схема замещения, векторная диаграмма, рабочие характеристики.

Для решения инженерных задач синтеза и анализа систем автоматизации на основе применения высоковольтных частотных асинхронных электроприводов производственных механизмов, а также параметрирования частотных преобразователей возникает необходимость определения конкретной совокупности параметров и возможных условий применения высоковольтных двигателей. При этом зачастую для параметрирования частотно-регулируемых электроприводов каталожных данных двигателей оказывается недостаточно, а в ряде случаев, связанных, например, с использованием отремонтированных электродвигателей, их реальные номинальные параметры могут не соответствовать тем, что заявлены в каталожных данных на новые двигатели. Следует отметить, что иногда в паспортах на отремонтированные высоковольтные двигатели как отечественных, так и зарубежных производителей, не содержатся даже минимально необходимые для расчётов систем управления номинальные параметры, не говоря уж о параметрах схем замещения, рабочих, пусковых и иных характеристиках.

Describes the analytical procedure for the definition of nominal parameters of high-voltage asynchronous short-circuited engines after repairs in the absence of a reliable catalogue data or lack of experimental data.

Key words: asynchronous short-circuited engine, analytical procedure, definition of parameters, equivalent circuit, vector diagram, working characteristics.

Для определения достаточно достоверных параметров асинхронных двигателей (АД) традиционно используются каталожные данные машин и данные хотя бы одной точки опыта ХХ при номинальном напряжении. Если же нет данных опыта ХХ, то их определяют косвенным путём. В статье приведена последовательность расчёта параметров электродвигателей на примере высоковольтных двигателей взрывозащищённого исполнения серии ВАО2.

Определение тока ХХ

Ток ХХ можно определить по известной формуле [1]:

$$I_0 = I_{1H} \left(\sin \varphi_H - \frac{\cos \varphi_H}{m_K + \sqrt{m_K^2 - 1}} \right),$$

где m_K – кратность максимального момента.

По этой формуле произведён расчёт тока ХХ для трёх АД и в таблице дано сравнение с данными завода-изготовителя и экспериментальными данными. Формула определения тока ХХ даёт заниженные значения тока I_0 по сравнению с экспериментальными данными

примерно на 7%. Поэтому для уточнения расчётного значения тока XX , как показывают проведённые исследования, это значение необходимо помножить на коэффициент $k=1,07$.

Сравнительные данные тока XX высоковольтных двигателей серии ВАО2 при номинальном напряжении

Тип	P_H , кВт	I_0 , А			U_H , В
		Расчёт- ные данные	Заводские данные	Эксперимен- тальные данные	
BAO2-503-1	200	7,341	7,45	7,95	6000
BAO2-450-1	250	7,64	8,03	8,10	
BAO2-400-1	400	10,3	10,7	11	

Если отсутствуют данные точки XX, то ориентировочно мощность XX можно определить по формуле $P_0 = \sqrt{3}U_{\text{н}} I_0 \cos \varphi_0$, где коэффициент мощности $\cos \varphi_0$ для высоковольтных двигателей рассматриваемой серии можно принять в пределах $\cos \varphi_0 = 0,81 \div 0,83$.

Критическое скольжение может быть рассчитано по формуле [1]:

$$S_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{S_{\text{H}} m_{\text{II}} - S_{\text{H}}}{1 - m_{\text{II}} S_{\text{H}} - 2 S_{\text{H}} (m_{\text{II}} - 1)}}$$

ИЛИ

$$S_{\text{KP}} \cong S_{\text{H}}(m_{\text{K}} + \sqrt{m_{\text{K}}^2 - 1}),$$

где $m_{\text{п}}$, $m_{\text{к}}$ – кратность пускового и максимального момента.

Определение номинального тока ротора

Для определения номинального тока $I'_{2н}$ ротора используется векторная диаграмма. Обозначения на рисунке являются общепринятыми и приведены, в частности, в [2, 3].

Активная мощность, потребляемая из сети, рассчитывается [1] по формуле

$$P'_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H}.$$

Из векторной диаграммы (рисунок) следует:

$$I'_{2H} \cos \varphi'_H = I_{1H} \cos \varphi_H - I_0 \cos \varphi_0;$$

$$I'_{2H} \sin \varphi'_H = I_{1H} \sin \varphi_H - I_0 \sin \varphi_0;$$

$$\operatorname{tg} \varphi'_H = \frac{I_{1H} \sin \varphi_H - I_0 \sin \varphi_0}{I_{1H} \cos \varphi_H - I_0 \cos \varphi_0},$$

где φ'_H угол сдвига между вектором U_H и током ротора I'_{2H} .

Ток ротора

$$I'_{2H} = \frac{I_{1H} \sin \varphi_H - I_0 \sin \varphi_0}{\sin \varphi'_H}.$$

Определение параметров АД

Из выражения максимального момента M_m [1, 2] можно определить индуктивное сопротивление X_k :

$$X_K = \sqrt{\left(\frac{3U_1^2}{2\omega_1 M_m} - r_1^2\right)^2 - r_1^2}.$$

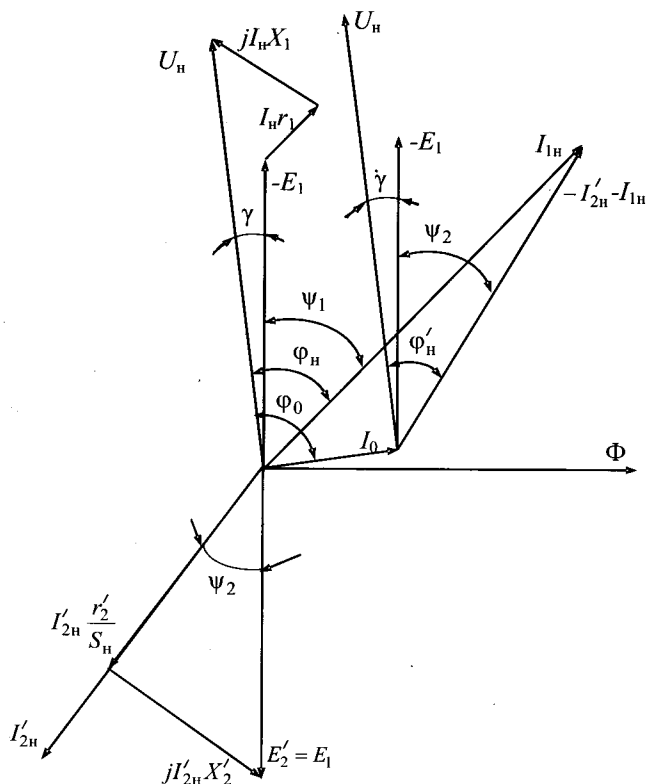
Здесь $\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$; $\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}$.

Электромагнитный номинальный момент

$$M_H = \frac{P_{\text{Mex}}}{\omega_H},$$

где $P_{\text{мех}} = P_{2\text{H}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}$.

Добавочные потери ориентировочно принимают равными $\Delta P_{\text{доб}} = 0,005 \Delta P_{\text{н}}$, а механиче-



Векторная диаграмма напряжений и токов асинхронной машины

ские потери для высоковольтных двигателей обычно составляют 1,5–2% номинальной мощности P_{2H} (предварительное значение), хотя в ряде источников механические потери рекомендуется принять равными всего 1% P_{2H} .

Тогда максимальный момент $M_m = m_k M_H$. Индуктивное сопротивление $X_k = X_1 + X_2'$. Параметры X_1 и X_2' , как правило, близки по значению, поэтому можно принять $X_1 = \frac{X_k}{2}$.

Далее по векторной диаграмме определяем угол ψ_1 и ЭДС E_1 , используя соотношения

$$E_1 \cos \psi_1 = U_H \cos \varphi_H - I_H r_1;$$

$$E_1 \sin \psi_1 = U_H \sin \varphi_H - I_H X_1;$$

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{U_H \sin \varphi_H - I_H X_1}{U_H \cos \varphi_H - I_H r_1}.$$

Тогда

$$\psi_1 = \arctg \psi_1; E_1 = \frac{U_H \cos \varphi_H - I_H r_1}{\cos \psi_1}.$$

Угол сдвига между вектором напряжения U_H и вектором $-E_1$ $\gamma = \varphi_H - \psi_1$. Тогда угол сдвига между током I_{2H}' и ЭДС E_1 равен $\psi_2 = \varphi_H' - \gamma$.

Индуктивное и активное сопротивления ротора определяются по выражениям

$$X_2' = \frac{E_2' \sin \psi_2}{I_{2H}'}; r_2' = \frac{E_2' \cos \psi_2 S_H}{I_{2H}'}, \text{ так как } E_2' = E_1.$$

Сопротивления роторной цепи r_2' и X_2' могут быть определены по алгоритму ГОСТ 7217-87 [2]. Для этого необходимы каталожные данные и данные точки XX P_0 , I_0 , U_H .

Активное сопротивление роторной цепи r_2' может быть получено также из выражения зависимости $M = f(S)$:

$$r_2' = S_H \left(\frac{3U_1^2}{2M_H \omega_1} - r_1 \right) + \sqrt{\left[S_H \left(\frac{3U_1^2}{2M_H \omega_1} - r_1 \right) \right]^2 - S_H^2 (r_1 + X_k)^2},$$

где U_1 — фазное напряжение; r_1 — активное сопротивление фазы статора.

По алгоритму [2], используя данные точки опыта XX при номинальном напряжении, определяют параметры цепи намагничивания. Но сначала необходимо определить магнитные потери.

Обычно магнитные потери в статоре определяются методом разделения потерь. Для чего снимаются точки опыта XX для различных значений напряжения, что не всегда выполнимо. Поэтому магнитные потери предлагается определять косвенным путём. Известно, что электромагнитная мощность АД

$$P_{эм} = P_{1H} - 3I_{1H}^2 r_1(75^\circ) - \Delta P_{мг},$$

откуда магнитные потери

$$\Delta P_{мг} = P_{1H} - P_{эм} - 3I_{1H}^2 r_1(75^\circ).$$

Таким образом, определив значение электромагнитной мощности $P_{эм}$, можно определить магнитные потери $\Delta P_{мг}$.

Определение электромагнитной мощности

Электромагнитная мощность может быть определена несколькими способами:

1) из выражения потерь в роторной цепи:

$$\Delta P_{эл2} = m_1 (I_{2H}')^2 r_2(75^\circ) = P_{эм} S_H,$$

откуда

$$P_{эм} = \frac{m_1 (I_{2H}')^2 r_2(75^\circ)}{S_H};$$

2) по векторной диаграмме (рисунок):

$$P_{эм} = m_1 E_1 I_{2H} \cos \psi_2,$$

по электромагнитной мощности можно определить магнитные потери $\Delta P_{мг}$, а затем уточнить механические потери

$$\Delta P_{мех} = P_0 - 3I_0^2 r_1(75^\circ) - \Delta P_{мг};$$

3) по выражению полной механической мощности:

$$P_{мех} = P_{2H} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} = P_{эм} (1 - S_H),$$

откуда

$$P_{эм} = \frac{P_{2H} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}}{(1 - S_H)}.$$

Итак, рассчитав электромагнитную мощность, определяют магнитные потери. Далее по магнитным потерям находят параметры цепи намагничивания.

Определение параметров цепи намагничивания

По известным значениям мощности XX P_0 и тока XX I_0 определяются параметры цепи намагничивания r_m , x_m и соответствующие проводимости g_m , b_m [2]:

$$\cos \psi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_H I_0}; \quad I_M = I_0 \cos \psi_0; \quad Z_0 = \frac{U_\Phi}{I_M};$$

$$r_m = \frac{\Delta P_{\text{МГ}}}{3 I_M^2}; \quad x_m = \sqrt{Z_0^2 - (r_1 + r_m)^2}; \quad g_m = \frac{r_m}{r_m^2 + x_m^2};$$

$$b_m = \frac{x_m}{r_m^2 + x_m^2}.$$

В заключении следует отметить, что, определив параметры схемы замещения, можно рассчитать рабочие, пусковые и иные характеристики и параметры высоковольтных АД, а

также использовать расчётные параметры для целей синтеза и анализа систем управления частотно-регулируемыми электроприводами, а также параметрирования частотных преобразователей.

Список литературы

1. Гольдберг О.Д., Гуринов Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001.
2. ГОСТ 7217-87 (СТ СЭВ 168-85). Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные (методы испытаний). М.: Издательство стандартов, 1987.
3. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2000.

Экспериментальное определение напряжения возникновения и гашения частичных разрядов в кабельных линиях

КОВРИГИН Л.А., БОРОННИКОВ А.А., СИДЕЛЬНИКОВ Л.Г.

Экспериментально определено системой OWTS (Oscillating Wave Test System) напряжение возникновения и гашения частичных разрядов в кабелях с полиэтиленовой, поливинилхлоридной и пропитанной бумажной изоляцией на среднее напряжение. Показано, что в более половине кабельных линий с пропитанной бумажной изоляцией наблюдаются частичные разряды.

Ключевые слова: кабельные линии, частичные разряды.

При исследовании частичных разрядов (ЧР) в изоляции считалось достаточным определения напряжения порога ионизации, так как некоторые изоляционные материалы настолько чувствительны к внутренним разрядам, что в них вообще нельзя допустить разрядов [1]. Срок службы изоляции, в которой допускаются ЧР, зависит от отношения рабочего напряжения к напряжению порога ионизации. Обычно порог ионизации определяли по возрастанию тангенса угла диэлектрических потерь [2].

В настоящее время система OWTS (Oscillating Wave Test System) позволяет определять напряжение зажигания и гашения ЧР в кабельных линиях с использованием затухающей колебательной волны. Такая волна создается путём разряда кабеля на катушку индуктивности (рис. 1).

Вначале испытуемый кабель отключается с двух сторон. Затем с одной стороны к токопроводящей жиле кабеля подключается катуш-

Experimentally determined system OWTS (Oscillating Wave Test System) inception voltage and extinction of partial discharges in cables with plastic, PVC and impregnated paper insulated medium voltage. It is shown that more than half of cable lines with impregnated paper insulation observed partial discharges.

Key words: cable lines, partial discharges.

ка индуктивности L и ЭВМ. От высоковольтного источника постоянного напряжения через ограничительное сопротивление R заряжается ёмкость кабеля C до некоторого напряжения. После замыкания высоковольтного электронного ключа K образуется контур LC , колебания в котором затухают из-за диэлектрических потерь в изоляции, активного сопротивления катушки и высоковольтного электронного ключа. Зарядное напряжение повышают

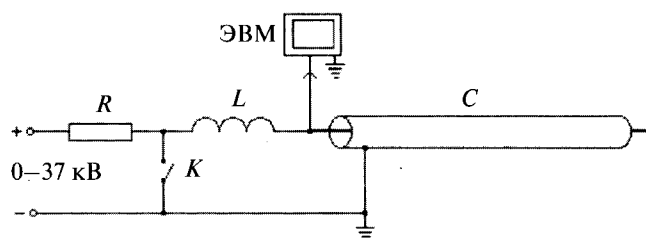


Рис. 1. Схема создания затухающей колебательной волны в кабельной линии: R — ограничительное сопротивление; K — высоковольтный электронный ключ; L — катушка индуктивности; C — ёмкость кабельной линии

на определённую ступень и повторяют измерение. При таком пошаговом повышении напряжения будет определено напряжение зажигания ЧР. Чем меньше шаг, тем точнее определяется напряжение.

Напряжение гашения ЧР определяется по другой методике. На рис. 2 показана затухающая синусоида и ЧР. В некоторый момент времени, который соответствует напряжению U_r , ЧР прекращаются. Это напряжение есть напряжение гашения ЧР.

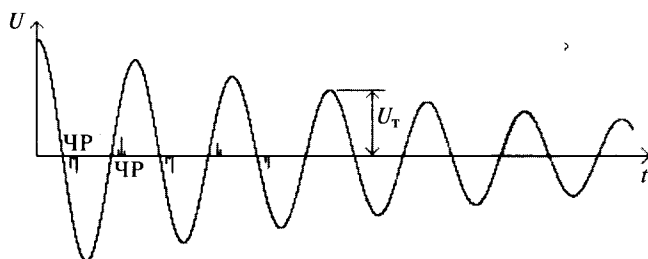


Рис. 2. Определение напряжения гашения ЧР

Многочисленные измерения системой OWTs кабельных линий в Перми и Пермском крае, позволили построить кривые вероятности возникновения и гашения ЧР. Статистическая обработка экспериментальных результатов производилась по формулам [3].

Среднее арифметическое значение \bar{x} , дисперсия D и среднее квадратичное отклонение S :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; D = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; S = \sqrt{D}, \quad (1)$$

где n — число измерений; x_i — значения измеряемых величин.

Асимметрия A и эксцесс E :

$$A = \frac{1}{S^3(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3; \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{S^4(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4.$$

Собственная дисперсия асимметрии D_A и эксцесса D_E :

$$D_A = \frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}; D_E = \frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \quad (3)$$

Было исследовано 106 трёхфазных линий (318 измерений) с кабелями с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 6 кВ (ААШв), 70 линий с кабелями с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ (ААШв, АСБ), 11 линий с кабелями с поливи-

нилхлоридной изоляцией 6 кВ (ВВГ) и 10 линий с кабелями со сшитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 35 кВ (АПВВнг). На рис. 3 представлены гистограмма и плотность распределения напряжения (амплитудные значения) возникновения и гашения ЧР в линиях с кабелями с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 6 кВ. В таблице представлены результаты статистической обработки измерений напряжения возникновения и гашения ЧР, из которой видно, что среднее значение напряжения возникновения ЧР (5,8 кВ) больше, чем среднее значение напряжения гашения ЧР (4,99 кВ). Это обусловлено тем, что в пропиточном составе в месте ЧР возникает полость, которая заполняется после разряда.

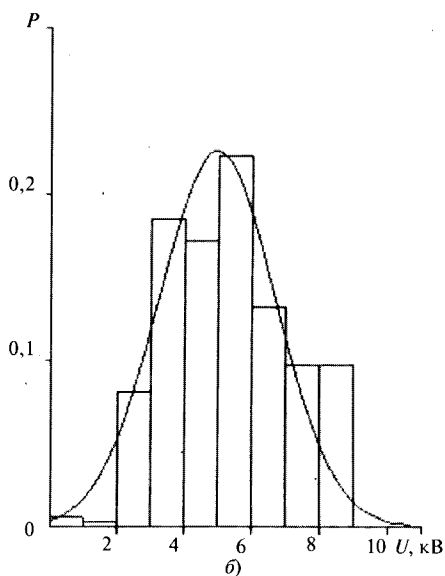
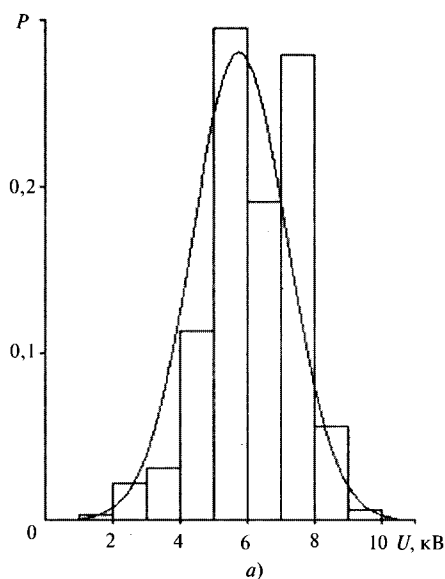


Рис. 3. Гистограмма и плотность распределения напряжения (амплитудное значение) возникновения (а) и гашения (б) ЧР в кабельных линиях на напряжение 6 кВ

Параметр	Возникнове ние ЧР	Гашение ЧР
Число измерений n	318	318
Среднее арифметическое \bar{x} , кВ	5,80	4,99
Дисперсия D	2,01	3,10
Среднее квадратичное отклонение S , кВ	1,42	1,76
Асимметрия A	0,42	-0,20
Эксцесс E	-0,11	-0,80
Собственная дисперсия асимметрии D_A	0,0185	0,0185
Собственная дисперсия эксцесса D_E	0,0720	0,0720
$3\sqrt{D_A}$	0,41	0,41
$5\sqrt{D_E}$	1,34	1,34
Нормальный закон распределения $ A < 3\sqrt{D_A}$	0,42 > 0,41; нет	0,20 < 0,41; да
Нормальный закон распределения $ E < 5\sqrt{D_E}$	0,11 < 1,34; да	0,80 < 1,34; да

Согласно критерию Чебышева можно принять гипотезу о нормальности распределения при выполнении соотношений:

$$|A| < 3\sqrt{D_A}; |E| < 5\sqrt{D_E}. \quad (4)$$

Учитывая, что $3\sqrt{D_A} = 0,41$ и $5\sqrt{D_E} = 1,34$, получим:

1) возникновение разряда $A = 0,42 > 0,41 = 3\sqrt{D_A}$ (по асимметрии закон отличается от нормального) и $E = 0,11 < 1,34 = 5\sqrt{D_E}$ (по эксцессу закон нормальный);

2) гашение разряда $A = 0,20 < 0,41 = 3\sqrt{D_A}$ (по асимметрии закон нормальный) и $E = 0,80 < 1,34 = 5\sqrt{D_E}$ (по эксцессу закон нормальный).

Отклонение закона распределения напряжения возникновения ЧР от нормального обусловлено тем, что подъём напряжения осуществляется не плавно, а ступенями через 0,5 кВ, так как при меньших ступенях резко возрастает трудоёмкость измерения. На затухающей синусоиде напряжение гашения ЧР регистрируется более чётко за одно измерение.

Для практических целей удобнее пользоваться эффективным напряжением. На рис. 4 представлена кривая распределения напряжения возникновения и гашения ЧР в кабельных линиях на напряжение 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией и 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией.

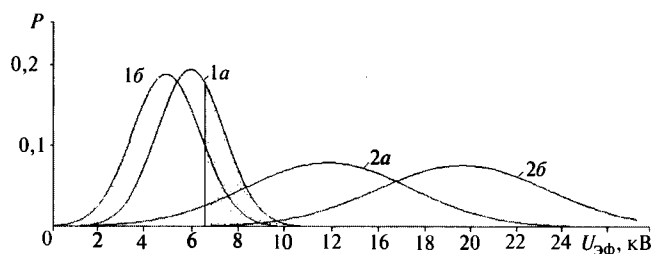


Рис. 4. Плотность распределения напряжения (действующее значение) возникновения (1а, 2а) и гашения (1б, 2б) ЧР в кабельных линиях на напряжение: 1 — 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией; 2 — 35 кВ с полиэтиленовой изоляцией

Как отмечалось выше, у кабелей с бумажной пропитанной изоляцией напряжения гашения ЧР ниже, чем напряжения возникновения ЧР; у кабелей с полиэтиленовой изоляцией наблюдается обратная зависимость: напряжение гашения ЧР выше, чем напряжение возникновения ЧР. Это обусловлено тем, что в полиэтилене, как материале, имеющем высокое удельное объёмное сопротивление, накапливаются объёмные заряды, особенно вблизи неоднородностей, что снижает напряжение на неоднородностях и, следовательно, повышает порог гашения ЧР.

Класс напряжения (U_H) — это номинальное линейное действующее напряжение на приёмнике электроэнергии. На генераторе напряжение в 1,15 выше ($U_{\text{раб max}} = 1,15U_H$ — наибольшее рабочее напряжение) за счёт падения напряжения в линии. Например, со стороны приёмника электроэнергии на изоляцию кабеля на линейное напряжение $U_L = 10$ кВ в нормальном режиме работы, т.е. без смещения нейтрали, воздействует фазное напряжение $U_\phi = 10/\sqrt{3} = 5,8$ кВ; со стороны генератора $1,15 \cdot 10/\sqrt{3} = 6,6$ кВ. В России сети от 3 до 35 кВ работают с изолированной нейтралью. В таких сетях при однофазном замыкании на землю не происходит отключение линии, так как не возникает КЗ, однако на неповреждённых фазах напряжение возрастает до линейного или, более точно, до $10 \cdot 1,15 = 11,5$ кВ. На рис. 4 заштрихованной областью показана доля кабельных линий с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ, в которых не возникают ЧР при фазном наибольшем рабочем напряжении 6,6 кВ. При однофазном замыкании на землю, когда напряжение на неповреждённых фазах возрастает до 11,5 кВ, во всех кабелях в изоляции идут процессы ионизации.

Для кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 35 кВ наибольшее рабочее действующее напряжение равно $1,15 \cdot 35 / \sqrt{3} = 23$ кВ. На рис. 4 видно, что кривая 2а лежит ниже этого предела, т.е. во всех кабелях при нормальной работе есть ЧР.

На рис. 5 представлена плотность распределения напряжения (действующее значение) возникновения и гашения ЧР в кабельных линиях на напряжение 6 кВ с поливинилхлоридной изоляцией. Так же, как и у кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, напряжение гашения ЧР ниже, чем напряжения их возникновения. Это обусловлено низким удельным объёмным сопротивлением изоляции.

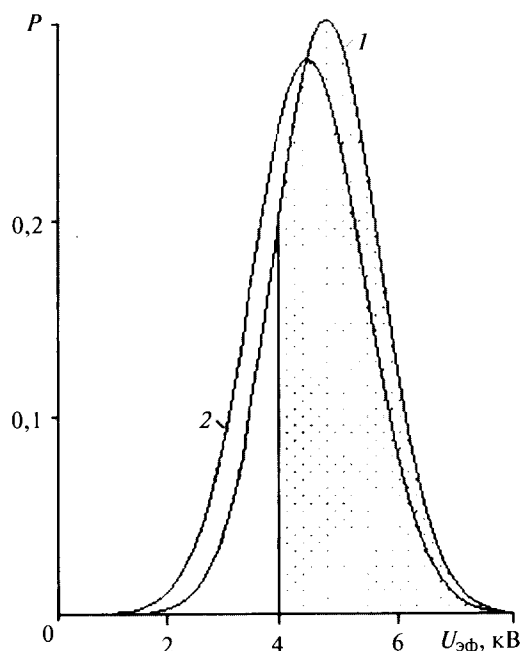


Рис. 5. Плотность распределения напряжения (действующее значение) возникновения (1) и гашения (2) ЧР в кабельных линиях на напряжение 6 кВ с поливинилхлоридной изоляцией

Разница между напряжением возникновения и гашения ЧР у кабелей с поливинилхлоридной изоляцией меньше, чем у кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, так как изоляция твёрдая и пустоты не изменяют геометрической формы.

На рис. 5 заштрихованной областью показана доля кабельных линий с поливинилхлоридной изоляцией на напряжение 6 кВ (наибольшее фазное рабочее действующее напряжение $1,15 \cdot 6 / \sqrt{3} = 4,0$ кВ), где нет ЧР. Сравнивая рис. 4 и 5, можно сделать вывод, что вероятность возникновения ЧР у кабелей с поливинилхлоридной изоляцией меньше, чем у других. Однако кабели с поливинилхлоридной изоляцией можно эксплуатировать только на напряжение до 6 кВ из-за больших диэлектрических потерь.

Выводы

1. В кабелях с пропитанной бумажной изоляцией напряжение возникновения ЧР больше, чем напряжение их гашения из-за образования полостей в пропиточном составе в месте действия ЧР. После прекращения ЧР полость заполняется пропиточным составом.

2. В кабелях с полиэтиленовой изоляцией напряжение возникновения ЧР меньше, чем напряжение их гашения за счёт поляризации диэлектрика, особенно около неоднородностей. Полиэтилен по отношению к бумажной пропитанной изоляции имеет намного большее удельное объёмное электрическое сопротивление, поэтому объёмный электрический заряд дольше сохраняется в изоляции.

3. Среди кабелей с бумажной пропитанной, поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляцией, наибольший порог возникновения ЧР имеют кабели с поливинилхлоридной изоляцией, но такие кабели можно применять на напряжение не более 6 кВ из-за больших диэлектрических потерь в изоляции.

Список литературы

1. Вайда Д. Исследование повреждений изоляции. М.: Энергия, 1968.
2. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. Л.: Энергия, 1968.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1978.

Моделирование электрической нагрузки для настройки систем управления конвертированными газотурбинными установками

КАВАЛЕРОВ Б.В., ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б.

Предложена методика моделирования электрической нагрузки при настройке систем управления энергетическими газотурбинными установками.

Ключевые слова: электрическая система, компьютерное моделирование, автоматическое управление.

Газотурбинные установки (ГТУ), создаваемые на основе серийных авиационных двигателей и предназначенные для выработки электроэнергии, называются конвертированными [1], их мощностной ряд составляет от 2,5 до 25 МВт.

Существующая технология разработки систем автоматического управления (САУ) такими ГТУ во многом наследует принципы создания САУ авиационных прототипов и в недостаточной степени учитывает особенности эксплуатации ГТУ в качестве энергопривода наземных многоагрегатных газотурбинных электростанций (ГТЭС). В настоящее время при разработке САУ широко применяется компьютерное моделирование ГТУ, однако влияние электроэнергетической системы (ЭЭС) на поведение САУ ГТУ не учитывается или учитывается приближённо. В свою очередь, при выполнении натурных испытаний ГТЭС используются стенды с ограниченной функциональностью по электрической нагрузке. Но в процессе эксплуатации на САУ ГТУ оказывают существенное влияние режимы ЭЭС, обусловленные составом, поведением и значением электрической нагрузки, характеристиками САУ электрогенераторов, изменениями в режимах работы ГТЭС и в конфигурации ЭЭС. В результате из-за недостаточной полноты и завершённости заводских испытаний существенно увеличивается объём работ по настройке и подстройке САУ при выполнении пусконаладочных операций, непосредственно предшествующих вводу таких ГТЭС в эксплуатацию, что сопряжено с повышенной трудоёмкостью, энергоёмкостью, низким качеством настройки и, как следствие, проблемами обеспечения требуемых показателей качества вырабатываемой электроэнергии.

The technique of simulation of power system loads intended for search of gas-turbine units control systems options is offered.

Key words: power system, computer simulation, automatic control.

Для устранения этого недостатка разработана методика, предусматривающая включение в технологию настройки САУ ГТУ компьютерного моделирования ЭЭС. Результаты компьютерных экспериментов на модели ЭЭС, которая является нагрузкой для ГТУ, используются при разработке, создании, доводке САУ ГТУ и при подготовке натурных испытаний.

Технология настройки САУ ГТУ

В настоящее время на предприятиях—разработчиках САУ ГТУ при создании САУ выполняются этапы работ, показанные сплошными линиями на рис. 1.

На основе результатов моделирования ГТУ с использованием полной нелинейной модели и результатов натурных испытаний производится идентификация линеаризованной модели ГТУ в виде системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Линеаризованная модель в дальнейшем используется при расчёте передаточных функций и разработке алгоритмов САУ ГТУ.

Как правило, применяя различные методы синтеза, можно получить несколько алгоритмов управления, отличающихся по своим характеристикам. Среди них необходимо выбрать наилучший, исходя из совокупности показателей качества регулирования.

Завершающим этапом проектирования является настройка (или подстройка) алгоритмов управления с учётом конкретных условий функционирования САУ при проведении компьютерных, полунатурных и натурных испытаний.

Таким образом, информация о режимах работы ЭЭС, имеющая существенное значение для синтеза и настройки САУ ГТУ, в настоящее время не используется. В связи с этим це-

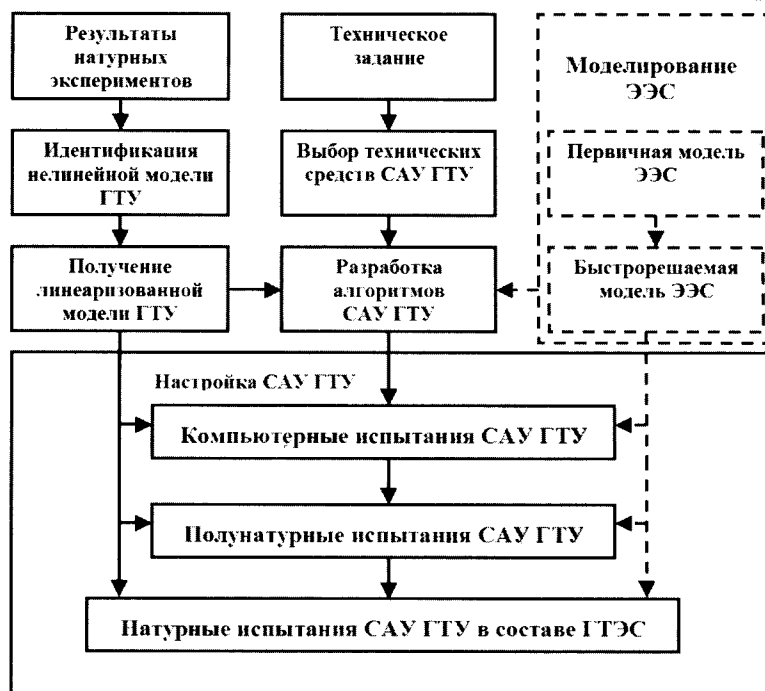


Рис. 1. Этапы разработки и настройки САУ ГТУ

лесообразно включить в технологию испытаний САУ математическую модель ЭЭС (показана на рис. 1 штриховой линией). Поскольку операции настройки требуют повышенного быстродействия от применяемых математических моделей, следует рассмотреть возможность получения вторичных быстрорешаемых моделей на основе первичных структурно-сложных моделей ЭЭС.

Спроектировать САУ – это, прежде всего, правильно выбрать алгоритм, т.е. структуру и численные значения коэффициентов алгоритма так, чтобы качество работы системы было допустимым или наилучшим. Коэффициенты алгоритма работы устройства управления (УУ), которые можно менять для достижения этой цели, называются параметрами настройки САУ, а процесс определения численных значений параметров настройки, при которых регулирование будет допустимым и в определенном смысле оптимальным, настройкой САУ.

Поясним, почему применяемые в настоящее время при настройке САУ ГТУ ступенчатые возмущения со стороны электрической нагрузки недостаточны.

Для линейных неколебательных систем в соответствии с принципом накопления возмущений в [2] показано, что наиболее опасным является ступенчатое возмущение максимально возможной амплитуды. Но уже для колебательных линейных систем наиболее тяжёлым

будет знакопеременное максимальное по модулю воздействие, мгновенно меняющее знак в моменты времени, в которые меняет знак импульсная переходная характеристика системы. По отношению же к нелинейным системам хорошая реакция на ступенчатое возмущение вовсе не гарантирует удовлетворительного поведения системы в реальных условиях работы, так как возмущения, форма которых отлична от ступенчатой, могут приводить к более существенным отклонениям управляемой величины, чем отклонения, вызванные ступенчатым возмущением. Поэтому реакция на ступенчатое возмущение практически ничего не говорит о поведении нелинейной системы [3].

ГТУ является нелинейной системой, устройство управления ГТУ также нелинейное, поскольку в нём используются нелинейные зависимости коэффициентов, различные селекторы и системы ограничителей. По этой причине при настройке САУ ГТУ необходимо исследовать характерные режимы нагрузки ГТУ, т.е. основные характерные режимы ЭЭС.

При этом предварительная настройка на компьютерной модели в дальнейшем предполагает подстройку САУ на реальном объекте. Для этого используются автоматизированные системы управления настройкой, выполняющие адаптивную настройку САУ при проведении натурных испытаний и эксплуатации [4].

На рис. 2 показано примерное соответствие между видами испытаний САУ, этапами жизненного цикла САУ и применяемыми способами настройкой САУ. Но настройка на модели может применяться не только на стадии проектных работ, но и на стадии ввода в действие, тем более что в этом случае имеется возможность получить модель экспериментально.

Подготовка и использование модели ЭЭС предусматривает следующие этапы.

1. Разработка структурно-сложной нелинейной модели ЭЭС (первичной модели).²
2. Построение по результатам расчётов на первичной модели множества упрощённых быстрорешаемых моделей.
3. Использование первичных и быстрорешаемых моделей при настройке САУ ГТУ.

Структурно-сложная модель ЭЭС

В связи с необходимостью воспроизведения всех основных характерных режимов работы ЭЭС при построении модели используются следующие принципы [5].

1. ГТЭС моделируется одновременно в составе нескольких энергоблоков для исследования взаимного влияния генераторов и САУ при различных вариантах параллельной работы.
2. ГТЭС моделируется одновременно как для автономной работы, так и для работы на мощную сеть.
3. ГТЭС моделируется совместно с электрической нагрузкой, конфигурация и состав элементов которой может изменяться произвольным образом.
4. Моделируются не только статические, но и динамические режимы работы ГТЭС.



Рис. 2. Стратификация видов испытаний и способов настройки

На рис. 3,а показан состав элементов, входящих в модель ЭЭС. Следует отметить, что САУ ГТУ и в целом электростанция формально также являются элементами ЭЭС. Однако из методологических соображений в настоящем исследовании модель ЭЭС включает генераторы электростанций, их устройства управления, устройство управления электростанцией на уровне автоматизированной системы управления (АСУ) ГТЭС и внешнюю по отношению к электростанции ЭЭС. При этом модель ЭЭС не включает ГТУ электростанции и устройства управления ГТУ. Таким образом, взаимодействие моделей при испытаниях САУ ГТУ происходит так, как показано на рис.3,б.

Модель ЭЭС является структурно-сложной моделью и, следовательно, она состоит из моделей отдельных элементов и модели взаимодействия этих элементов.

Модели структурных элементов ЭЭС, представляющие собой системы дифференциальных и алгебраических уравнений, записываются в единой обобщённой векторно-матричной форме записи:

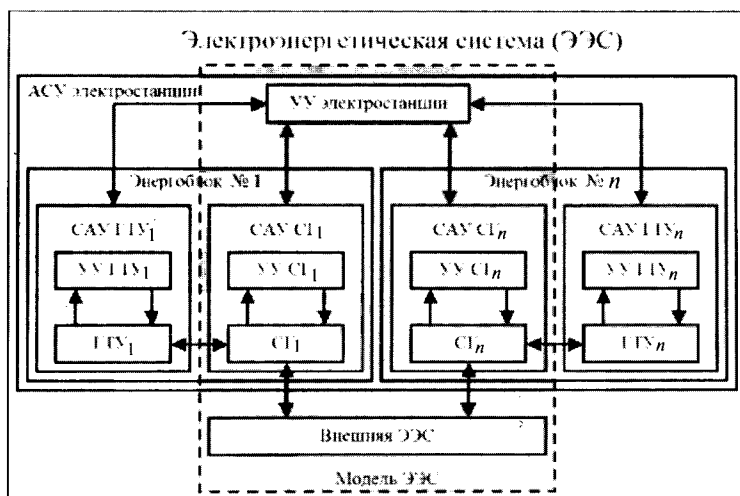
$$pI = \pm AU - BI - H, \quad (1)$$

где p — символ дифференцирования; I и U — соответственно векторы токов и напряжений; A и B — векторы параметров; H — вектор внешних воздействий на элемент со стороны, например, средств регулирования.

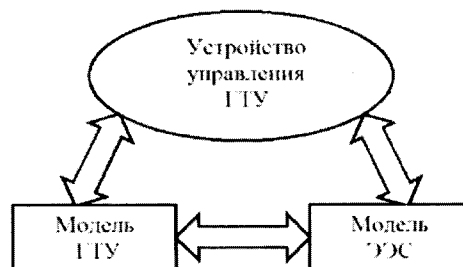
Размерность матриц определяется порядком соответствующих дифференциальных уравнений. Знак «—» соответствует случаю, когда элемент является источником тока. В общем случае исходные уравнения элемента нелинейные, при этом представление (1) есть линеаризованное уравнение для малого промежутка времени, соответствующего шагу интегрирования системы дифференциальных уравнений. Реализованы модели синхронных генераторов, синхронных и асинхронных двигателей, трансформаторов, статической нагрузки, регуляторов возбуждения генераторов других элементов, составляющих ЭЭС [6].

Взаимодействие элементов рассчитывается с помощью метода узловых потенциалов по векторно-матричному уравнению:

$$NGM^T U = -MW - pMI, \quad (2)$$



а)



б)

Рис. 3. Модель ЭЭС: а – состав модели; б – взаимодействие с моделью ГТУ и устройством управления (УУ) ГТУ при испытаниях (СГ – синхронный генератор)

где \mathbf{M} – матрица инцидентности; \mathbf{G} – матрица проводимостей элементов; \mathbf{W} – матрица, составленная из правых частей уравнений (1) и содержащая эквивалентные источники ЭДС и источники тока, действующие на i -м шаге расчёта динамики; $p\mathbf{M}$ – матрица, полученная дифференцированием матрицы \mathbf{M} ; её необходимость обусловлена тем, что все элементы моделируются во вращающейся системе координат, связанной с роторами синхронных генераторов [6].

При проведении моделирования вначале по значениям начальных токов элементов с помощью уравнения (2) рассчитываются напряжения во всех узлах расчётной схемы, затем по уравнениям отдельных элементов (1) определяются токи для следующего шага расчёта. В результате находятся переходные процессы во всех узлах и сечениях структурной схемы ЭЭС. Согласно классификации [7] данная модель относится к использующим раздельное решение и явное интегрирование дифференциальных уравнений.

Представленная структурно-сложная нелинейная модель ЭЭС разработана с применением общепринятых систем уравнений, полученных на основании известных балансовых соотношений, обусловленных физическими законами, её адекватность подтверждена воспроизводимостью результатов для характерных режимов, которые у разных моделей отличаются только из-за различной погрешности расчётов. Прогностическая адекватность модели также подтверждена по результатам серии экспериментов на реальных ГТЭС.

На основании уравнений (1) и (2) может быть произведён компьютерный эксперимент для получения динамических характеристик произвольного режима работы ЭЭС. Но, к сожалению, такие расчёты требуют больших затрат машинного времени даже для современной компьютерной техники. Так, из-за воспроизведения сверхпереходных составляющих статорных токов шаг численного интегрирования выбирается, как правило, не более 10 мкс. В результате, например, характерный переходный процесс реальной продолжительностью 1 с для системы из 6 параллельных энергоагрегатов и распределённой комплексной электрической нагрузки рассчитывается с помощью одноточечного метода Рунге-Кутты четвёртого порядка за время 14,6 мин на базе Pentium IV, 3 GHz персонального компьютера. По этой причине рассмотренную математическую модель в отдельных случаях затруднительно использовать для испытания алгоритмов и, тем более, для параметрической настройки регуляторов в ходе компьютерных и полунатурных испытаний. Настройка, в том числе автоматическая, требует многократного воспроизведения переходного процесса. Для поиска коэффициентов регуляторов применяются численные поисковые методы (симплекс-метод, покоординатный спуск, случайный поиск и др.), каждый из них требует затрат времени на эксперименты, а также последующей оценки их результатов на соответствие критериям качества. Решить данную проблему возможно методами идентификации динамических систем, с тем чтобы получить быстрорешаемые модели объектов с нормирован-

ной погрешностью. Такие модели проще всего получить за счёт идентификации по результатам моделирования на структурно-сложной модели ЭЭС, последняя при этом используется как поверочная модель для итоговой проверки алгоритмов перед натурными испытаниями.

Быстрорешаемая модель ЭЭС

На рис. 4 показана иерархия математических моделей: первичная модель (верхний уровень иерархии); быстрорешаемая модель (нижний уровень иерархии), также показаны две главные связи между моделями: идентификация и верификация.

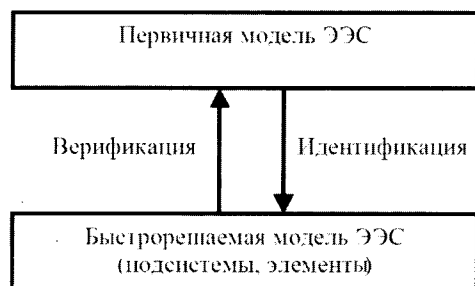


Рис. 4. Иерархия моделей

Построение и использование быстрорешаемой идентификационной модели включает следующие этапы.

1. Выбор на основе первичной модели ЭЭС набора характерных переходных процессов для заданного узла комплексной нагрузки.

2. Выбор структуры быстрорешаемой модели с учётом специфики решаемой задачи, возможности многократного её использования, реализуемости, робастности и др.

3. Выбор метода идентификации коэффициентов быстрорешаемой модели по результатам рассчитанных динамических характеристик.

4. Идентификация матрицы коэффициентов быстрорешаемой модели.

5. Верификация быстрорешаемой модели. Проверка выборочных режимов на первичной модели, определение мер адекватности.

6. Воспроизведение на быстрорешаемой модели заданных динамических характеристик.

7. Решение задач испытания и настройки на основе быстрорешаемой модели.

8. Перенос решения с быстрорешаемой модели на первичную модель.

9. Оценка на первичной модели эффективности быстрорешаемой модели и при необходимости коррекция быстрорешаемой модели.

Для получения матрицы параметров быстрорешаемой модели используется метод наименьших квадратов:

$$A = Y_{\Sigma} X_{\Sigma}^T (X_{\Sigma} X_{\Sigma}^T)^{-1}, \quad (3)$$

где Y_{Σ} — вектор выходных переменных; X_{Σ} — вектор входных переменных; A — матрица коэффициентов размерностью $n \times n$, которую следует идентифицировать; символ Σ означает, что в общем случае число измерений векторов входа и выхода может быть больше n .

Мерой адекватности служит средняя квадратичная ошибка или коэффициент несовпадения Тейла. В задачах анализа электрических процессов допустимая погрешность модели определяется погрешностью измерительных приборов, при этом модель, как правило, должна иметь погрешность не более 2%. Максимально допустимое значение критерия Тейла, исходя из поставленной задачи, должно быть не более 0,1. Для контроля адекватности вводится система ограничений на точность быстрорешаемой модели

$$\varepsilon_i \leq \varepsilon_i^*, \quad i=1, \dots, n, \quad (4)$$

где ε_i — i -я мера адекватности; ε_i^* — контрольный показатель по i -й мере адекватности; n — число мер адекватности.

Но поскольку модель (3) сохраняет адекватность (из условия допустимого ε) в ограниченной области отклонений переменных, система ограничений (4) дополняется системой ограничений на область допустимых по условиям адекватности отклонений переменных модели при испытании и настройке средств управления. В том случае, если для выбранной модели заданные ограничения не выполняются, следует выбрать более сложную структуру быстрорешаемой модели.

На рис. 5 в качестве примера представлены результаты пуска соизмеримого по мощности ненагруженного асинхронного двигателя: a — при настройке с использованием быстрорешаемой модели ЭЭС, воспроизводящей пуск соизмеримого асинхронного двигателя; b — при использовании традиционной схемы настройки (наброс ступенчатой номинальной нагрузки) [8].

За счёт учёта особенностей поведения электрической нагрузки максимальное отклонение частоты вращения снизилось почти на 15%, время восстановления частоты вращения с

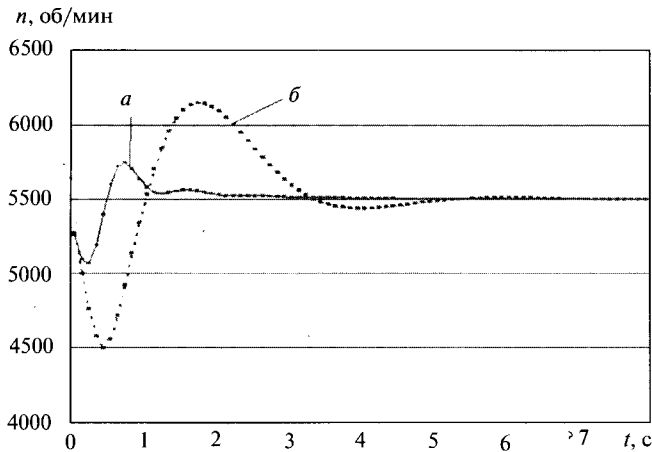


Рис. 5. Переходный процесс по частоте вращения силовой турбины ГТУ

точностью 0,5% сократилось более чем в 2 раза.

Вывод

Использование разработанной методики моделирования электрической нагрузки при настройке систем управления газотурбинными установками позволяет снизить трудоёмкость

и энергоёмкость пуско-наладочных работ и вместе с тем открывает возможности улучшения эксплуатационных характеристик ГТЭС, создаваемых на основе конвертированных авиационных двигателей.

Список литературы

1. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. и др. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. Самара: СНЦ РАН, 2004.
2. Булгаков Б.В. Колебания. М.:ГИИТЛ, 1954.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. М.:Изд-во МЭИ, 2005.
4. Автоматизация настройки систем управления/ В.Я. Ротач, В.Ф. Кузичин, А.С. Ключев и др. Под ред. В.Я. Ротача. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций// Электричество. 2007. № 3. С. 2—7.
6. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б., Сапунков М.Л. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем. Пермь: Изд-во Перм. ГТУ, 2010.
7. Kundur P. Power system stability and control. New York, McGraw-Hill, 1994.
8. Полулях А.И., Лисовин И.Г., Кавалеров Б.В., Шигапов А.А. Автоматизация настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций при компьютерных испытаниях//Автоматизация в промышленности. 2011. №6. С.14—17.

Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в кабельном канале

ЩЕРБИНИН А.Г., ТРУФАНОВА Н.М., НАВАЛИХИНА Е.Ю., САВЧЕНКО В.Г.

Построена математическая модель с использованием программного комплекса ANSYS тепловых процессов силовых кабелей, проложенных в кабельном канале, расположенном в земле и заполненном воздухом, учитывающая естественную конвекцию и тепловое излучение внутри канала. Определены эксплуатационные характеристики кабелей.

Ключевые слова: кабельная линия, кабельный канал, эксплуатационная характеристика кабеля, токовая нагрузка, температурное поле, рабочая температура кабеля.

Прокладка силовых кабелей может производиться в земле, туннелях, кабельных каналах, производственных помещениях и т.д. Номинальная токовая нагрузка кабелей в каждом случае будет зависеть от большого числа факторов: геометрических параметров, теплофизических характеристик окружающей среды, условий теплообмена и многих других. В статье

A mathematical model, using the software package ANSYS thermal processes of power cables in the cable channel, which is located in the ground and filled with air, taking into account the natural convection and thermal radiation within the channel. Determine by the performance of cables.

Key words: cable line, cable channel, performance cable, current loading, temperature field, working temperature of a cable.

предлагается подход к определению эксплуатационных характеристик силовых кабелей на напряжение 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенных в кабельном канале, расположенном в земле.

Кабельный канал представляет собой железобетонный короб с толщиной стенок 120 мм и внутренними размерами 1600×1600 мм

(рис. 1). С левой и правой сторон кабельного канала имеются горизонтально расположенные полки, на которые укладываются кабели. Количество полок на каждой стороне равно восьми.

Кабельная линия организована либо тремя одножильными кабелями с круглыми жилами (рис. 2, б), либо — одним трёхжильным кабелем с секторными жилами (рис. 2, а) марки АПвП на номинальное переменное напряжение 10 кВ частотой 50 Гц с алюминиевой многопроволочной уплотнённой токопроводящей жилой сечением 240 мм² и изоляцией из сшитого полиэтилена. На одну полку может быть уложена либо одна линия, сформированная из трёх одножильных кабелей с круглыми жилами, либо две линии, сформированные из трёхжильных кабелей с секторными жилами. Кабельный канал расположен в земле на глубине 1-го м от поверхности. Внутри канала воздух.

Решение задачи определения эксплуатационных характеристик кабелей проведём с учётом естественной конвекции воздуха в кабельном канале и теплообмена излучением.

Сделаем следующие допущения: задача стационарная двухмерная; симметричная относительно оси 0у; воздушная среда несжимаема. В канале реализуется ламинарный режим движения воздуха [1].

Математическая модель движения и теплообмена воздуха в канале основывается на законах сохранения массы, количества движения

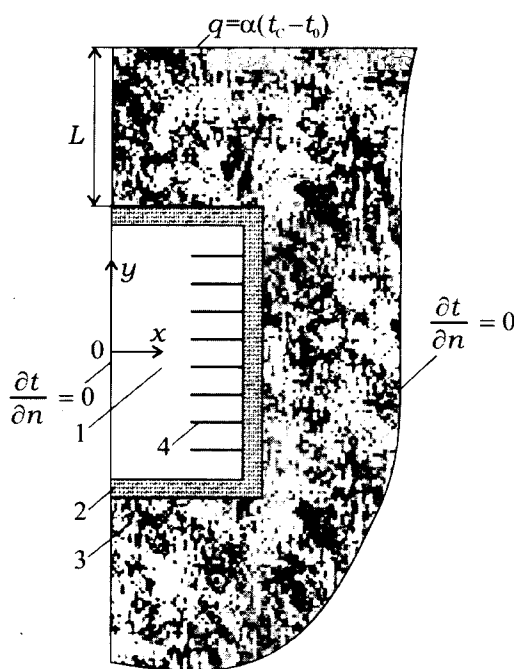


Рис. 1. Схема кабельного канала, проложенного в земле: 1 — воздушная среда внутри канала; 2 — железобетонный короб; 3 — массив земли; 4 — полка для укладки кабеля

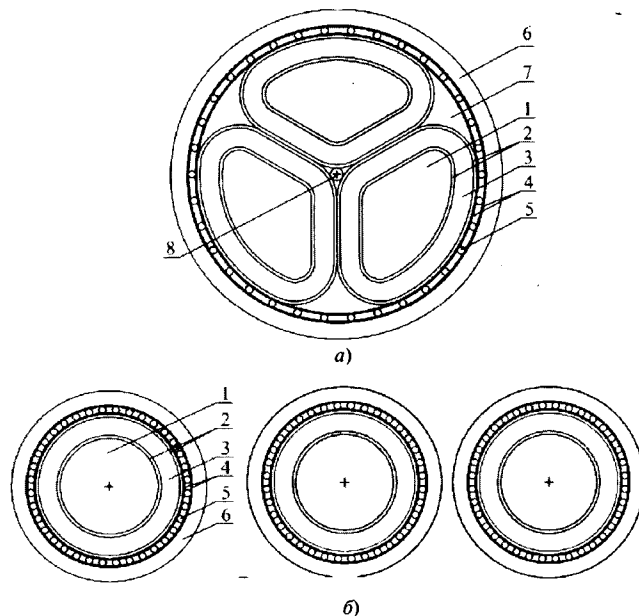


Рис. 2. Кабели марки АПвП на напряжение 10 кВ: а — трёхжильный с секторными жилами; б — три одножильных в горизонтальной плоскости; 1 — токопроводящая жила; 2 — два слоя экрана из полупроводящего вулканизированного полиэтилена; 3 — изоляция из вулканизированного полиэтилена; 4 — обмотка из нетканого полотна; 5 — экран из медных проволок; 6 — полиэтиленовая оболочка; 7 — межфазное заполнение; 8 — дренажный проводник из меди

и энергии [2]. Определяющие уравнения, описывающие процессы тепломассообмена для ламинарного несжимаемого воздушного потока в условиях естественной конвекции:

— уравнения движения

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial U_x}{\partial y} \right); \quad (1)$$

$$U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{g}{\rho}; \quad (2)$$

— уравнение неразрывности для несжимаемой среды

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

— уравнение энергии

$$\rho c_p \left(U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad (4)$$

где x, y — декартовы координаты; U_x, U_y — компоненты вектора скорости воздуха в канале; P — отклонение давления воздуха от гидростатического; t — температура, °С; c_p — удельная теплоёмкость воздуха ($c_p = 1,005$ кДж/(кг·°С)); g — ускорение свободного падения ($g = 9,8$ м/с²); ρ —

плотность воздуха ($\rho = 1,2696 \div 0,0034t$ кг/м³); λ — коэффициент теплопроводности ($\lambda = 0,0242$ Вт/(м·°C)); η — кинематическая вязкость, $\eta = \frac{\mu}{\rho}$; μ — коэффициент динамической вязкости ($\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5}$ Па·с) [3].

На границах канала и на поверхности кабелей задаётся условие непроницаемости и прилипания:

$$U_x|_G = 0; U_y|_G = 0. \quad (5)$$

Здесь G — граница.

Конвективный теплообмен между кабелями и стенками железобетонного короба дополняется теплообменом излучением. Воздух считается прозрачной средой, не поглощающей тепловое излучение, а граничные поверхности, участвующие в теплообмене — серые поверхности. Сегментация границ порождается заданной сеточной моделью расчётной области. Угловые коэффициенты сегментов рассчитываются по методу натянутых нитей [4].

Расчёт суммарной плотности радиационного потока на поверхностях выполняется матричным методом [4]. Плотность эффективного излучения i -го сегмента поверхности определяется по формуле [4]:

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) F_{i-j} J_j, \quad (6)$$

где J_j — излучение сегмента j , Вт/м²; F_{i-j} — угловой коэффициент от поверхности i к поверхности j ; ε_i — степень черноты поверхности i ; T_i — температура i -го сегмента поверхности, К; σ — постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Первый член правой части представляет собственное излучение сегмента, а второй — отражённое вследствие его облучённости от всех других сегментов. Для N сегментов, участвующих в теплообмене, получаем систему N линейных уравнений для N неизвестных J_i , которые определяются из решения этой системы уравнений. Суммарная плотность радиационного потока на любом сегменте поверхности i есть разность между излучённой энергией и потоком падающей лучистой энергии и может быть выражена как

$$q_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i \sum_j F_{i-j} J_j. \quad (7)$$

Плотность радиационного потока рассчитывается по уравнению (7) с помощью итера-

ционной процедуры с использованием значений J_i , полученных из системы уравнений (6), и линеаризованных членов T_i^4 , ограниченных первыми двумя членами его разложения в ряд Тейлора относительно $T_i|_k$:

$$T_i^4 = 4(T_i|_k)^3 T_i|_k^{k+1} - 3(T_i|_k)^4, \quad (8)$$

где $T_i|_k$ — температура сегмента поверхности из предыдущей итерации k .

Задача конвективного теплообмена воздуха в кабельном канале решается совместно с задачей теплопроводности в кабелях, железобетонном коробе и в массиве земли. Температурное поле в твёрдых элементах определяется из решения дифференциального уравнения теплопроводности [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_V = 0. \quad (9)$$

На границах раздела сред задаётся условие идеального контакта при равенстве тепловых потоков

$$q_{i-1}|_n = q_i|_n, \quad (10)$$

где n — нормаль к границе раздела.

На поверхности земли задано граничное условие третьего рода: коэффициент теплоотдачи с поверхности земли $\alpha = 10$ Вт/(м²·°C) [5], а температура окружающей среды $t_0 = 15$ °C. На двух других границах заданы адиабатические условия теплообмена (см. рис.1).

Источниками тепла в рассматриваемых кабельных линиях являются токопроводящие жилы и медные экраны, по которым протекает ток.

Мощность внутренних источников тепла в токопроводящей жиле

$$q_{Vж} = I_{ж}^2 R_{ж} / F_{ж}, \quad (11)$$

где $I_{ж}$ — ток жилы, А; $R_{ж}$ — электрическое сопротивление токопроводящей жилы, Ом/м; $F_{ж}$ — площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, м².

В трёхфазной линии, организованной из трёх одножильных кабелей, тепловые потери в экране рассчитываются через тепловые потери в жиле [6]:

$$q_{Vэ} = y_э I_{ж}^2 R_{ж} / F_{э}, \quad (12)$$

где F_3 – площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, м^2 ; y_3 – коэффициент, рассчитываемый по ГОСТ Р МЭК 60287 [6].

При заданных условиях для горизонтально расположенных одножильных кабелей с регулярной транспозицией $y_3 = 0,184$ [6].

Суммарная мощность тепловыделения подбиралась по максимально допустимой температуре полиэтиленовой оболочки, равной 65°C .

Поставленная задача решалась численно в среде инженерных расчётов Fluent. Для построения геометрической модели и разбиения её на конечные элементы использовался препроцессор ICEM CFD. Указанные программные продукты являются частью пакета ANSYS 12. Они позволяют рассчитывать температурные поля с учётом естественного конвективного движения воздуха и энергии излучения внутри кабельного канала, а также достаточно наглядно представлять эти результаты в виде набора температурных полей, графиков и траекторий движения потоков воздуха.

В таблице приведены результаты расчётов, полученные с помощью модели, учитывающей конвективный теплообмен и теплообмен излучением.

Из таблицы видно, что суммарная передаваемая мощность в кабельном канале по 16 линиям, сформированным из кабелей с 3 жилами секторной формы (41,0 МВА), на 11% больше, чем для 16 кабельных линий, сформированных из одножильных кабелей (36,9 МВА).

Представленная модель позволяет получить температуру в каждой точке исследуемой области. Наибольший интерес представляет температурное поле в канале. На рис. 3 приведена картина температурного поля в канале для варианта с 32 кабелями (линиями) с секторными жилами.

По полученным температурным полям можно определить кабели, которые находятся в более жёстких температурных условиях. Из рис.3 видно, что кабели, расположенные бли-

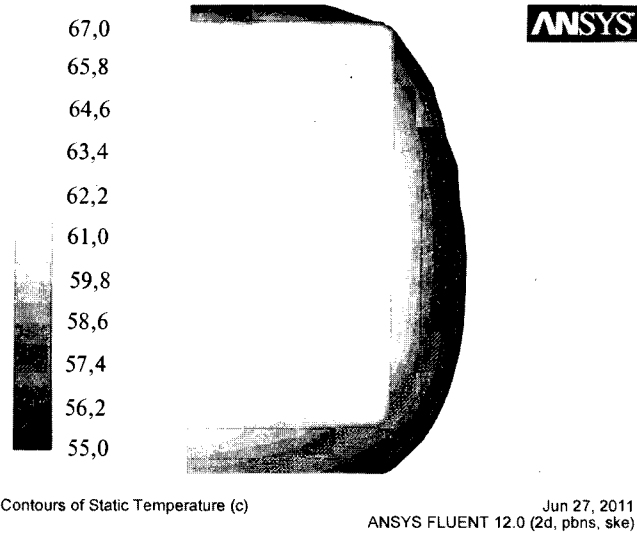


Рис. 3. Температурное поле в кабельном канале

же к центральной области канала, более нагреты, чем кабели на периферии. Результаты вычислений показывают, что основной причиной такого распределения температуры кабелей в канале является теплообмен излучением. Максимальная разница по температуре токопроводящих жил в канале достигает 3°C . Этот факт необходимо учитывать при выборе распределения нагружения кабельных линий в канале.

Из рис. 3 видно также, что воздушная масса в нижней части канала имеет температуру на $2\text{--}3^\circ\text{C}$ меньшую, чем в среднем по каналу. В целом температурное поле в канале достаточно однородное и только в приграничной к стенкам железобетонного короба области, так называемом пограничном тепловом слое, наблюдаются большие градиенты температур. Такое перераспределение температурного поля можно объяснить достаточно интенсивным перемешиванием массы воздуха за счёт естественной его конвекции.

На рис. 4 представлена трассировка движения потока воздуха на примере канала с 32 кабелями (линиями) с секторными жилами с цветовой градацией по модулю скорости. На

Эксплуатационные характеристики кабельных линий

Эксплуатационные характеристики	Количество кабельных линий			
	Круглые жилы		Секторные жилы	
	8	16	16	32
Рабочий ток, А	191,2	133,2	147,9	105,9
Суммарная мощность тепловыделения, Вт/м	153,0	148,0	151,4	154,4
Суммарная передаваемая мощность, МВА	26,5	36,9	41,0	58,7

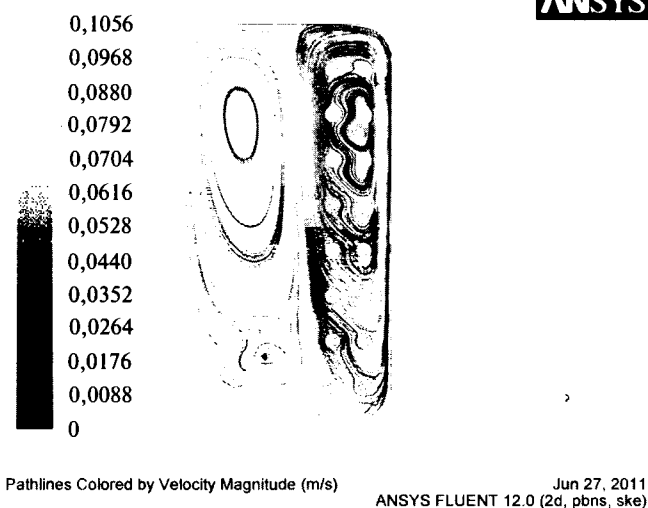


Рис. 4. Трассировка движения потока воздуха

рис. 4 видно два больших вихря: первый в области слева от кабелей; второй, охватывающий кабельные линии с небольшими локальными завихрениями. Источниковыми силами движения воздушных масс являются горячие поверхности кабелей.

Программный комплекс ANSYS (ICEM CFD и Fluent) позволяет также получить распределение других скалярных и векторных величин (например, распределение плотности воздуха, скорости, вязкости, давления, касательных напряжений на стенках и т.д.). Для удобного и наглядного представления направ-

ления и скорости движения воздушных потоков результаты могут быть визуализированы при помощи анимации. С помощью данной системы можно определить коэффициенты теплоотдачи и плотности тепловых потоков излучения с поверхности кабелей и стенки канала.

При этом существует возможность в широких пределах изменять условия задачи (конструкции и количество кабелей, размеры канала, его форма, используемые материалы, условия теплообмена с окружающей средой и т.д.). Также есть возможность дополнить задачу условиями принудительного (естественного или искусственного) охлаждения. Всё это позволит оперативно оценить максимальную пропускную способность кабельных линий по заданным условиям, спроектировать новую линию «с нуля» или модернизировать старую.

Список литературы

1. Yang Liu. Coupled conduction-convection PROBLEM for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. 2000. Vol. 1, no. 2. 187-206 Imperial College Press.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
4. Крейт Ф., Блейк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975.
6. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 1-1. Уравнение для расчета номинальной токовой нагрузки (100%-й коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения.

Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов

ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б., БОЧКАРЁВ С.В., РОМОДИН А.В., ЕЛТЫШЕВ Д.К.

Рассматриваются вопросы применения теории марковских процессов для планирования и управления процессом эксплуатации электротехнического оборудования при использовании стратегии обслуживания по техническому состоянию. Описываются методы определения показателей эффективности процесса эксплуатации и ставится задача его оптимизации по выбранному критерию.

Ключевые слова: электротехническое оборудование, эксплуатация, марковский процесс, техническое обслуживание, надёжность.

Эксплуатация электроэнергетических объектов — непрерывный процесс, требующий планового и регулярного контроля и воздей-

Questions of application of markovian processes theory for planning and management of the electrotechnical equipment operational process at use of the technical conditions maintenance strategy are considered. Methods of definition of the operational process efficiency indicators are described and the problem of its optimization by criteria set is posed.

Key words: electrotechnical equipment, operational, markovian process, maintenance, reliability.

ствия на объект в целом или на его составляющие и элементы, что должно обеспечивать исправное состояние и безаварийную работу

объекта, а также высокий уровень его эксплуатационной надёжности при надлежащей экономичности.

Эксплуатационная надёжность электроэнергетических объектов и входящего в их состав электротехнического оборудования (ЭО) может быть обеспечена при решении двух основных задач [1]: обеспечение нормальных режимов работы элементов и объекта в целом; прогнозирование индивидуального ресурса и назначение оптимальных регламентов эксплуатации. Решение второй задачи включает выбор оптимальной системы обслуживания, разработку системы контроля, диагностики, сбора, обработки и анализа информации о качестве функционирования, принятие оптимальных с точки зрения технико-экономических критериев различных этапов эксплуатации, повышение качества восстановления. В связи с этим, для обеспечения заданного уровня надёжности и управления техническим состоянием (ТС) электроэнергетического объекта, что является весьма актуальной и значимой задачей, необходимо грамотно спланировать и организовать весь процесс технической эксплуатации и обеспечить целесообразную систему ремонтов в течение всего срока эксплуатации [1–3].

Построение модели ПЭ ЭО

В современных условиях при организации систем технической эксплуатации ЭО наибольшее внимание уделяется переходу к стратегии обслуживания по техническому состоянию (ТОС), которая заключается в том, что все виды и сроки ремонта устанавливаются в зависимости от ТС объекта, определяемого во время проведения периодического контроля или технического обслуживания (ТО) [1,4].

Поскольку в общем случае в процессе эксплуатации (ПЭ) ЭО имеет конечное (или счётное) множество возможных состояний, а сам процесс функционирования можно представить как переходы из состояния в состояние, то для решения задач моделирования и планирования процесса эксплуатации целесообразно применить аппарат теории марковских процессов (МП) с дискретными состояниями, который к данному моменту хорошо развит, позволяет решать целый ряд прикладных задач, сочетает в себе достаточную простоту и лёгкость формализации для ЭВМ с приемлемой адекватностью реальному процессу [5,6]. В большинстве задач практического

характера использование марковской аппроксимации приводит к получению решений с погрешностью в пределах точности исходных данных и в большинстве случаев не превышает 3–5% [1,6].

При таком подходе решение задач планирования и оптимизации ПЭ ЭО включает построение графа состояний, составление модели надёжности и определение характеристик ТО. При этом обычно рассматриваются установившиеся режимы и, соответственно, стационарные модели надёжности и финальные значения вероятностей нахождения объекта в каждом из состояний [1,5].

При построении моделей функционирования систем с различными видами ТО можно выделить ряд характерных групп потоков (переходов из одного состояния в другое) [1,3,7]: возникновение отказов и неисправностей, устранение отказов и неисправностей, вывод объекта на различные виды ТО, вывод из состояний проведения ТО.

В общем случае при планировании и оптимизации ПЭ исходная информация может быть задана в виде функции вероятности безотказной работы $P(t)$ или отказа $Q(t)$, плотности распределения наработки на отказ $f(t)$ или интенсивности отказов $\lambda(t)$ [1,6].

Структурная модель ПЭ ЭО как марковского процесса (рис. 1) представляется в виде ориентированного графа Γ , имеющего конечное число вершин N , характеризующих пространство состояний эксплуатации X , и совокупности вероятностей перехода $P_{ij}(t)$ из состояния i в состояние j ($i, j \in X, t \geq 0$).

Пространство состояний модели включает: X_1 – работоспособное состояние (1); X_2 – периодический контроль состояния (2) (с целью обнаружения предотказного состояния); X_3 – состояние «аварийного» восстановления (4); X_4 – состояние профилактического восстановления (3).

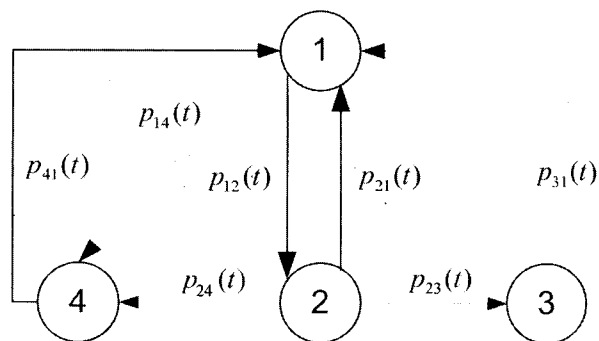


Рис. 1. Структурная модель ПЭ ЭО при использовании стратегии ТОС

В качестве основных показателей, характеризующих эффективность технической эксплуатации ЭО целесообразно использовать среднее время пребывания в различных состояниях t_i , коэффициент готовности K_r (или коэффициент технического использования) и средние затраты на техническую эксплуатацию g [1,5].

Значения показателей эффективности ПЭ ЭО определяются в соответствии со следующими выражениями [1,2,5]:

$$K_r = \sum_{i \in X_p} P_i, \quad (1)$$

где P_i — стационарные вероятности нахождения ЭО во всех работоспособных состояниях;

$$g = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^X p_{ij} Z_{ij} P_j, \quad (2)$$

где p_{ij} — вероятность перехода из i -го состояния в j -е за неограниченное время; P_j — стационарные (финальные) вероятности состояний; Z_{ij} — затраты ресурсов на переход процесса из i -го состояния в j -е; Z_{ii} — затраты ресурсов в единицу времени на пребывание процесса в i -м состоянии.

Вероятности P_j и p_{ij} связаны системой уравнений:

$$P_j = \sum_{i=1}^X p_{ij} P_i; \quad \sum_{i=1}^X P_j = 1, \quad \sum_{i=1}^X p_{ij} = 1. \quad (3)$$

Поскольку в общем случае для электроэнергетических систем моменты переходов оборудования из состояния в состояние заранее неизвестны и переходы из состояния в состояние (например, отказы элементов или окончание их восстановления и т.д.) возможны в случайные моменты времени, то для получения некоторых характеристик таких систем удобно воспользоваться свойствами МП с непрерывным временем, которые имеют достаточно широкий круг инженерных приложений, используя зависимости, характеризующие полумарковские процессы [1,2,5,8].

С учётом сказанного, в представленной на рис. 1 модели возможны переходы следующих видов:

- из состояния 1 в состояние 2 с периодичностью t_k (соответственно, интенсивность перехода $\lambda_{12} = 1/t_k$);
- из состояния 1 в состояние 4 с интенсивностью переходов, равной интенсивности отказов оборудования ($\lambda_{14} = \lambda$);

— из состояния 2 в состояние 1 с интенсивностью, которая определяется продолжительностью контроля τ_k ($\lambda_{21} = 1/\tau_k$);

— из состояния 2 в состояние аварийного восстановления 4 (переход, обусловленный обнаружением отказа при периодическом контроле) с интенсивностью перехода λ_{24} ;

— из состояния 2 в состояние 3 с интенсивностью перехода λ_{23} ;

— из состояния 3 в работоспособное состояние 1 с интенсивностью, которая определяется продолжительностью ремонтных работ $\tau_{п.в}$ ($\lambda_{31} = 1/\tau_{п.в}$);

— из состояния 4 в состояние 1 с интенсивностью, которая определяется продолжительностью ремонтных работ $\tau_{а.в}$ ($\lambda_{41} = 1/\tau_{а.в}$).

Параметры t_k , τ_k , $\tau_{п.в}$, $\tau_{а.в}$, λ и, соответственно, интенсивности переходов λ_{12} , λ_{21} , λ_{31} , λ_{41} , λ_{14} могут быть получены по результатам экспериментальных исследований или испытаний, или задаются регламентом технического обслуживания и при построении модели их можно считать известными. Интенсивности λ_{23} и λ_{24} также могут быть определены на основе статистических данных, по результатам экспериментальных исследований или с использованием свойств МП с непрерывным временем [1,8].

Система дифференциальных уравнений для ориентированного графа состояний (рис. 1) имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{14})P_1(t) + \lambda_{41}P_4(t) + \lambda_{31}P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = -\lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{23}P_2(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = -\lambda_{41}P_4(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{14}P_1(t). \end{cases} \quad (4)$$

Данную систему необходимо дополнить нормирующим условием

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1 \quad (5)$$

и начальными условиями, например

$$P_1(0) = 1; \quad P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0. \quad (6)$$

Для установившегося (стационарного) режима (при $t \rightarrow \infty$) и, соответственно, финальных вероятностей (с целью определения обобщённых характеристик модели) система

дифференциальных уравнений (4) превращается в систему линейных уравнений вида

$$\begin{cases} -(\lambda_{12} + \lambda_{14})P_1 + \lambda_{41}P_4 + \lambda_{31}P_3 = 0; \\ -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_2 + \lambda_{12}P_1 = 0; \\ -\lambda_{31}P_3 + \lambda_{23}P_2 = 0; \\ -\lambda_{41}P_4 + \lambda_{24}P_2 + \lambda_{14}P_1 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решая систему с учётом (5) и (6), можно получить выражение $P_{1,2} = P_1 + P_2$, которое соответствует вероятности работоспособного состояния ЭО (при контроле без отключения) и, согласно (1), определяет коэффициент готовности:

$$P_{1,2} = \frac{\lambda_{12} + \lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}}{\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}} \times \left[1 + \frac{\lambda_{12}\lambda_{41}(\lambda_{31} + \lambda_{23}) + \lambda_{31}[\lambda_{24}\lambda_{12} + \lambda_{14}(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})]}{\lambda_{31}\lambda_{41}(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})} \right]^{-1} \quad (8)$$

Зависимость вероятности работоспособного состояния от периодичности контроля состояния t_k при различных значениях интенсивности отказов λ и длительности контроля τ_k представлена на рис. 2. Данная зависимость показывает, что существует оптимальный регламент технической эксплуатации и, соответственно, предельное максимальное значение коэффициента готовности объекта, и позволяет планировать и управлять сроками проведения необходимых работ в ПЭ ЭО в зависимости от конкретной постановки задачи.

На основе полученной зависимости (8) можно сделать следующие выводы:

– наибольшее влияние на значение коэффициента готовности объекта оказывают ин-

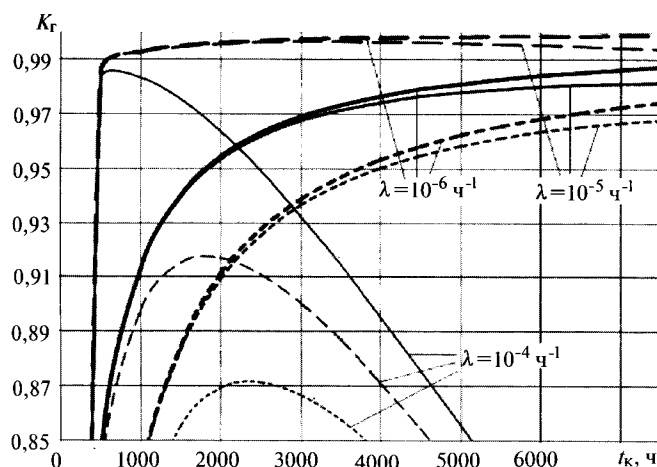


Рис. 2. Зависимость вероятности работоспособного состояния ЭО от периодичности контроля состояния: — — — $\tau_k = 10$ ч; — — — $\tau_k = 100$ ч; — — — $\tau_k = 200$ ч

тенсивность отказов λ и периодичность контроля состояния t_k ;

– максимум значения коэффициента готовности с уменьшением λ смещается в сторону больших значений периодичности контроля состояния t_k (при $\lambda = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ он соответствует значению $t_k = 1000$ ч, при $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ — 5000 ч), при этом график зависимости становится более пологим;

– оптимальная периодичность технического обслуживания t_k пропорциональна увеличению его продолжительности τ_k (например, для $\lambda = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ увеличение τ_k с 10 до 100 ч приводит к увеличению оптимальной периодичности технического обслуживания с 700 до 1800 ч, при этом максимальное значение коэффициента готовности снижается на 6%);

– отклонения периодичности технического обслуживания от оптимального значения существенно снижают вероятность готовности объекта, особенно при больших значениях интенсивности отказов (например, для $\lambda = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ и заданной продолжительности контроля $\tau_k = 100$ ч уменьшение t_k с 1800 до 1000 ч снижает значение коэффициента готовности примерно на 2%, увеличение до 2500 ч — на 1%).

Используя полученные путём решения (7) значения вероятностей P_j и определяемые из системы уравнений (3) оставшиеся неизвестные значения вероятностей p_{ij} с учётом известных затрат Z_{ij} , можно осуществить поиск оптимальных параметров ПЭ ЭО (системы ТО) путём решения одной из двух задач [1,2,5]:

– обеспечение требуемого уровня надёжности (т.е. значения показателя надёжности, в частности коэффициента готовности) при минимальных потерях и затратах на ТО (прямая задача оптимизации);

– обеспечение максимального из возможных уровня надёжности при ограниченных потерях и затратах (обратная задача оптимизации).

Поскольку электроэнергетические объекты (и входящее в их состав ЭО, соответственно) относятся к классу сложных и дорогостоящих технических объектов, отказ или снижение работоспособности которых ниже допустимого уровня может привести к серьезным последствиям, показатели надёжности, как более важные характеристики, обычно рассматриваются в качестве ограничений, а затраты, как менее важные, — в качестве целевой функции оптимизации [1,5]. Поэтому в большинстве случаев

целесообразно решать прямую задачу оптимизации [1,2,5], которая с учётом выражений (1) и (2) будет выглядеть следующим образом:

$$\min\{g\} \text{ при } K_r \geq K_r^*, \quad (9)$$

где K_r^* – требуемое значение показателя эффективности.

Выводы

1. Для решения задач планирования ПЭ ЭО целесообразно применять аппарат теории марковских процессов, который позволяет по модели рассматриваемого процесса рассчитать соответствующие показатели эффективности на основании статистических данных и экспериментальных исследований и может быть использован для поиска оптимальных параметров управления ПЭ ЭО с учётом выбранного критерия.

2. В целом конкретная постановка задачи оптимизации ПЭ определяется видом и сложностью объекта, характером и важностью выполняемых функций, числом и видом возможных состояний, а также стратегией его ТО. Сложность решения задачи оптимизации зависит, в первую очередь, от сложности самой системы

ТО и числа оптимизируемых параметров. При этом в большинстве случаев для решения поставленной задачи необходимо использовать специальные оптимизационные методы.

Вопросы, рассмотренные в данной статье, также исследуются и прорабатываются в рамках гранта №МК-2773.2011.8 «Управление техническим состоянием электроэнергетических объектов с целью повышения параметров их энергоэффективности».

Список литературы

1. Сугак Е.В., Василенко Н.В., Назаров Г.Г. и др. Надежность технических систем: учебн. пособие для вузов. Красноярск: НИИ СУВПТ, МГП «Раско», 2001.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высшая школа, 1982.
3. Гук Ю.Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: Справочник. М.: НЦ ЭНАС, 2006.
5. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений. М.: Наука, 1977.
6. Сугак Е.В. Теория случайных процессов. Основные положения и инженерные приложения: Учебн. пособие для вузов. Красноярск: КФАГА, 2004.
7. Гук Ю.Б., Долгов П.П., Окорочков В.Р. и др. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их применения. К.: Наукова думка, 1976.

Автоматизированная система управления процессом наложения пластмассовой изоляции кабелей методом экструзии

ЗИННАТУЛЛИН Р.Р., КАЗАКОВ А.В., ТРУФАНОВА Н.М.

Рассмотрены вопросы автоматизации управления процессом экструзии полимерной изоляции и подбора рациональных режимов технологического процесса. Разработана методика и алгоритмы автоматизированного управления процессом наложения пластмассовой изоляции при производстве кабелей, обеспечивающего заданное качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: кабель, экструзия, охлаждение изоляции, управление, автоматизация.

Качество кабельного изделия во многом зависит от правильности выбора режима его изготовления. Одной из причин выхода кабельного изделия из строя раньше установленного срока, снижающих его конкурентоспособность, являются дефекты, возникающие в изоляции на этапе охлаждения, обязательном при производстве кабеля методом экструзии. Су-

Questions automation process of extrusion of the polymer insulation have been considered. The technique and algorithms for automated process control overlay of plastic insulation in the manufacture of cables, providing a specified product quality.

Key words: cable, extrusion, cooling the polymer insulation, control, automation.

ществующие режимы охлаждения, которые для новых материалов обычно подбираются на основании общих рекомендаций производителей экструзионного оборудования, натурных экспериментов и практического опыта технолога, не оптимальны с точки зрения качества конечного продукта. Поэтому одной из актуальных задач кабельной промышленности являет-

ся автоматизация управления процессом охлаждения полимерной изоляции и подбора рациональных режимов данного процесса.

Охлаждаемый провод представляет собой осесимметричную конструкцию из разнородных материалов (рис. 1).

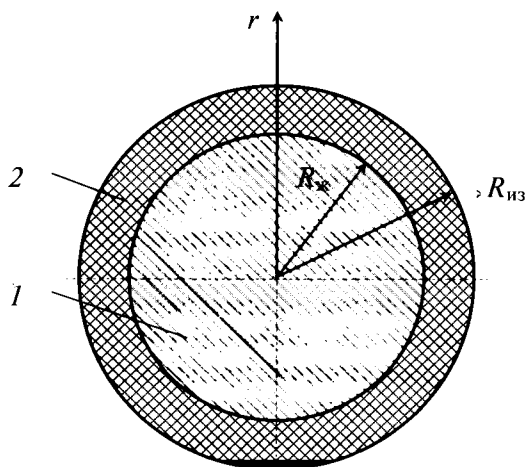


Рис. 1. Сечение провода: 1 — металлическая токопроводящая жила; 2 — изоляция из полимера; $R_{\text{ж}}$ — радиус жилы; $R_{\text{из}}$ — радиус изолированного провода

При рассмотрении процесса охлаждения движущегося по ванне провода как объекта управления можно выделить следующие основные параметры и воздействия [1]: 1) входные параметры, к которым можно отнести собственные параметры объекта $X(t)$, внешние возмущающие воздействия $Z(t)$ и управляющие воздействия $U(t)$; 2) выходные параметры $Y(t)$, где $t \in [0; t_k]$, t_k — продолжительность процесса. К собственным параметрам, формирующим вектор параметрических возмущений, относятся: диаметр жилы $D_{\text{ж}}$, толщина изоляции $\Delta_{\text{из}}$, теплофизические и механические свойства материалов провода, максимально возможная длина охлаждающего участка $L_{\text{охл max}}$. Вектор

внешних возмущений формируют температура жилы $T_{\text{ж.нач}}$ и изоляции $T_{\text{из.нач}}$ перед входом в ванну, температура окружающего воздуха T_a . Все перечисленные параметры являются контролируемыми в ходе технологического процесса, исключение составляют свойства материалов провода.

К выходным характеристикам объекта управления, составляющим вектор выходного состояния, относятся параметры, отражающие качество получаемого провода, — температура поверхности охлаждаемого провода в конце ванны $T_{\text{пов}}$ (контролируемый параметр), поля распределения радиальных напряжений в проводе $\sigma_r(r, z)$ и относительной степени кристалличности $\beta(r, z)$ материала изоляции (оба неконтролируемые параметры). В работе в качестве охлаждающего устройства рассматривалась специальная ванна (рис. 2), которая (в отличие от стандартной) позволяет реализовать воздушно-водяное охлаждение.

Таким образом, к вектору управляющих переменных относятся: скорость движения провода вдоль участка охлаждения (скорость изолирования) $v(t)$, а также параметры самой ванны: N , $T_{w(i)}$, $L_{w(i)}(t)$ — количество, температуры и длины водяных промежутков, соответственно; M и $L_{a(j)}(t)$ — количество и длины воздушных промежутков, соответственно; $i=1,2,\dots,N$, $j=1,2,\dots,M$.

К процессу охлаждения изолированного провода предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, необходимо обеспечить получение качественного провода, что достигается медленным охлаждением, с другой, необходимо уменьшить себестоимость продукта, поддерживая максимальную скорость изолирования.

При решении задачи управления учитывался ряд условий, позволяющих обеспечить

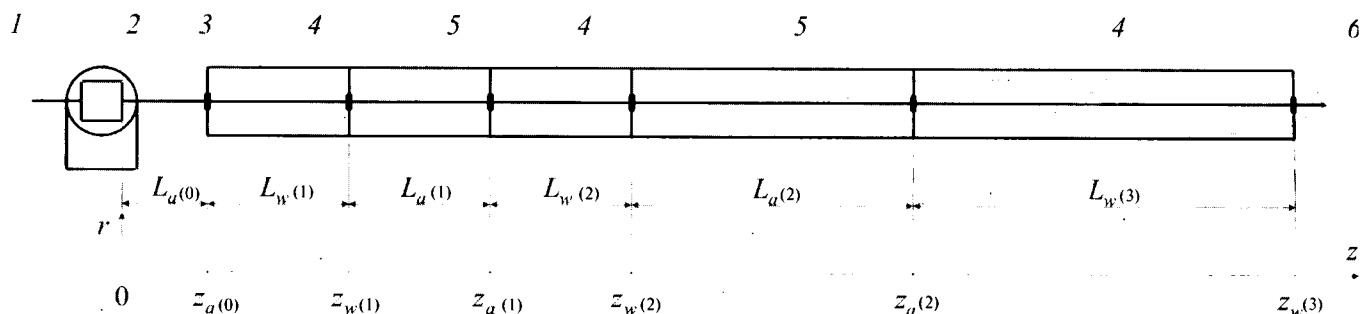


Рис. 2. Схема трёхсекционной охлаждающей ванны, предлагаемой для внедрения: 1 — токопроводящая жила; 2 — головка экструдера; 3 — изолированная жила; 4 — водяной промежуток; 5 — воздушный промежуток; 6 — охлажденный провод; $L_{u(i)}$ — длины охлаждающих участков; $z_{u(i)}$ — координаты концов участков охлаждения; i — номер секции охлаждения (0, 1, 2, 3); u — тип охлаждающего участка (a — воздушный, w — водяной)

получение качественного провода: 1. Допустимая температура поверхности провода в конце ванны должна быть ниже температуры размягчения изоляционного полимера: $T_{\text{пов}}|_{z=L_{\text{охл}}} \leq T_{\text{пов min}}$.

2. В расплавленных областях изоляции не должно возникать растягивающих радиальных напряжений, $\sigma_r(r, z)|_{\beta(r, z)=0} \leq 0$; средняя по толщине изоляции относительная степень кристалличности в конце ванны должна быть не менее допустимой, $\beta_{\text{ср}}|_{z=L_{\text{охл}}} \geq \beta_{\text{ср min}}$, где z — осевая координата, $\beta_{\text{ср}}$ — средняя по толщине относительная степень кристалличности материала изоляции.

Процесс охлаждения провода сопровождается теплообменом полимерной изоляции с охлаждающей средой и металлической жилой, формированием кристаллической структуры полимера, значительным тепловыделением при фазовом переходе, появлением технологических напряжений в изоляции. Поэтому решение задачи управления процессом охлаждения осуществлено на основе математической модели, описывающей эти процессы [2]. Такая математическая модель в операторной форме имеет следующий вид:

$$Y(t) = F(t, X(t), Z(t), U(t)), \quad (1)$$

где F — оператор, представляющий собой систему нелинейных дифференциальных уравнений связанных краевой температурно-конверсионной задачи и краевой задачи о напряжённо-деформированном состоянии с соответствующими граничными условиями и физическими соотношениями.

На управляющие параметры накладываются естественные ограничения: скорость провода должна быть отлична от нуля и не должна превышать максимально допустимого значения: $0 < v(t) \leq v_{\text{max}}$, где v_{max} — максимальная скорость движения провода, определяемая из паспорта ванны или экструдера; температура охлаждающей воды также ограничена температурой проточной воды и максимально допустимой (по паспорту ванны): $T_{w \text{ min}} \leq T_{w(i)} \leq T_{w \text{ max}}$, где $T_{w \text{ min}}$ и $T_{w \text{ max}}$ — минимально возможная и максимально допустимая температуры охлаждающей жидкости; сумма всех участков охлаждения должна быть равна максимальной длине

$$\text{ванны: } \sum_{i=1}^N L_{w(i)}(t) + \sum_{j=1}^M L_{a(j)}(t) = L_{\text{охл max}}.$$

Таким образом, задача управления процессом охлаждения совпадает с задачей определения его оптимального режима и может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти такой оптимальный вектор $\bar{U}(t) = \{\bar{N}, \bar{T}_{w(i)}, \bar{L}_{w(i)}(t), \bar{M}, \bar{L}_{a(j)}(t), \bar{v}(t)\}$, который обеспечивает максимальную среднюю скорость изолирования в течение рассматриваемого периода времени при ограничениях типа равенств (1), а также ограничениях на качество получаемого провода и на параметры управления, где $\bar{U}(t)$, $\bar{L}_{w(i)}(t)$, $\bar{L}_{a(j)}(t)$, $\bar{v}(t)$ — кусочно-постоянные функции, определённые на отрезке $[0; t_k]$.

Для управления процессом предложена автоматизированная система (АСУ), функциональная схема которой представлена на рис. 3. Контур управления замкнут через УВК, а функции оператора-технолога сводятся к общему наблюдению за ходом процесса и внесению начальной информации, а также управлению в аварийных режимах. При каждом новом запуске экструзионной линии или при смене марки изготавливаемого провода на вход УВК поступает информация о процессе ($X(t), Z(t)$), а также ограничения на управляющие воздействия и качество провода. На основании этой информации УВК находит в сформированной вне контура управления базе данных соответствующий начальным условиям оптимальный режим охлаждения и восстанавливает вектор состояния координат процесса $S(t)$ (температурно-кристаллизационные поля и поля напряжений изоляции по всей длине охлаждающей ванны), и выдаёт его на экран монитора в виде информации об объекте управления. Далее УВК формирует вектор управляющих

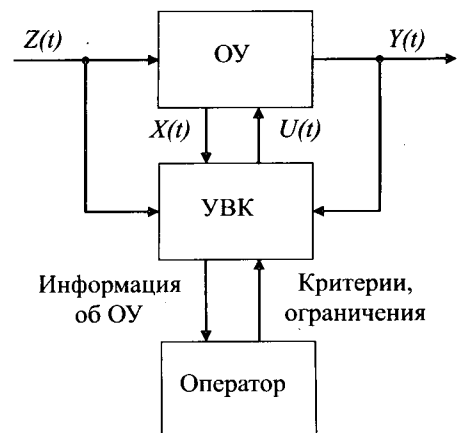


Рис. 3. Функциональная схема АСУ: УВК — управляющий вычислительный комплекс; ОУ — объект управления

переменных $U(t)$. Также предусмотрена обратная связь для компенсации действия неконтролируемых возмущений, входящих в вектор входных параметров объекта управления.

На структурной схеме АСУ (рис. 4) показан состав УВК. Основной частью является управляющее устройство (УУ), которое представляет собой персональный компьютер с возможностью подключения к нему различных датчиков. Вычисленные значения управляющих воздействий передаются в систему автоматического регулирования (САР). Исполнительные устройства (ИУ) под управлением САР создают условия рассчитанного режима охлаждения. САР поддерживает технологические параметры в заданных пределах в следующем контуре управления: $\text{САР} \rightarrow \text{ИУ} \rightarrow \text{ОУ} \rightarrow \text{Д}_5 \rightarrow \text{САР}$ (рис. 4).

Для уточнения математической модели в режиме управления используется параметрическая идентификация [3]. Единственным контролируемым выходным параметром $Y_{i+1}(t)$ является температура поверхности провода в конце ванны охлаждения, зависящая от значения коэффициента теплоотдачи поверхности провода α_n . Идентификация заключается в уточнении этого коэффициента, первоначально вычисленного аналитически с использованием начальных данных об объекте управления.

Изменяя α_n можно корректировать значения выходного параметра, вычисленного с помощью модели $Y_M(t)$. Этим компенсируется влияние неконтролируемых возмущений, и

математическая модель уточняется для конкретных условий работы объекта управления.

Таким образом, задача параметрической идентификации модели сводится к нахождению оптимального значения коэффициента теплоотдачи поверхности провода:

$$\left| T_{\text{пов.изм}} - T_{\text{пов.расч}}(\alpha_n) \right| \rightarrow \min_{\alpha_n} \left| \alpha_{\text{порт}} \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] \right| \rightarrow \alpha_{\text{порт}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{пов.расч}}(\alpha_n)$ — значение температуры поверхности провода, вычисленное с помощью математической модели процесса охлаждения, $\alpha_{\text{порт}}$, α_{\min} , α_{\max} — оптимальное, минимальное и максимальные значения коэффициента теплоотдачи поверхности провода.

При необходимости идентификации модели процесса используется переходный режим. При этом УВК снижает скорость движения провода до необходимой, которая зависит от разницы температур в выражении (9), а также от температуры охлаждающей воды. Данная скорость заранее определяется вне контура управления и также вносится в базу данных. Эта скорость обеспечивает соблюдение ограничений на качество получаемого провода в переходном режиме, но не является оптимальной. После уточнения параметров модели снова определяется оптимальный режим охлаждения по упрощенному алгоритму, и формируется новый вектор управляющих воздействий.

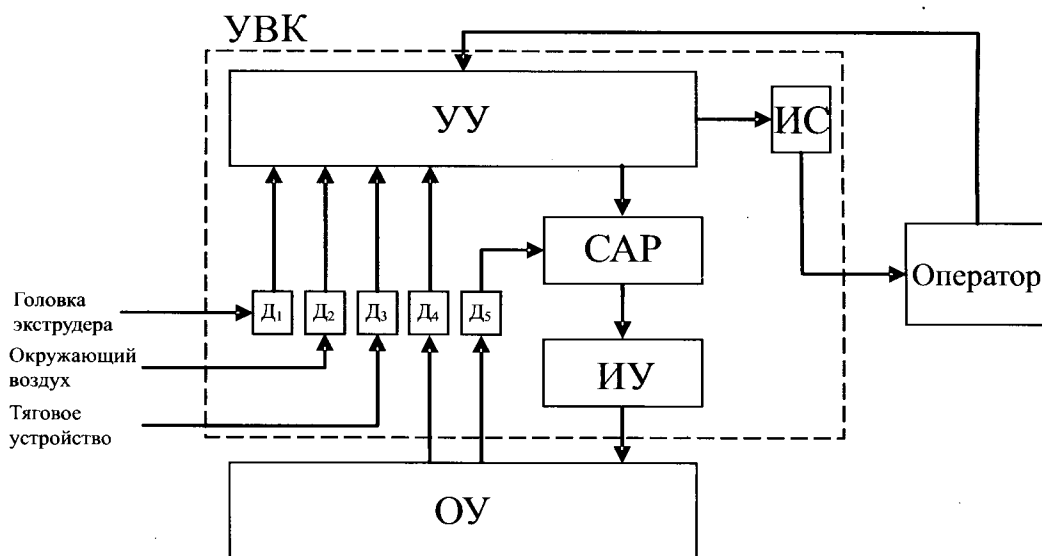


Рис. 4. Структурная схема АСУ охлаждением провода с полимерной изоляцией: ИС — индикатор состояния (монитор); УВК — управляющий вычислительный комплекс; Д₁ — группа датчиков диаметра жилы, толщины изоляции, температуры жилы и изоляции при выходе из головки экструдера; Д₂ — датчик температуры окружающего воздуха; Д₃ — датчик скорости движения охлаждаемого провода; Д₄ — датчик температуры поверхности охлажденного провода; Д₅ — группа датчиков температуры охлаждающей среды и длин секций охлаждающих ванн

Таким образом, на основе математической модели [2], описывающей температурно-конверсионные и термомеханические процессы, сопровождающие процесс охлаждения полимерной изоляции были разработаны:

— алгоритм адаптивной идентификации параметров математической модели в режиме управления процессом охлаждения;

— методики и алгоритмы определения рационального режима и расчёта управляющих воздействий, поддерживающих в ходе технологического процесса максимальную скорость изолирования при обязательном соблюдении

условий обеспечения качества провода, что позволило в ряде случаев увеличить скорость изолирования относительно режимов, существующих на предприятиях.

Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб: Профессия, 2004.
2. Зиннатуллин Р.Р., Труфанова Н.М. Численное моделирование технологических напряжений при изготовлении пластмассовой изоляции провода // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, № 1. С. 38–53.
3. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989.

Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния

КАЗАНЦЕВ В.П., ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б., РОМОДИН А.В., ХОРОШЕВ Н.И.

Рассмотрены некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнического оборудования на основе статистических (стохастических) методов краткосрочного прогнозирования. Экспериментальная (расчётная) часть включает в себя построение и апробацию конкретных прогнозных моделей с целью обоснования целесообразности их дальнейшего использования.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, электротехническое оборудование, модель, корреляция, прогноз.

При изучении множества электротехнических объектов (ЭО) в контексте создания единой системы технического обслуживания оборудования по его фактическому состоянию, подразумевающей постепенный отказ от технологии планово-предупредительных ремонтов [1], особенно в отношении наукоёмких изделий, особое значение приобретают методы прогнозирования соответствующих параметров электротехнического оборудования [2], характеризующих его техническое состояние.

Следует отметить, что при эксплуатации ЭО не только в энергосетевых компаниях, но и в других отраслях экономики, как правило, учитывают следующие основные требования [3]:

1. Производство, передача и распределение заданного количества электроэнергии (мощности) в соответствии с заданным графиком.

Some aspects of electro engineering equipment exploitation technology on the basis of statistical (stochastic) short-term forecast methods are considered. The experimental article part includes forecast models construction and approbation for the expediency substantiation of their further use.

Key words: electrical power system, electro engineering equipment, model, correlation, forecast.

2. Надёжная работа установок и энергосистемы в целом (поддержание показателей надёжности на заданном уровне).

3. Удовлетворительное качество электроэнергии в рамках допустимых отклонений показателей качества.

4. Снижение ежегодных издержек на эксплуатацию ЭО.

Поскольку достоверность прогноза напрямую зависит от количества и полноты исходных данных, то для применения, в первую очередь, статистических методов и моделей прогнозирования, в том числе на основе анализа временных рядов, а также нейросетевых алгоритмов [4], необходима соответствующая информация, источником которой могут быть базы данных (БД): динамики развития дефектов и повреждений ЭО, показателей надёжности [3,5], потребления энергетических ресурсов.

Выбор методов и моделей прогнозирования

На данный момент основным ограничением в апробировании, а затем и полноценном применении статистических алгоритмов прогнозирования технического состояния ЭО по его показателям надёжности, а также параметрам, характеризующим работу оборудования, является отсутствие достаточно полной и чёткой информации в отношении каждого вида оборудования. Таким образом, ввиду отсутствия достаточно полной наработанной статистической базы относительно первых двух упомянутых позиций, ограничимся исследованием ряда подходов [6] в решении задачи краткосрочного прогнозирования на примере данных о потреблении электрической энергии (ЭЭ) объединённой энергетической системой (ОЭС) Урала, используя информацию соответствующей статистической информационной базы.

Решение рассматриваемой задачи может быть связано с определением технического состояния оборудования, поскольку, зная необходимое потребление энергоносителя в тот или иной период времени, можно решать задачу планирования проведения ремонтных работ электротехнического оборудования, т.е. управлять значением интенсивности восстановлений (μ) в будущем, а значит, и наработкой до отказа (T_0). Наряду с этим также необходимо учитывать оптимальное распределение мощностей между потребителями энергосетевых компаний, сводящее к минимуму риски внезапного выхода из строя энергетических объектов.

При использовании различных методов прогнозирования потребления энергетических ресурсов или технического состояния ЭО в качестве значимого ограничения выступает также время упреждения, т.е. тот дискрет времени (лаг), на который осуществляется предсказание. Чем больше временной лаг, тем больше вероятность получить менее точный прогноз. Поэтому авторы статьи относят рассматриваемые ими подходы к ряду краткосрочных, что и будет далее подтверждено эмпирически.

Далее обозначим ряд конкретных методов и моделей, подлежащих более детальному исследованию при решении частной задачи с возможностью дальнейшей экстраполяции полученных результатов на непосредственное прогнозирование параметров технического состояния ЭО.

Среди существующих подходов в решении задачи краткосрочного прогнозирования были выбраны следующие модели:

- модель на основе автокорреляционного анализа временных рядов (модель № 1);
- адаптивная модель Тейла-Вейджа (модель № 2).

Выбор именно данных моделей в качестве аппарата, позволяющего решить задачу краткосрочного прогнозирования, основывался на том, что часть моделей уже представляет собой некоторое сочетание более простых методов, нашедших широкое распространение в решении различных прикладных задач [7]. Например, модель на основе автокорреляционного анализа временных рядов включает в себя аддитивную модель и трендовую составляющую, получаемую в свою очередь на основе корреляционной регрессионной модели, а адаптивная модель Тейла-Вейджа использует линейный предиктор Хольта, частным случаем которого является простейшая модель экспоненциального сглаживания (модель Брауна) [8]. Другие же существующие на данный момент времени потенциальные методы прогнозирования [6] (например, различные экстраполяционные полиномы), с которыми читатель может ознакомиться в соответствующей литературе, не рассматриваются, что является также ещё одним ограничением в рамках данной статьи.

Особенность прогнозирования численных значений параметра или группы параметров, характеризующих (определяющих) техническое состояние оборудования, заключается в том, что большинство регулярных составляющих временных рядов являются либо трендом, либо периодической (сезонной) составляющей, т.е. принадлежат к двум классам. Причём оба эти вида регулярных компонент достаточно часто присутствуют в ряде одновременно, что может быть коррелировано также с другими факторами (например, температура, время года, время суток и т.д.).

Кроме того существует определённый тип модели временного ряда, в которой амплитуда периодических (сезонных) изменений увеличивается вместе с трендом. Такого рода модели носят название моделей с мультипликативной сезонностью. В силу специфики рассматриваемых эмпирических данных подобные модели не рассматриваются.

Краткое математическое описание моделей краткосрочного прогнозирования

В данной статье ограничимся рассмотрением краткого математического описания каждой модели и алгоритмом её практического применения, в том числе с возможностью реализации на персональном компьютере. Практические построения моделей и все сопутствующие вычисления осуществлялись в специализированном математическом программном обеспечении: MATLAB, MATHCAD, а также в приложении, разработанном под конкретные исследовательские задачи.

Первой рассмотрим модель на основе автокорреляционного анализа временных рядов, которая нашла достаточно широкое применение при решении различных прикладных задач [8] и базируется на установлении аналитических зависимостей между теоретическими и эмпирическими значениями исследуемых параметров энергетических объектов.

Исследуемый метод прогнозирования основан на автокорреляции, представляющей собой корреляцию между величиной и её запаздыванием в один или более периодов времени.

С помощью предлагаемого механизма моделирования одномерных временных рядов на основе автокорреляции могут изучаться наборы данных, включающие в себя как тренд (T), так и периодическую (сезонную) составляющую (S) со случайной компонентой (E), которая в свою очередь может обладать стохастическим или систематическим характером изменения.

Рассмотрим как раз такой, наиболее специфичный, случай, когда в исходных данных о потреблении ЭЭ ОЭС Урала ($P(t)$) за период времени (t) с 2007–2010 гг. имеются все три составляющие (рис. 1).

Расчёт коэффициентов автокорреляции, позволяющих установить корреляционную зависимость между последовательными уровнями временного ряда и определить его структуру с последующим выбором базовой модели, осуществляется следующим образом:

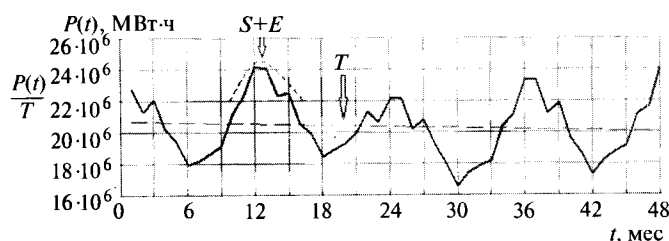


Рис. 1. Исходные данные потребления ЭЭ ОЭС Урала за 2007–2010 гг.

$$r_i = \frac{\sum_{t=i+1}^n (y_t - \bar{y}_1)(y_{t-i} - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{t=i+1}^n (y_t - \bar{y}_1)^2 \sum_{t=2}^n (y_{t-i} - \bar{y}_2)^2}}, \quad (1)$$

где i – порядок коэффициента автокорреляции; y_t – значение временного ряда с лагом i ; \bar{y}_1 , \bar{y}_2 – средние значения соответствующих уровней временного ряда,

$$\bar{y}_1 = \frac{\sum_{t=i+1}^n y_t}{n-i}; \quad \bar{y}_2 = \frac{\sum_{t=i+1}^n y_{t-1}}{n-i}.$$

Базовая аддитивная модель

$$y = T + S + E, \quad (2)$$

где y в рамках решаемой нами задачи представляет собой параметр потребления активной мощности $P(t)$.

Линейная и нелинейная зависимости трендовой и случайной составляющих ($T+E$):

$$y(t) = a + bt; \quad y(t) = a + bt + ct^2. \quad (3)$$

В данном случае основной задачей исследования временного ряда является численная оценка каждой из перечисленных компонент, с тем, чтобы использовать полученную информацию для прогнозирования будущих значений ряда $P_t(t)$ (параметров технического состояния ЭО) или при построении моделей взаимосвязи между двумя и более временными рядами.

На рис. 2 приведён обобщённый алгоритм модели № 1, который был использован и реализован программно в экспериментальной части данной работы.

Исследуемая адаптивная модель № 2 представляет собой стохастический процесс Г. Тейла и С. Вейджа на основе двухпараметрического предиктора Хольта [7] и аналитически содержит в себе выражения, представленные основными формулами:

$$x_i = a_{1,t} + \varepsilon_t; \quad a_{1,t} = a_{1,t-1} + a_{2,t}; \quad a_{2,t} = a_{2,t-1} + v_t, \quad (4)$$

где $a_{1,t}$ – значение уровня исследуемого временного ряда x_t в момент t ; $a_{2,t}$ – прирост уровня от момента $t-1$ к моменту t ; ε_t и v_t – временные последовательности с нулевым математическим ожиданием, постоянными дисперсиями и отсутствием ковариации.



Рис. 2. Алгоритм решения задачи прогнозирования нагрузки потребителей на основе автокорреляционной модели

Схема составления прогноза выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\hat{a}_{1,t} &= \alpha_1 x_t + (1 - \alpha_1)(a_{1,t-1} + \hat{a}_{2,t-1}); \\ \hat{a}_{2,t} &= \alpha_2 (\hat{a}_{1,t} - \hat{a}_{1,t-1}) + (1 - \alpha_2) \hat{a}_{2,t-1}; \\ \hat{x}_t(t) &= \hat{a}_{1,t} + \tau \hat{a}_{2,t}; \\ 0 &\leq \alpha_1, \alpha_2 \leq 1.\end{aligned}\quad (5)$$

Авторы методики показали, что задача сводится к оптимизации параметров α_1 и α_2 при минимизации дисперсии ошибки прогноза на 1 шаг вперёд $D_e(l)$:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{2h}{1+h}; \quad \alpha_2 = h; \quad \gamma = \frac{2h^2}{1+h}; \\ h &= \sqrt{\left(-\frac{1}{8}g^2 + \frac{1}{2}g\sqrt{1 + \frac{1}{16}g^2}\right)}; \quad g^2 = \frac{\sigma_v^2}{\sigma_\varepsilon^2}; \\ D_e(l) &= \frac{1+h}{1-h}\sigma_\varepsilon^2,\end{aligned}\quad (6)$$

где величина g^2 и её составляющие могут быть найдены через автоковариационную функцию $\text{cov}_{yy}(k) = M(y_t, y_{t-k})$ [8].

Результаты моделирования процесса краткосрочного прогнозирования

Согласно коррелограмме, представленной на рис. 3 и полученной на основании формулы (1) в рамках модели № 1, коэффициент автокорреляции первого порядка $r_1 = 0,769$ и свидетельствует о достаточно существенной связи текущих уровней ряда от непосредственно предшествующих им уровней. Как следует из графика, структура ряда такова, что каждый следующий уровень y_t зависит от y_{t-6} , y_{t-12} , y_{t-18} , y_{t-24} в большей степени, чем от других уровней.

С учётом знаков наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции порядка $r=12$, т.е. наш ряд изменения параметра $P(t)$ содержит циклические колебания с периодичностью в r моментов времени. Таким образом, анализ значений автокорреляционной функции позволил сделать формальный вывод о наличии в изучаемом временном ряде линейной тенденции и определённой периодичности.

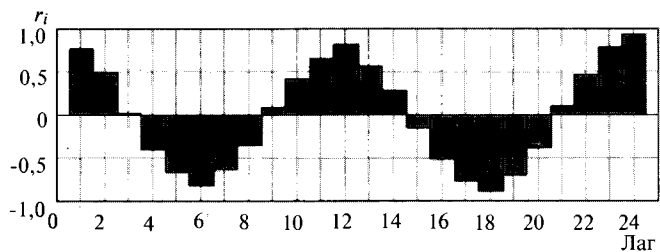


Рис. 3. Коррелограмма временного ряда потребления ЭЭ ОЭС Урала

Ввиду громоздкости промежуточных и итоговых расчётных данных по каждому из необходимых параметров, получаемых в ходе формирования модели № 1, опустим их и приведём на рис. 4 итоговые результаты.

Для оценки качества построения модели используем сумму квадратов абсолютных ошибок. Для данной аддитивной модели сумма квадратов абсолютных ошибок равна $1,823 \cdot 10^{13}$ (размерность обусловлена спецификой рас-

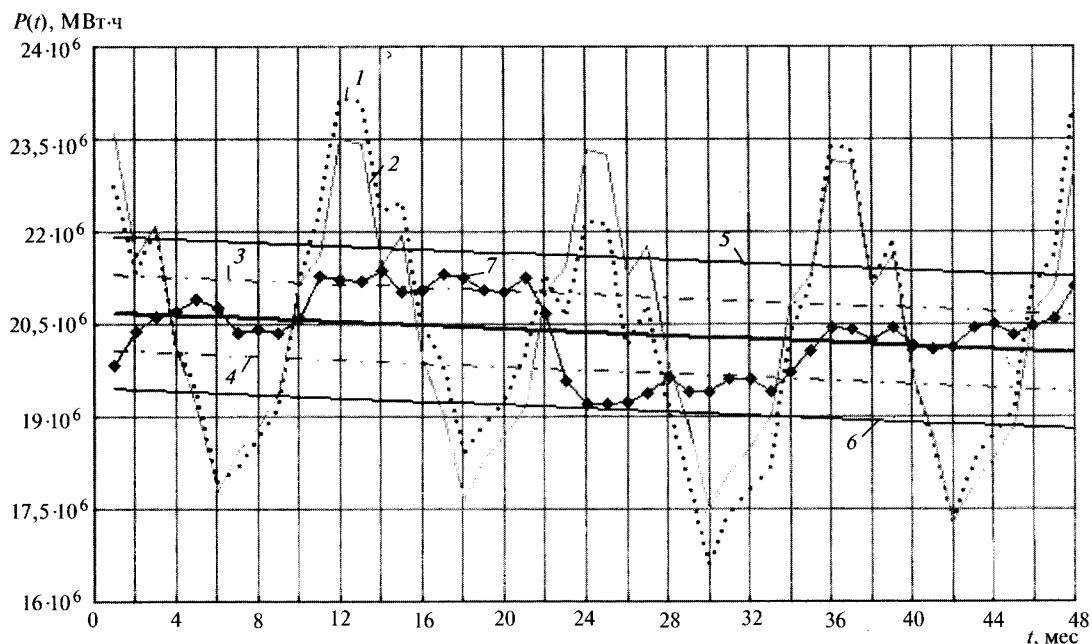


Рис. 4. Моделирование временного ряда потребления ЭЭ ОЭС Урала: F_{68_1} / F_{68_2} – верхний/нижний 68% доверительный интервал; F_{95_1} / F_{95_2} – верхний/нижний 95% доверительный интервал; 1 – $P(t)$; 2 – $T+S$; 3 – F_{68_1} ; 4 – F_{68_2} ; 5 – F_{95_1} ; 6 – F_{95_2} ; 7 – $T+E$

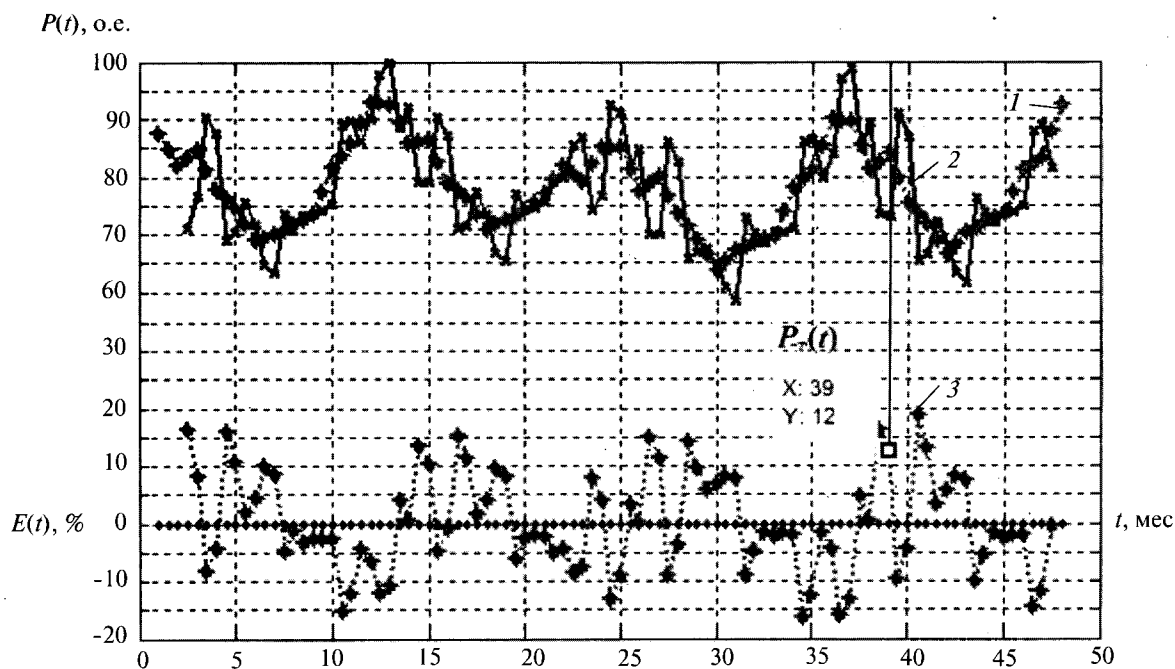


Рис. 5. Моделирование прогноза без учёта сглаживания временного ряда: 1 – $P(t)$; 2 – $P_t(t)$; 3 – $E(t)$

Таблица 1

Параметр модели №1	Результаты прогноза
Текущий момент времени, с которого осуществляется прогнозирование, t_i , мес	38
Время упреждения τ , мес	1
Прогнозное значение исследуемого параметра $P_t(t)$, МВт·ч	21613421,89 / 21891621,89
Средняя ошибка $E_{ср}$, %	$1,086 \cdot 10^{-4}$
Текущая ошибка прогноза $E_{тек}$, %	$1,269 / 1,347 \cdot 10^{-3}$
<i>Примечание.</i> Значения параметров, находящиеся слева от разделительного знака «/», означают, что в модели №1 не учитывается ошибка прогноза в аналогичный момент времени в прошлом, а справа — учитывается.	

Таблица 2

Параметр модели №2	Результаты прогноза
Лег начальных условий (определяет количество ретроспективных данных участвующих в расчётах), τ_0 , мес	3
Текущий момент времени, с которого осуществляется прогнозирование, t_i , мес	38
Время упреждения τ , мес	1
Прогнозное значение исследуемого параметра $P_t(t)$, о.е.	88,97 / 73,08
Текущая ошибка прогноза $E_{тек}$, %	13,34 / 12,00
<i>Примечание.</i> Значения параметров, находящиеся слева от разделительного знака «/», получены при использовании в модели № 2 исходных данных без структурных изменений, а справа — при использовании сглаженных исходных данных методом кратной интерполяции на основе формы Ньютона с простым дискретом, равным 0,5 (половина месяца).	

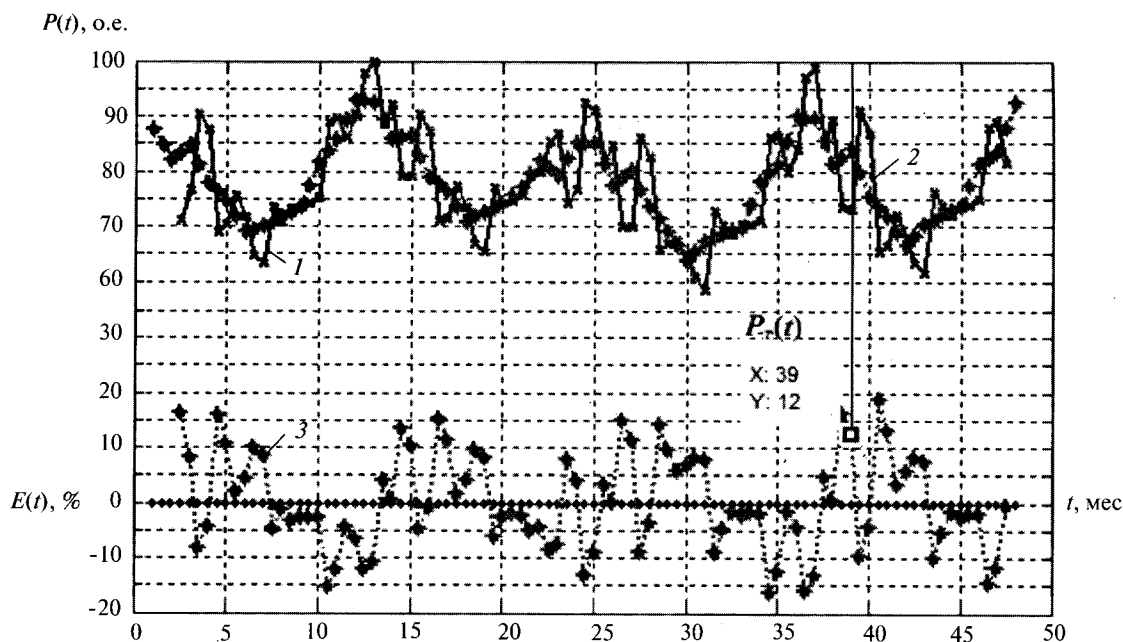


Рис. 6. Моделирование прогноза с учётом сглаживания временного ряда (модифицированный метод): 1 — $P(t)$; 2 — $P_t(t)$; 3 — $E(t)$

сматриваемых исходных данных). По отношению к общей сумме квадратов отклонений уровней ряда от его среднего уровня, равного $1,821 \cdot 10^{14}$, это значение составляет порядка 10%, т.е. модель № 1 объясняет 90% общей вариации уровней временного ряда потребления

электроэнергии за рассматриваемый период времени с 2007–2010 гг. Все эмпирические точки (100%) относительно трендовой модели попали в 95% доверительный интервал, что также свидетельствует об адекватности выбранной модели T (см. рис. 4).

Предположим, что перед исследователем стоит задача получения прогноза потребления ЭЭ ОЭС Урала ($P_T(t)$) на момент времени $t=39$, т.е. на март 2010 г., обладая данными предыдущих периодов (формально в данном примере намеренно используется прогноз на уже прошедший момент времени, чтобы затем оценить адекватность моделей 1 и 2). С использованием модели № 1, с учётом начальных условий был получен результат, представленный в табл. 1.

Согласно адаптивной модели Тейла-Вейджа результаты глобального прогноза, т.е. по всем имеющимся данным, с учётом и без учёта модификации данной модели (в части сглаживания) представлены в относительных единицах измерения на рис. 5 и 6, а также в табл. 2.

Выводы

1. Авторы в целом рассматривали модели в контексте краткосрочного прогнозирования. Вместе с тем, как показал эксперимент, при прочих равных условиях модель № 1 способна оставаться работоспособной в допустимых границах показателя ошибки и при более длительном времени упреждения τ , чего нельзя сказать об адаптивной модели Тейла-Вейджа.

2. Согласно заданным начальным условиям при моделировании процесса прогнозирования наиболее предпочтительным оказался вариант использования модели № 1. Однако, точность модели № 2 может быть существенно повышена за счёт её модификации посредством использования метода кратной интерполяции с определённым временным дискретом, что также было доказано экспериментально. Так, при использовании дискрета интерполяции, равного 0,25, ошибка прогнозирования снижается примерно в 4,5 раза и составляет уже порядка 2% (для 0,2–1,7% и т.д.), т.е. зависит от дискрета нелинейно.

3. В дальнейшем планируется апробировать данную модель с более продолжительным временем упреждения, расширить ряд сравниваемых моделей, а также разработать критерий наиболее эффективного использования той или иной модели в зависимости от различных условий.

4. В данной статье в силу ряда ограничений также не рассмотрена нейросетевая модель прогнозирования, которая, обладая рядом специфических особенностей, при проведении расчётных экспериментов показала достаточно хорошие результаты.

5. Полученный опыт использования моделей предполагается экстраполировать в область управления техническим состоянием ЭО [9].

Рассмотренные в статье вопросы исследуются в рамках гранта Президента РФ № МК-2773.2011.8 «Управление техническим состоянием электроэнергетических объектов с целью повышения параметров их энергоэффективности».

Список литературы

1. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: справочник. М.: НЦ ЭНАС, 2005.
2. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: Атомиздат, 2001.
3. Гук Ю.Б., Долгов П.П., Окорочков В.Р. и др. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. М.: Издательский дом Вильямс, 2008.
5. Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем: Учеб. пособие для вузов. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006.
6. Рабочая книга по прогнозированию. М.: Мысль, 1982.
7. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003.
8. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982.
9. Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И. Об одном формализованном методе оценки управленческих решений (на примере управления электротехническими объектами) // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2009. № 87. С. 166–171.

Рациональное управление потреблением энергии с помощью информационной системы энергоменеджмента MY-JEVis

ФАЙЗРАХМАНОВ Р.А., ФРАНК Т., КЫЧКИН А.В., ФЁДОРОВ А.Б.

Рассмотрена концепция энергетического менеджмента на основе информационной системы My-JEVis, направленная на повышение эффективности производственных процессов и экономии затрат за счёт рационального управления энергией.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоменеджмент, информационная система.

Одно из приоритетных направлений современной энергетики — создание информационных технологий сбора, передачи и обработки данных о состоянии потребления энергии. Особенно актуально это в сфере оценки крупных энергетических систем, в частности, энергосистем государственных организаций, муниципальных и тех, где есть соответствующие государственные доли, а также организаций с размерами затрат на энергопотребление свыше 10 млн. руб. в год, что особо характерно для промышленности.

На отечественном и зарубежном рынках энергетики сегодня существует множество компаний, внедряющих современные стандарты в области управления данными потребления энергии, а также предоставляющих широкий спектр услуг, связанных с энергосбережением. Однако существующие приборы и системы, пригодные для оценки состояния потенциала энергосбережения, не вполне удовлетворяют потребностям энергетических исследований в условиях ужесточения требований к мероприятиям экономии ресурсов. Это обуславливается в первую очередь необходимостью обеспечения доступности и массовости энергетических исследований, эффективности комплексов энергодиагностики, а также реализации комплексного подхода к оценке состояния энергосбережения. Существует и другая проблема в части оптимизации производственных процессов и экономии затрат, вызванная нерациональным управлением энергией. Всё дело в том, что в существующей системе планирования расходов энергоресурсов отсутствуют механизмы контроля норм, а сами значения лимитов корректируются с большим запозданием при быстро изменяющихся условиях

The energy management concept based on informative system My-JEVis is described. This concept can be used for the efficiency increasing of industrial processes and energy saving.

Key words: energy saving, energy management, informative system.

производственной деятельности. Лимиты часто вынужденно устанавливают выше необходимого уровня потребления. По оценке специалистов такая система управления энергией малоэффективна при рыночных отношениях. Она не несёт в себе экономических стимулов к энергосбережению, инерционна, так как начинает реагировать, когда компания уже понесла существенные потери [1].

Вопросы рационального управления энергией за рубежом решаются путём создания эффективных, активно развивающихся информационных систем управления, адекватно воспринимающих любые производственно-технологические изменения на объекте исследования. В соответствии с международными стандартами такие системы классифицируются как системы энергетического менеджмента. Доминантным представителем такой системы является информационная система My-JEVis компании «Envidatec GmbH» (Гамбург, Германия), обеспечивающая автоматизацию энергоучёта, выявление и устранение нерациональных расходов энергоресурсов, а также поддержание энергопотребления на технологически обоснованном уровне [2].

Концепция системы энергоменеджмента компании «Envidatec GmbH»

Компания «Envidatec GmbH» совмещает экспертизу сфер обслуживания энергосистем, оперативный обмен энергетическими данными, анализ энергетической эффективности и автоматизацию. Цель менеджмента энергии заключается в обнаружении потенциала и экономии с помощью контроля и анализа данных и управления энергосистемами. Это гарантирует, что каждое действие анализируется со-

гласно индивидуальным потребностям исследуемого учреждения. Для реализации энергосберегающих мероприятий компания использует накопленные знания о технологиях снижения энергопотребления, методы и программно-аппаратные средства для проведения экспертиз, позволяющих выявить потенциал энергосбережения. Исследования в области энергетической эффективности, выполняемые в соответствии с правовыми предписаниями и требованиями ISO50001 и DIN EN16001, являются частью ассортимента внутренних аудитов, дополняемых возможностями информационной системы My-JEVis.

Инновационность системы менеджмента энергии My-JEVis заключается в возможности объединения в единую команду опытных специалистов, реализации ноу-хау и знаний из различных областей автоматизации мониторинга данных, управления данными потребления энергии, оценки энергоэффективности. В рамках системы функционирует сеть взаимодействия с различными научными, профессиональными организациями, а также институтами и предприятиями сферы услуг из области энергосбережения. Данные связи и кооперация расширяют возможности информационной системы, повышающие в целом эффективность управления энергией. Развитие информационной системы энергоменеджмента и её адаптация согласно специфике отечественных предприятий позволит обеспечивать формирование и накопление данных о процессах и механизмах сбережения, что необходимо для разработки новых методик повышения энергоэффективности исследуемых объектов, предусмотренных стандартом ISO 50001.

Одним из главных критериев эффективности управления энергией с помощью системы энергоменеджмента My-JEVis является процесс сокращения выбросов углекислого газа в атмосферу, значимость которого в ближайшее время будет лишь возрастать. Это подтверждается требованиями по защите климата, сформулированными в Киотском протоколе.

Автоматический мониторинг данных на основе системы энергоменеджмента. Существенной функцией мониторинга данных является повышение прозрачности процессов, происходящих в организации. Из-за различной природы таких процессов, интервалы наблюдения увеличиваются с целью накопления технических данных, зарегистрированных соответствующим оборудованием. Экономический интерес к данным мониторинга состоит в том, чтобы ви-

зуально интерпретировать зависимость между процессами и послужить основанием для принятия решений об эффективности использования энергосберегающих мероприятий. Это может быть реализовано путём сравнения типовых процессов в различных объектах или сравнения с эталоном [3].

По опыту зарубежных энергоаудиторов с начала анализа данных мониторинга энергопотребления, с помощью только одних организационных мер, можно поднять эффективность использования энергии на 5–15%. А во многих случаях можно рассчитывать на ещё большую прибыль. Простые данные могут быть мониторированы периодическим ручным снятием показаний со счётчиков (датчиков). Из-за высокой динамики технических процессов такое низкое разрешение имеющихся данных не будет отражать реальное положение вещей. Для корректной иллюстрации протекания процесса необходима достаточная действительность и актуальность данных. Чтобы соответствовать этим требованиям используется непрерывный автоматический сбор с высокой частотой получения данных, что приводит в большинстве случаев к ранней экономической выгоде. Автоматическая система с малым временем обновления данных позволяет получить чёткое представление о состоянии процесса, немедленное обнаружение и формирование реакции на беспорядочное поведение процесса.

Исходя из этого, можно сформулировать основные задачи мониторинга данных:

- повышение прозрачности процессов;
- отображение зависимостей между процессами;
- создание основы для принятия деловых решений.

Решение данных задач обеспечивается за счёт построения архитектуры системы энергоменеджмента на основе программируемого логического контроллера VIDA350 — базового прибора, предназначенного для контроля энергетических и производственных данных, что соответствует требованиям стандарта ISO50001. Архитектура системы энергоменеджмента представлена на рис. 1.

ПЛК обеспечивает беспроводной сбор и протоколирование аналоговых и цифровых данных [4]. Благодаря многочисленным входам и выходам и объёмному регистратору данных устройство VIDA350 способно выполнять комплексные задачи. Имеющийся дисплей

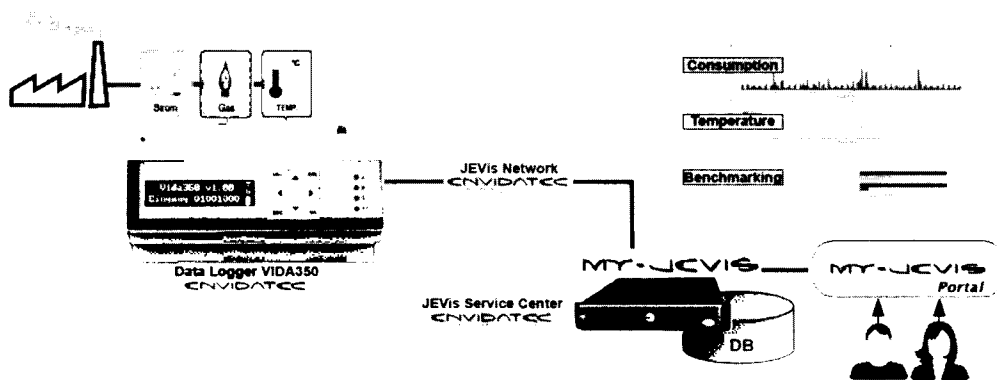


Рис. 1. Архитектура системы энергоменеджмента

даёт возможность простой настройки и эксплуатации прибора. Благодаря интегрированному программному модулю «Envidatec-Firmware» VIDA350 уже готов к эксплуатации и интегрируется с порталом My-JEVis.

Организация информационной системы My-JEVis. My-JEVis — это Интернет-портал, соединённый со всеми регистраторами данных линейки VIDA. Он регулярно считывает и анализирует энергетические и производственные показатели и визуально представляет их. Система даёт обзор всех сведений о потреблении энергии и её запасах. При этом визуализация производится в виде наглядных диаграмм, кривых или таблиц. Система распределяет по категориям измеренные значения и позволяет производить прямое сравнительное изучение. My-JEVis является серверной системой для обработки и визуализации данных. Можно выделить следующие общие функциональные возможности системы My-JEVis:

- считывание данных с портов;
- хранение и распределение данных в структуру базы данных;
- непрерывная обработка данных, таких как индивидуальные расчёты и сигналы тревоги;
- визуализация данных на веб-интерфейсе My-JEVis. My-JEVis связана со всеми установленными шлюзами — поставщиками данных, используя несколько видов коммуникации. Поставщиком данных может быть FTP сервер, система управления зданием или полевым устройством, поддерживающим совместимый интерфейс считывания данных с системой My-JEVis (рис. 2). Данные периодически собираются и сохраняются в базе данных. Обработанные данные, импортированные считыванием с портов, интерпретируются и непрерывно обрабатываются.

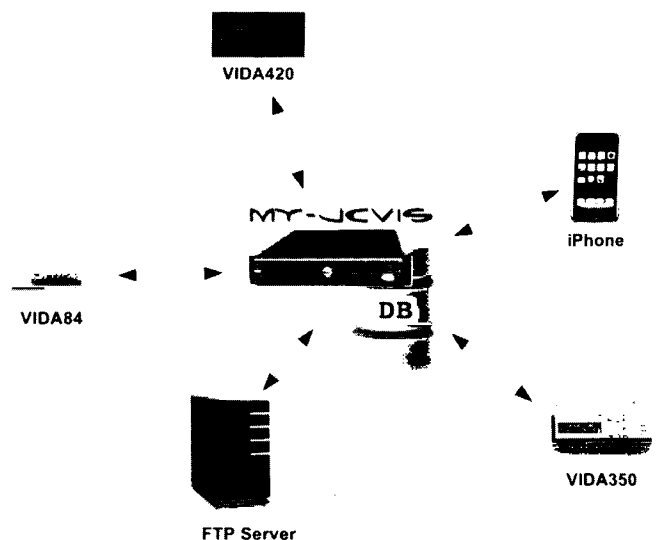


Рис. 2. Подключение шлюзов данных к системе My-JEVis

Система My-JEVis обеспечивает Java-основанный веб-интерфейс. Веб-интерфейс My-JEVis предлагает централизованное решение для мониторинга данных, обеспечивающее гибкую визуализацию полученной информации. Чтобы соответствовать этому, система My-JEVis поставляется с веб-приложениями, позволяющими производить полный просмотр всех полученных данных.

Существенным преимуществом системы My-JEVis является применимость для множества различных источников данных и веб-ориентированное программное обеспечение для мониторинга, работающее в любом стандартном Java-совместимом веб-браузере [5]. Самые общие используемые приложения сети - программные модули:

- JEChart;
- JEBench;
- JEGraph;
- JEDB;

- JEADFWeb;
- JEAlarm;
- JEConfig;
- JECalc;
- JENetwork.

Модульная структура программной оболочки системы энергоменеджмента. Модуль JEChart является графическим интерфейсом пользователя (GUI), который представляет графики сравнения данных, таких как потребление, переключение состояний или расходов. JEChart позволяет рисовать линии и гистограммы и поддерживает различные дополнительные графические опции, такие как масштабирование, выделение цветом, порог визуализации и др. (рис. 3).

Другим веб-компонентом системы My-JEVis является JEBench – инструмент для сравнения и ранжирования данных о потреблении, затратах, показателях или других величинах, используется для сравнения различных филиалов компании или типовых технологических процессов.

Различные модули визуализации могут быть встроены в существующую структуру JEGraph, подключающую различные инструменты, в качестве плагинов в одной системе. Основными характеристиками модуля JEGraph

являются: неограниченное количество плагинов; свободный выбор графических плагинов для объединения (например, 2×Bench, 3×Graph); отсутствие строгой структуры компании обязательной для Bench-плагина, что обеспечивает возможность проведения детального анализа; наличие шаблонов и сложных структур компании с возможностью их сохранения.

JEDB – база данных My-JEVis на основе СУБД My-SQL, имеющая следующие основные характеристики: отсутствие лицензионных сборов → новых целевых групп; обобщённая и гибкая структура; отсутствие ограничений числа данных об энергопотреблении; возможность использования для различных видов проектов (энергопотребление; CDM-проекты; научно-исследовательские проекты; управление зданием; регистрация физических данных).

Универсальные типы данных могут быть использованы для создания конкретных подтипов (например, конкретный шлюз данных наследует все атрибуты универсального типа «источник данных энергооборудования»). Гибкая структура базы данных обеспечивает хранение свойств энергоданных в виде строк дан-

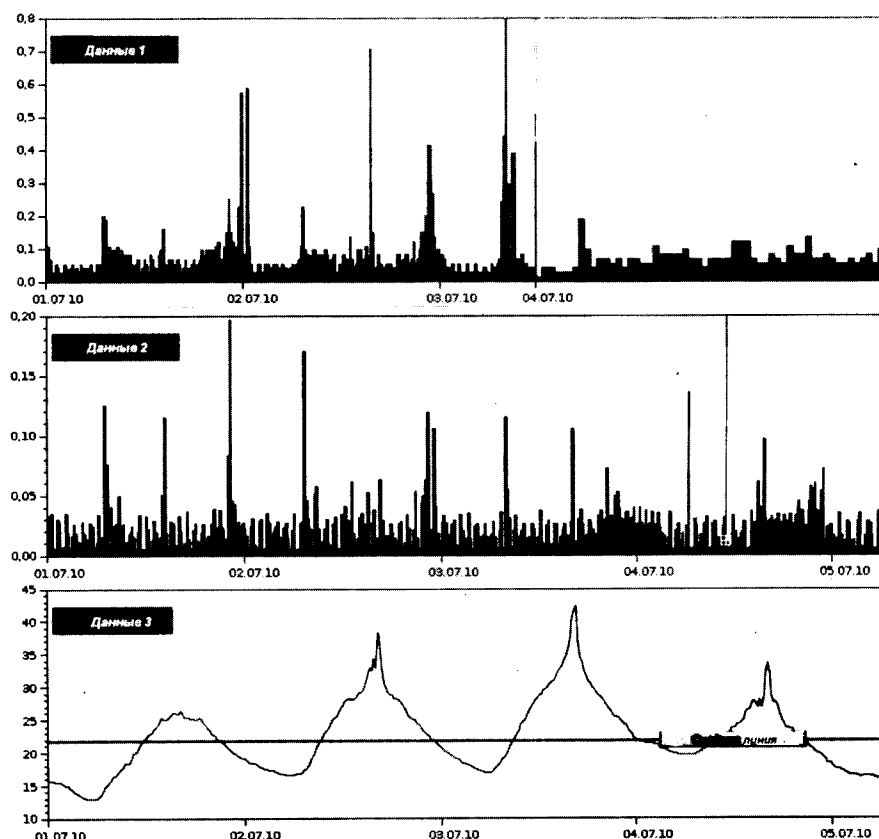


Рис. 3. Компонент JEChart

ных (возможны различные сроки действия при расчётах тарифов).

База данных организована на основе разделения на реестр (система) и свободное дерево (пользователь), при этом обеспечена интуитивная структура: поставщик — клиент — пользователь. Свободное дерево полностью настраиваемо для каждого пользователя с учётом требований персональной сортировки структуры; отсутствия ограничений числа слоёв в структуре дерева; позиционирования с помощью технологии drag-and-drop.

JEADFWeb — стандартизированная служба считывания данных энергопотребления, являющаяся одним инструментом для выполнения всех JEVIs работ. Реализована поддержка стандартных протоколов: HTTP; FTP; XML OPC; а также различных форматов данных, таких как статические JEVIs-совместимые форматы данных (на базе строк и столбцов) и динамические форматы данных, вводимые с использованием интерпретации маски.

Данный компонент тесно связан с центральной веб-службой, реализующей стандартные интерфейсы / протоколы: SOAP/AXIS 2, Java API и других библиотек. Использование реализаций стандартных протоколов позволяет легко включить новые методы (например, шлюзы) в существующие рамки информационной системы, предоставляет возможность бесплатного дизайна дополнения и сокращения времени для внешних разработчиков.

Система предусматривает расширенное управление правами пользователей: права пользователей могут быть определены для каждого объекта по-разному, что позволяет раз-

решать ситуации с приоритетом прав (например, права персонала над групповыми правами).

JEAlarm — модуль для автоматического контроля производственного процесса. В случае производственных неполадок, перебоев или ошибок в производственном процессе JEAlarm высылает соответствующее сообщение о неисправности посредством SMS, электронной почты или по факсу.

JEConfig — инструмент настройки, используемый для конфигурирования параметров системы и редактора расчёта для интерфейса Octave, который работает посредством модуля JECalc. Характерные черты интерфейса JECalc с Octave: открытый исходный код программы для численных расчётов, совместимый с Matlab; возможность осуществлять сложные вычисления; быстрая обработка для всех расчётов; сохранение формул и шаблонов; встроенные стандартные расчёты (например, максимальное, среднее, сортировка и т.д.).

Важнейшим модулем системы является сетевой компонент JENetwork, обладающий распределённой инфраструктурой (рис. 4). Благодаря этому модулю компоненты системы JEVIs можно устанавливать на разных вычислительных машинах, тем самым увеличивая вычислительную мощность.

Связь обеспечивается с помощью стандартных протоколов, а высокая безопасность передачи данных — за счёт использования шифрованной связи. Сеть обеспечивает двустороннюю связь между шлюзами данных и подсистемами JEVIs.

GPRS/UMTS based field devices
(e.g. VIDA, Beckhoff)

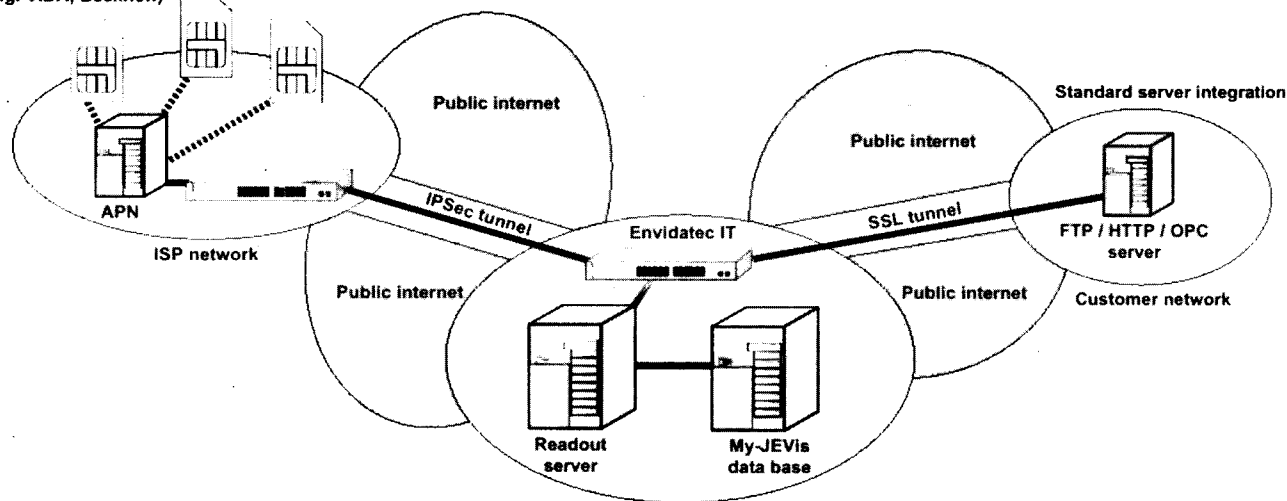


Рис. 4. Сетевая архитектура JENetwork

Выводы

1. Обзор энергетических и производственных показателей представляет реальную ценность для предприятия только тогда, когда полученные величины можно интерпретировать. Необходимую для этого платформу представляет портал My-JEVis. Заданные и фактические значения можно сравнивать друг с другом. Текущие данные можно сопоставить с результатами моделирования процесса.

2. Алгоритм выполнения энергоменеджмента по предложенной концепции, заключающийся в автоматизированном сборе информации с точек учёта энергопотребления, осуществлении технического нормирования и контроля отклонения фактического энергопотребления от технологически обоснованного уровня, представляется эффективным. Он может быть использован для оперативного выявления мест нерационального расходования энергии или непроизводительных потерь и их экономической оценки.

3. По мере развития центра компетенций «Envidatec GmbH» в России и аккумуляции

ноу-хау становится возможным идентифицировать ключевые факторы, определяющие необходимость обнаружения отклонений в энергопотреблении и начальной стадии развития энергетических потерь, формирования этапов оптимизации энергопотребления в зависимости от истории наблюдений. Перспективным представляется направление обследований крупных потребителей, что предусматривает Федеральный закон 261.

Список литературы

1. Крищенко А.В., Науменко С.Н. О системе энергетического менеджмента в стационарном хозяйстве ОАО «РЖД» // Вестник ВНИИЖТ. 2007. № 1.
2. Франк Т. Практика энергетического менеджмента // Энергосбережение. 2006. № 3.
3. Морт Т. Энергосбережение как процесс // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» (ЭСКО). 2003. № 7.
4. Кычкин А.В. Модель синтеза структуры автоматизированной системы сбора и обработки данных на базе беспроводных датчиков // Автоматизация и современные технологии. 2009. №1.
5. Герберт Шилдт. Полный справочник по Java. М.: Вильямс, 2007.

Автоматизация автономных многоагрегатных электростанций на основе нечёткого регулирования с применением нейронной технологии

ХИЖНЯКОВ Ю.Н., ЮЖАКОВ А.А.

Рассмотрены вопросы повышения качества вырабатываемой электроэнергии автономными многоагрегатными электростанциями с применением нечёткого регулирования напряжения, частоты и распределения активной и реактивной мощностей между агрегатами с применением нейронной технологии.

Ключевые слова: бесщёточный синхронный генератор, газотурбинный двигатель, регуляторы напряжения, регуляторы частоты, адаптивный нейрон, фаззификация, нейронная сеть.

В настоящее время вопросам развития электроэнергетики уделяется самое пристальное внимание. Сегодня 2/3 территории РФ не охвачены Единой энергосистемой. В связи с этим появился интерес к разработке альтернативных источников энергии: химической, ветровой, солнечной, геотермальной и т.д. Из экономической целесообразности в местах разработки природных ископаемых нашли ши-

The problems of improving the quality of electricity generated by power plants autonomous mnogoagregatnyms based on fuzzy control voltage, frequency and distribution of active and reactive power between the units with neural technology.

Key words: brushless synchronous generator, turbine engine, voltage regulators, frequency regulators, the adaptive neuron, fazzifikatsiya, neural network.

рокое применение автономные многоагрегатные электростанции (АМЭС), задача которых обеспечить производство электроэнергии высокого качества в условиях ограниченной мощности и бесперебойного питания потребителей. Качество вырабатываемой электроэнергии определяется точностью регулирования напряжения и частоты на шинах, а в случае параллельной работы агрегатов – и точностью

распределения реактивной и активной мощности.

Напряжение [1], являясь составляющей вектора качества производимой электроэнергии АМЭС, определяется балансом реактивной мощности. Источником колебаний напряжения служат мощные потребители реактивной мощности. Так, снижение напряжения на шинах АМЭС уменьшает в квадратичной зависимости вращающий момент асинхронного двигателя (АД) и его производительность. «Сильные» возмущения могут вызвать недопустимо большое время первого восстановления напряжения на шинах, что может привести к отключению ответственных приводов, к режиму работы АД с повышенным скольжением. Поддержание заданного качества этого параметра возможно только за счёт применения новых методов управления АМЭС, что не обеспечивают существующие методы управления.

Частота [2, 3], являясь составляющей вектора качества производимой электроэнергии АМЭС, определяется балансом активной мощности. При возникновении дефицита генерируемой мощности в автономной системе происходит снижение частоты. Номинальное значение частоты 50 Гц может быть обеспечено при наличии резерва активной мощности АМЭС. Частота переменного тока определяется как среднеарифметическая частота вращения генераторов АМЭС. Снижение частоты питающего напряжения на шинах АМЭС увеличивает токи в статоре и роторе АД, уменьшает частоту вращения и охлаждение АД, повышает потребление реактивной мощности станции и снижает КПД АМЭС. Тяжесть последствий от данных возмущений определяется чёткостью работы устройств защиты генераторов и АД и зависит от жёсткости внешних характеристик бесщёточного синхронного генератора (БЩСГ).

Параллельная работа БЩСГ – базовый режим АМЭС [4] и в настоящее время осуществляется методом статических характеристик (МСХ), методом мнимостатических характеристик (ММСХ) и методом базового генератора (МБГ). МСХ управления параллельной работой генераторов со статическими внешними характеристиками (статизм 6%) характеризуется высоким быстродействием, но исключает раздельное регулирование напряжения и частоты и распределение реактивной и активной мощности между генераторами. Это непосредственно влияет на качество регулирования на-

пряжения и частоты на шинах АМЭС. Управление ММСХ путём смещения статических внешних характеристик (статизм 6%) мало пригодно в АМЭС из-за инерционного управления. Управление с помощью МБГ исключает равное участие БЩСГ в распределении реактивной и активной мощности, так как в первую очередь нагрузку принимает базовый БЩСГ с последующим перераспределением нагрузки на ведомые БЩСГ. Базовый генератор должен иметь астатическую внешнюю характеристику, быть более мощным по отношению к ведомым генераторам с внешними характеристиками со статизмом 6%.

Управление технологическими процессами производства электроэнергии АМЭС характеризуется следующими особенностями: ограничение воспроизводимой мощности; параллельная работа малого числа генераторов; непрерывность процесса производства электроэнергии; отсутствие возможности запаса электроэнергии; непрерывное изменение в нестационарных режимах потребления генерируемой электроэнергии.

С этих позиций АМЭС – сложная нелинейная динамическая система, что требует для регулирования напряжения и частоты использовать П-, ПИ-, ПИД-регуляторы. Настройка регуляторов из-за отсутствия точного математического описания регулируемого объекта осуществляется, например методом Циглера-Николса [5]. В процессе эксплуатации регуляторам требуется постоянная коррекция настроек, что в итоге снижает качество регулирования напряжения и частоты АМЭС.

Таким образом, в качестве главных и перспективных задач повышения качества вырабатываемой электроэнергии АМЭС следует принять:

- разработку нечёткого регулирования напряжения и частоты с применением нейронной технологии;
- разработку нового метода управления параллельной работой БЩСГ с квазиастатическими внешними характеристиками в автономном режиме.

Согласно нормативным документам [6, 7] допустимые значения отклонения напряжения в АМЭС должны быть не хуже 1–2% номинального значения напряжения, поддержание частоты не хуже 0,5–1,0% номинального значения частоты, распределение мощности между генераторами не хуже 5–10% номинального значения мощности.

Рассмотрим возможные направления решения сформулированных задач повышения качества электроэнергии.

Регулирование напряжения в АМЭС. В АМЭС для регулирования напряжения БЩСГ применяется регулятор, например типа КОСУР-220, реализующий комбинированный принцип регулирования с применением ПИД-закона регулирования [8]. Для формирования желаемого переходного процесса необходим расчёт оптимальных настроек ПИД-регулятора, который в случае динамических нелинейных объектов (БЩСГ) остаётся открытым. В связи с этим разработана методика проектирования нечёткого регулятора напряжения (рис. 1) с применением нейронной технологии БЩСГ на базе адаптивных нейронов [9].

Нечёткий регулятор напряжения БЩСГ на базе нейронной технологии состоит из фаззификатора и нейронной сети (НС) на базе адаптивных нейронов. Терм-множество фаззификатора регулятора напряжения формирует

входные векторы по отклонению напряжения, производной отклонения напряжения и реактивному току статора. НС, показанная на рис. 2, состоит из трёх адаптивных нейронов с алгоритмом адаптации Уидроу-Хоффа и выходного нейрона. Входной (распределительный) слой НС, образованный входными векторами, задаёт информацию в виде степеней принадлежности терм-множества для обработки адаптивными нейронами по отклонению напряжения, производной отклонения напряжения и реактивному току статора. Суть адаптации состоит в следующем.

На базе каждого нейрона создаётся следящая система, заданием которой является случайная величина, например, отклонение напряжения от заданного значения. Задача следящей системы, изменяя коэффициенты (синапы) нейрона, отрабатывать отклонения между выходом сумматора соответствующего нейрона и заданием его следящей системы с помощью итерационной процедуры с переменным шагом. Воздействие выхода данного ней-

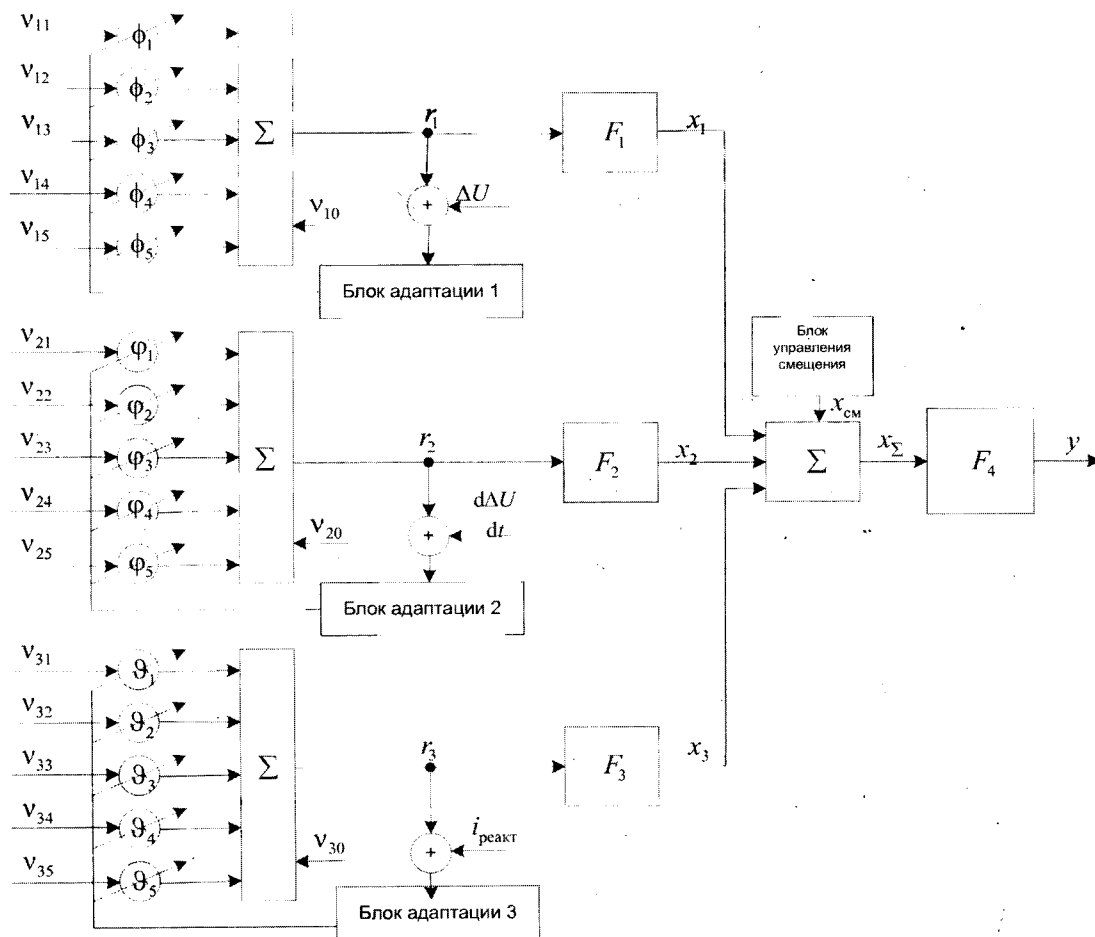


Рис. 1. НС регулятора напряжения: F_1, F_2, F_3 – активационные функции гиперболического тангенса адаптивных нейронов скрытого слоя; F_4 – активационная функция нейрона выходного слоя НС; $x_{см}, v_{10}, v_{20}, v_{30}$ – «нейронные смещения» ($v_{10} = 0, v_{20} = 0, v_{30} = 0$)

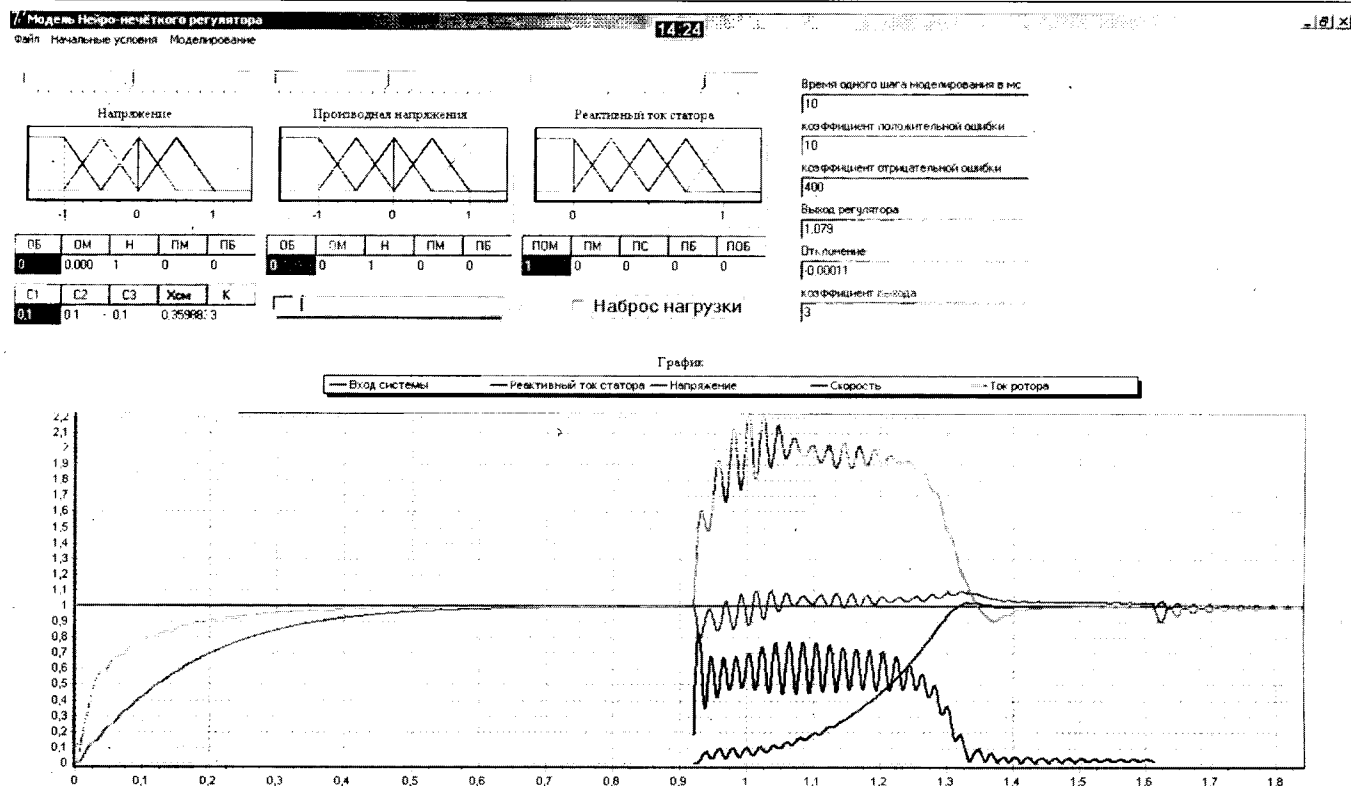


Рис. 2. Интерфейс и осциллограмма процесса возбуждения БЩСГ и пуска АД с нейро-нечётким регулятором напряжения

рона через активационную функцию и выходной нейрон НС, изменяя ток возбуждения БЩСГ, парирует текущее отклонение от заданного значения с учётом инерционности системы и сводит отклонение напряжения до нуля. В процессе адаптации происходит коррекция наклона соответствующей активированной термы терм-множества фазификатора данного нейрона.

На рис. 3 приведён интерфейс и осциллограмма процесса возбуждения БЩСГ и пуска АД с нечётким регулятором напряжения с применением нейронной технологии.

Нечёткий регулятор с применением нейронной технологии обеспечивает устойчивый переходный процесс, сокращая время первого восстановления напряжения в три раза по отношению к регулятору напряжения типа КОСУР-220. Данный регулятор напряжения обеспечивает быстрое действие, астатизм и адаптивность в САР к внешним и внутренним возмущениям и полностью отвечает требованиям точности поддержания напряжения на шинах БЩСГ АМЭС.

Регулирование частоты в АМЭС. В настоящее время регулирование частоты ГТД осуществляется неадаптивным электронным регулятором двигателя (РЭД), содержащим контуры управления различными параметрами (темпе-

ратура, давление и т.д.), и основано на применении ПИД закона регулирования. Для придания РЭД адаптивных свойств рассмотрим нечёткий регулятор частоты на базе нейронной технологии [10], у которого определены три лингвистических переменных: отклонение частоты вращения турбокомпрессора низкого давления от заданного значения, производная изменения ошибки и активная составляющая тока статора БЩСГ. Каждая лингвистическая переменная представлена в виде терм-множеств из семи линейных терм каждое, отвечающих требованиям полноты, непротиворечивости и непрерывности. Результаты имитационного моделирования контура турбокомпрессора низкого давления при ступенчатом возмущении частоты вращения с нечётким регулятором частоты на основе нейронной технологии показали, что время переходного процесса уменьшилось в два раза, а максимальное динамическое отклонение частоты вращения турбины — в 5 раз по сравнению с ПИД-регулятором. Снижение провала частоты и сокращение времени первого восстановления частоты связано с включением динамического контура по сигналу, пропорциональному активной составляющей тока нагрузки, что позволяет упреждающе парировать провал частоты вращения компрессора низкого давления при

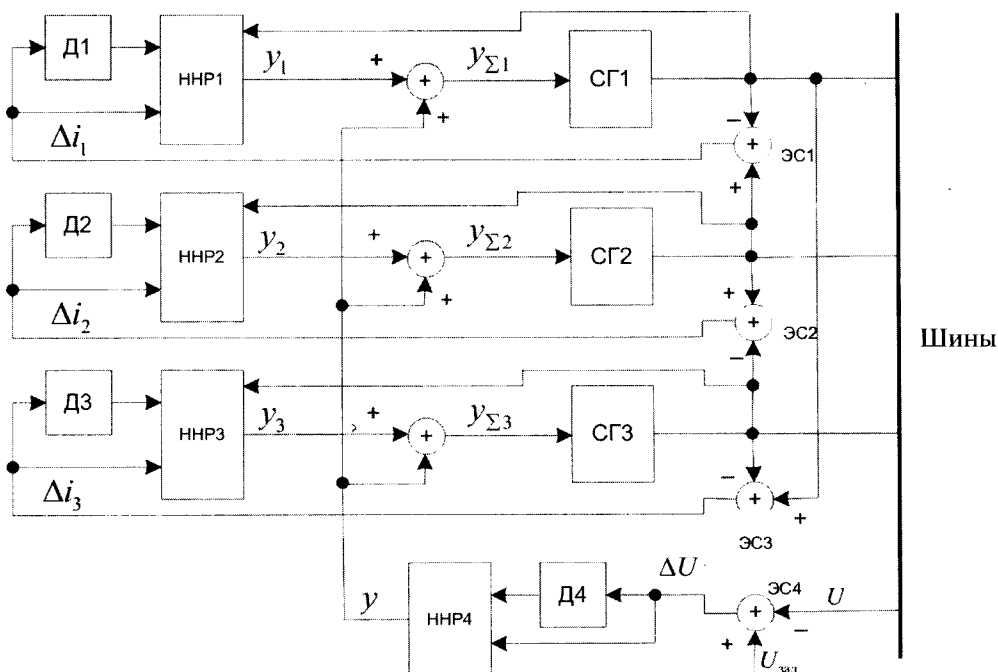


Рис. 3. Структурная схема нечёткого управления параллельной работой БЩСГ в АМЭС с применением нейронной технологии

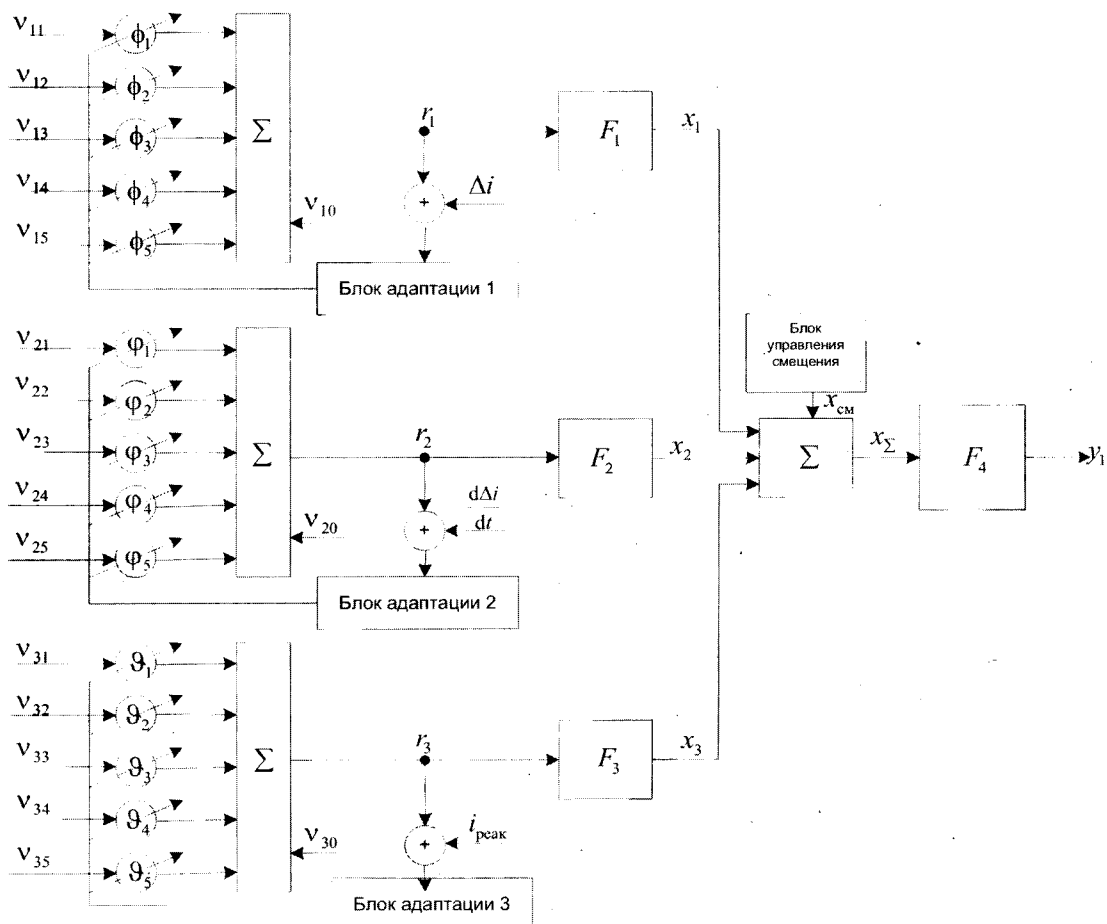


Рис. 4. НС НРУТ: F_1, F_2, F_3 – активационные функции гиперболического тангенса адаптивных нейронов скрытого слоя; F_4 – активационная функция нейрона выходного слоя НС; $x_{см}, v_{10}, v_{20}, v_{30}$ – «нейронные смещения» ($v_{10} = 0, v_{20} = 0, v_{30} = 0, x_{см} = 0$)

наличии тормозного момента со стороны БЩСГ. САР поддержания частоты вращения турбины компрессора низкого давления отвечает заданным требованиям качества поддержания частоты в ГТЭС.

Распределение нагрузки между генераторами АМЭС. Структурная схема нечёткого метода управления параллельной работой БЩСГ с квазиастатическими внешними характеристиками [11] с применением нейронной технологии приведена на рис. 3 и содержит нечёткий регулятор напряжения (НРН) на основе нейронной технологии с заданным значением напряжения на автономных шинах и нечёткий регулятор уравнивающего тока (НРУТ) на основе нейронной технологии с последующей композицией их выходов для формирования токов возбуждения БЩСГ при условии равного распределения активной нагрузки между агрегатами.

Фаззификация j -НРУТ выполняется с помощью терм-множеств по отклонению уравнивающего тока, производной отклонения уравнивающего тока и реактивного тока статора, каждое из которых состоит, например, из пяти линейных термов, отвечающих требованиям непрерывности, непротиворечивости и полноты. НС НРУТ состоит из трёх нейронов, адаптация которых выполняется итерационной процедурой с переменным шагом (алгоритм Уидроу-Хоффа), и выходного нейрона [12]. На рис. 4 приведена НС НРУТ.

В НРН для статической коррекции коэффициента усиления введены ручные регуляторы для сжатия/растяжения терм-множеств фаззификатора, введена статическая коррекция смещения характеристики выходного нейрона НС для придания регулятору астатических свойств. Итерационная процедура смещения выходного нейрона НС связана с нелинейностью БЩСГ. Введение динамической коррекции с помощью степенной активационной функции выходного нейрона повышает быстродействие НРН. Выход НРН u в сумме с выходом u_i i -го НРУТ управляет возбуждением параллельно работающего i -го БЩСГ. Знак

слагаемых формируется с учётом отрицательной обратной связи: при результирующем знаке «минус» токи в роторах БЩСГ будут возрастать, а при знаке «плюс» — уменьшаться.

Выводы

1. Разработан нечёткий регулятор напряжения БЩСГ с применением нейронной технологии для автоматизации современных АМЭС.

2. Создан нечёткий регулятор частоты вращения ГТД с применением нейронной технологии для автоматизации газотурбинных АМЭС.

3. Предложен нечёткий метод распределения нагрузки между генераторами с квазиастатическими внешними характеристиками с применением нейронной технологии, повышающий качество вырабатываемой электроэнергии АМЭС.

Список литературы

1. Веников В.А. и др. Регулирование напряжения в энергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. М.: Энергия, 1975.
3. Павлов Г.М. Автоматизация энергетических систем: Учеб. пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976.
4. Москалев А.Г. Автоматическое регулирование режима электрической системы по частоте и активной мощности. М.-Л.: ГЭИ, 1960.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом. М.: Горячая линия — Телеком, 2009.
6. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск: ИПК Изд-во стандартов, 1998.
7. Карташов И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
8. Разработка динамической структуры контуров управления электронного регулятора РЭД: технический отчет ОАО «СТАР», 1994. № 94388.
9. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейро-нечеткий регулятор напряжения бесщеточного синхронного генератора без демпферной обмотки // Приборостроение. 2011. № 7. С. 150–156.
10. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейро-нечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. 2010. № 5. С. 17–21.
12. Андриевская Н.В., Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Адаптивное управление параллельной работой синхронных генераторов // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2010. № 10. С. 45–50.

Экспериментальное исследование управления потоком реактивной мощности в электрической системе с трёхобмоточным трансформатором

КУЗНЕЦОВ М.И., РОМОДИН А.В., КОСТЫГОВ А.М.

Рассмотрено описание экспериментальных предпосылок к разработке нового подхода управления перетоками реактивной мощности в электроэнергетической системе, имеющей в своём составе трёхобмоточный силовой трансформатор, при подключении к одной из вторичных обмоток трансформатора источника реактивной мощности.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, компенсация реактивной мощности, управление потоками реактивной мощности, трёхобмоточный трансформатор.

Электроэнергетические системы представляют собой множество сложных взаимосвязанных между собой нелинейных объектов [1–3]. Управление такими системами, как правило, связано с управлением дефицитом и избытком активной мощности. В [4] предложен подход к управлению перетоками активной мощности в электроэнергетической системе, содержащей два источника. Суть данного подхода заключается в фазовом смещении трёхфазной системы на одной из обмоток трёхобмоточного трансформатора, что позволяет плавно регулировать поток активной мощности, проходящий через этот трансформатор, т.е. отдавать либо потреблять активную мощность из энергосистемы.

Однако в электроэнергетических системах наряду с потоками активной мощности также циркулируют потоки реактивной мощности, влияющие на коэффициент активной мощности ($\cos\varphi$) и потери (ΔP) в элементах сети [5].

Целью данной статьи является описание экспериментальных предпосылок к разработке нового подхода к управлению перетоками реактивной мощности в электроэнергетической системе, содержащей один или несколько силовых трёхобмоточных трансформаторов, при подключении компенсирующего устройства (конденсаторной батареи) к одной из обмоток низшего напряжения.

Такой подход наряду с использованием автоматического регулирования ёмкости конденсаторной батареи позволит [6,7]:

The description of experimental preconditions to working out of the new approach of management by reactive power overflows in an electropower system having in the structure the three-winding mains transformer is considered, at connection to one of secondary windings of the transformer of a source of a reactive power.

Key words: electrical power system, reactive power indemnification, management of reactive power streams, the three-circuit transformer.

1. Поддерживать, при изменении нагрузки трансформатора, $\cos\varphi$, равный заданному энергосистемой значению. При этом потребляемый трансформатором ток из питающей сети будет минимальным.

2. С увеличением ёмкости конденсаторных батарей трансформатор может отдавать реактивную мощность в сеть.

3. Трансформатор с таким подключением источника реактивной мощности может работать в режиме U -образных характеристик (подобен синхронному двигателю при $i_{\text{возб}} = \text{var}$ и $P = \text{const}$).

Проведение эксперимента управления потоком реактивной мощности

Для подтверждения возможности реализации режимов управления реактивной мощностью были проведены экспериментальные исследования на трёхобмоточном трансформаторе мощностью 2,5 кВ·А, к одной из обмоток которого подключена батарея конденсаторов, соединённых в треугольник.

Эксперимент проведён для двух значений ёмкости конденсаторных батарей, собранных по схеме треугольник, – 4 и 8 мкФ на каждую фазу. На первичную обмотку трансформатора (I) подавалось 384 В. К вторичной обмотке II (напряжением 210 В, коэффициент трансформации $k_{12}=1,829$) подключён асинхронный двигатель (АД), нагруженный генератором постоянного тока. Обмотка трансформатора III

(напряжением 360 В, коэффициент трансформации $k_{13}=1,067$) использовалась как «компенсационная». Токи и напряжение «компенсационной» обмотки измерялись амперметром и вольтметром переменного тока. Активная мощность измерялась методом двух ваттметров. Исследования проводились как для режима ХХ трансформатора, так и при различных значениях нагрузки АД. При построении векторных диаграмм не учитывалось падение напряжения в первичной обмотке трансформатора.

Результаты измерения режима ХХ трансформатора представлены в табл. 1.

На рис. 1 представлена векторная диаграмма токов¹ по данным табл. 1 (при подключении к «компенсационной» обмотке 4 и 8 мкФ).

При анализе векторной диаграммы видно, что если $0 < \varphi < \pi$, то реактивная мощность потребляется из сети. При $\varphi > \pi$, реактивная мощность отдаётся в сеть первичной обмоткой (на рис. 1 токи I_{01} и I_{02}). Экспериментально было проведено исследование при трёх нагрузках АД и ёмкости 4 и 8 мкФ на фазу.

При постоянной нагрузке АД активная составляющая тока первичной обмотки трансформатора остаётся неизменной (рис. 2–5).

Таблица 1

Результаты измерения режима ХХ

U_L , В	P_0 , Вт	I_0 , А	$\cos \varphi_0$	φ_0 , град	Примечание	«Компенсационная» обмотка		
						U_K , В	I_{K3} , А	I'_{K3} , А
384	60	0,343	0,2630	75	ХХ без подключения ёмкости	-	-	-
384	58	0,397	0,2199	77	Подключена батарея 4 мкФ	340	0,75	0,703
384	72	1,193	0,0908	84,8	Подключена батарея 8 мкФ	340	1,46	1,400

Таблица 2

Результаты измерения нагрузочного режима АД

Первичная обмотка трансформатора				Мощность АД	«Компенсационная» обмотка			
P_1 , Вт	I_1 , А	$\cos \varphi$	φ , град	$P_{дв}$, Вт	I_{K3} , А	I'_{K3} , А	U_K , В	Ёмкость, мкФ
200	0,867	0,344	70	130	-	-	-	-
238	0,433	0,827	36,2	130	0,75	0,703	372	4
204	0,687	0,447	63,5	126	1,46	1,400	372	8

Таблица 3

Результаты измерения нагрузочного режима АД

Первичная обмотка трансформатора				Мощность АД	«Компенсационная» обмотка			
P_1 , Вт	I_1 , А	$\cos \varphi$	φ , град	$P_{дв}$, Вт	I_{K3} , А	I'_{K3} , А	U_K , В	Ёмкость, мкФ
610	1,250	0,7270	43,4	530	-	-	-	-
591	0,893	0,9962	4,9	540	0,75	0,703	372	4
608	1,033	0,8860	27,6	530	1,46	1,400	360	8

Таблица 4

Результаты измерения нагрузочного режима АД

Первичная обмотка трансформатора				Мощность АД	«Компенсационная» обмотка			
P_1 , Вт	I_1 , А	$\cos \varphi$	φ , град	$P_{дв}$, Вт	I_{K3} , А	I'_{K3} , А	U_K , В	Ёмкость, мкФ
1160	2,050	0,8430	32,5°	1040	-	-	-	-
1120	1,720	0,9802	11,0°	990	0,75	0,703	372	4
1024	1,553	0,9925	7,0°	930	1,46	1,400	360	8

¹ Диаграммы построены по линейному току компенсационной обмотки.

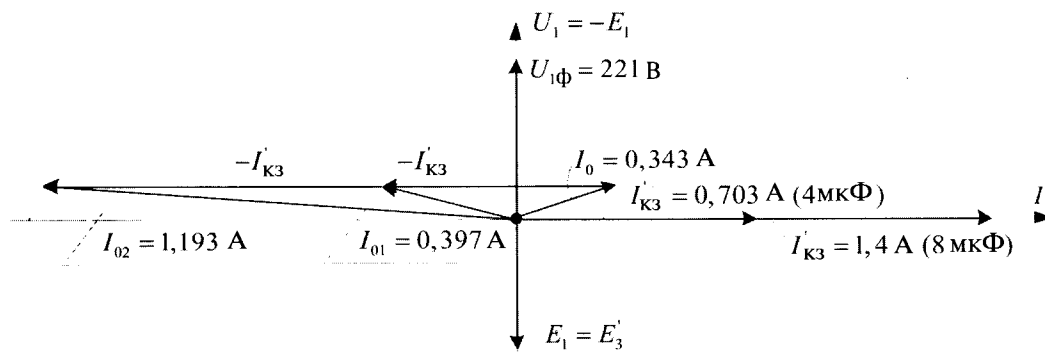


Рис. 1. Векторная диаграмма токов при XX ($P_{\text{дв}} = 0$), $I'_{\text{к3}} = 0,703$ и $I'_{\text{к3}} = 1,4$ А

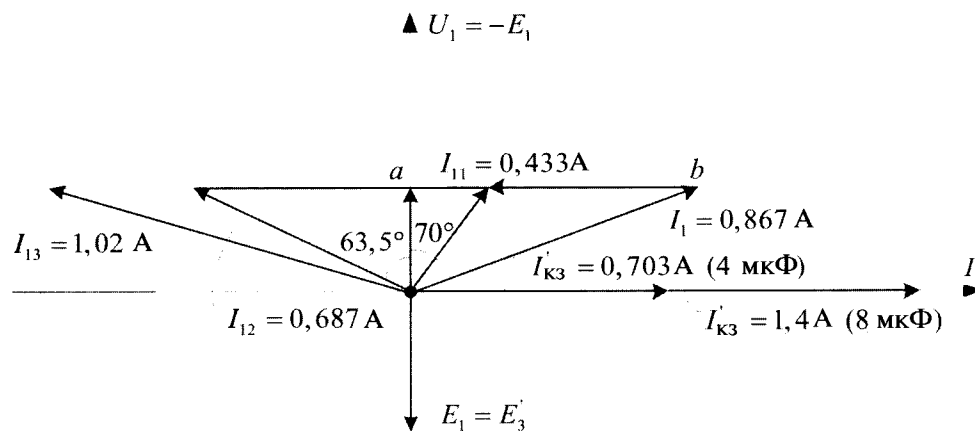


Рис. 2. Векторная диаграмма токов при $P_{\text{дв}} = 130 \text{ Вт} = \text{const}$, $C_1 = 4 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 8 \text{ мкФ}$

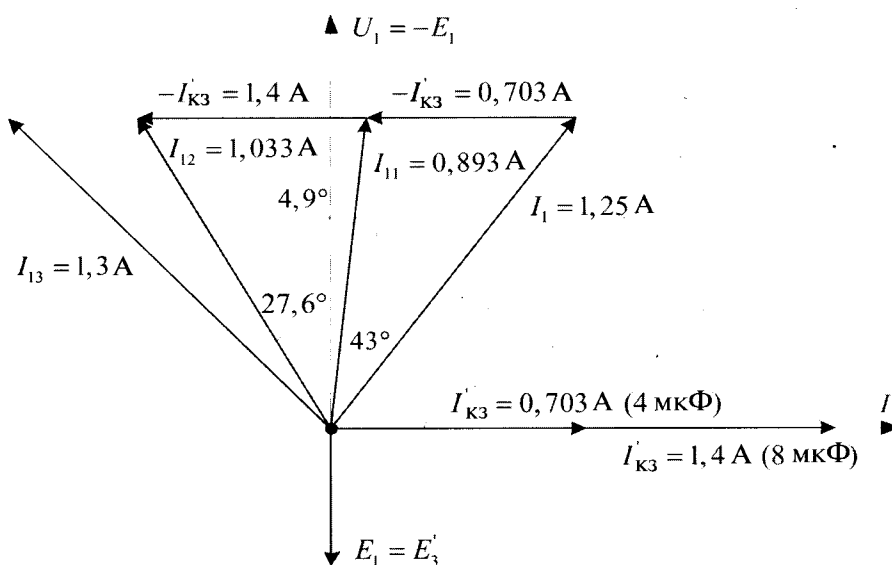


Рис. 3. Векторная диаграмма токов при $P_{\text{дв}} = 530 \text{ Вт} = \text{const}$, $C_1 = 4 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 8 \text{ мкФ}$

На рис. 2 представлена векторная диаграмма токов при постоянной мощности АД ($P_{\text{дв}} = 130 \text{ Вт}$), диаграмма построена по данным табл. 2.

Из векторной диаграммы рис. 2 видно, что при нагрузке $P_{\text{дв}} = 130 \text{ Вт}$ и токе $I'_{\text{к3}} = 0,703 \text{ А}$

ток I_{11} первичной обмотки отстаёт от напряжения, при этом реактивный ток потребляется из сети, но он много меньше тока I_1 без конденсатора. При ёмкости $C_2 = 8 \text{ мкФ}$ ток I_{12} опережает напряжение U_1 , следовательно, реактивный ток будет отдаваться трансформато-

ром в сеть. Если ток I_{K3} равен отрезку ab , то ток I_1 совпадает по фазе с напряжением U_1 и $\cos \varphi = 1$. Ёмкостный ток I'_{K3} опережает ЭДС E'_3 на 90° .

На рис. 3 представлена векторная диаграмма токов при постоянной мощности АД $P_{дв} = 530$ Вт, построенная по данным табл. 3.

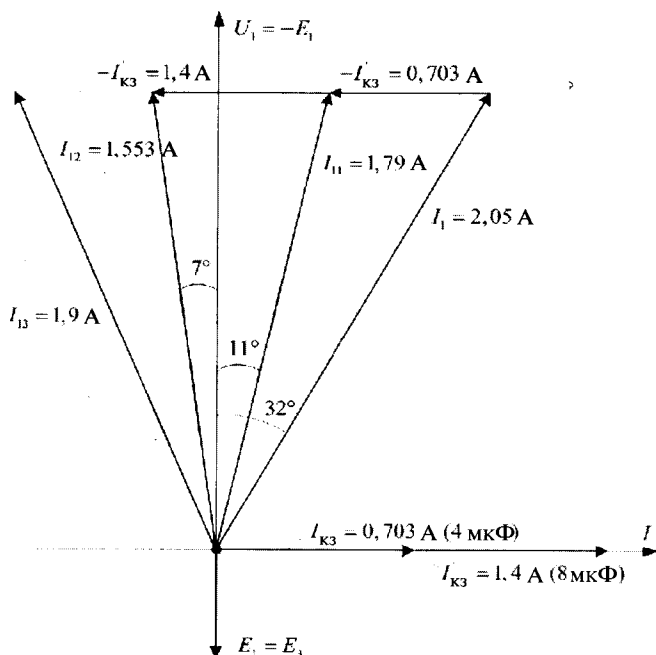


Рис. 4. Векторная диаграмма токов при $P_{дв} = 990$ Вт = const, $C_1 = 4$ мкФ и $C_2 = 8$ мкФ

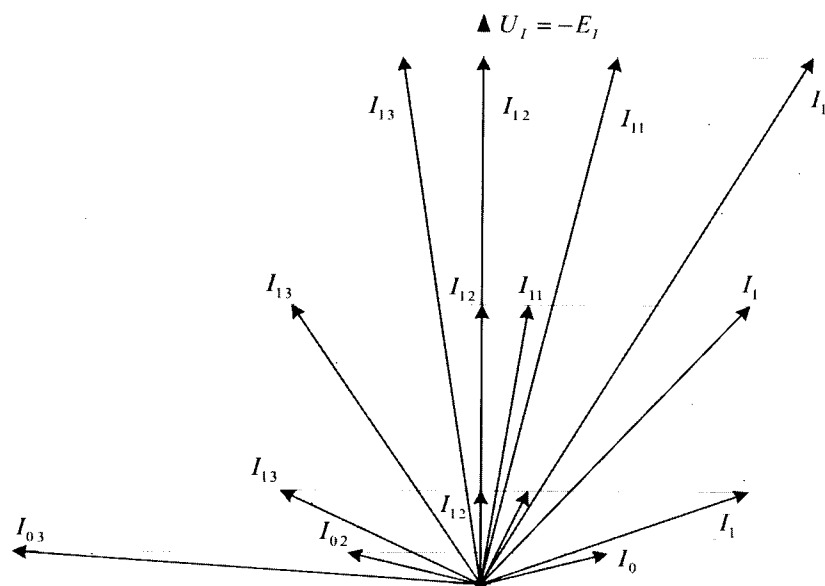


Рис. 5. Общая диаграмма трансформатора с «компенсационной» обмоткой

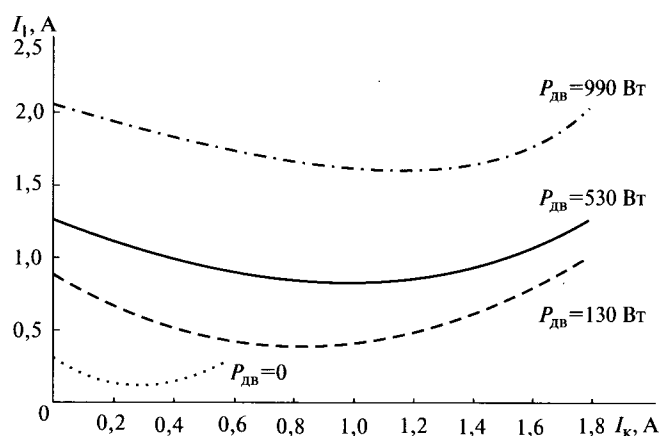


Рис. 6. U-образные характеристики трёхфазного трансформатора с «компенсационной» обмоткой

На рис. 4 представлена векторная диаграмма при постоянной мощности АД $P_{дв} = 990$ Вт, построенная по данным табл. 4.

Анализ представленных на рис. 1–4 диаграмм при различной нагрузке трансформатора позволяет представить общую диаграмму трёхобмоточного силового трансформатора с «компенсационной» обмоткой (рис. 5), которая аналогична диаграмме синхронного двигателя при переменном возбуждении и постоянной мощности. При построении обобщённой диаграммы трансформатора с «компенсационной» обмоткой в режиме U-образных характеристик использовался ток I_K , значение которого определяется ёмкостью. При этом минимальный ток I_1 первичной обмотки $I_{1a} = I_1 \cos \varphi$.

На рис. 6 область слева от минимальной точки каждой характеристики соответствует недовозбуждённому режиму, при котором трансформатор потребляет из сети реактивную мощность, область справа — отдаче реактивной мощности в сеть трансформатором.

Выводы

1. Изменяя значение ёмкости, включённой в «компенсационную» обмотку, можно регулировать (поддерживать на заданном уровне) поток реактивной мощности, проходящий через трансформатор из внешней питающей сети к потребителям. Возможны режимы как потребления реактивной мощности, так и её генерации во внешнюю сеть.

2. Изменяя значение ёмкости, а следовательно, и ток I_K можно получить U -образные характеристики трансформатора с «компенсационной» обмоткой.

Список литературы

1. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985.
2. Ульянов С.Л. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970.

3. Петроченков А.Б., Ромодин А.В. Комплекс «Энергооптимизатор» // Электротехника. 2010. №6. С.49–54.
4. Ромодин А.В., Кузнецов М.И. Экспериментальное исследование управления потоком активной мощности в системе с двумя источниками питания // Электротехника. 2010. №6. С.44–49.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.: Госэнергоиздат, 1963.
6. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Т1, Т2. М.: МЭИ, 2004.

О методах построения моделей отказов сложных систем

ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б., СОЛОДКИЙ Е.М.

Приводятся основные методы оценки моделей отказов сложных систем, которые могут быть положены в основу комплексного анализа состояния электротехнических комплексов.

Ключевые слова: модель отказов, дерево решений, байесовская сеть.

Для оценки надёжности, безопасности и отказоустойчивости сложной системы строится модель отказов, которая характеризуется следующими показателями: функция надёжности, средняя наработка на отказ, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов. Эти показатели характеризуют надёжность невосстанавливаемых компонентов, т.е. тех систем или отдельных узлов, которые рассматриваются до первого отказа. Указанное допущение не характеризует свойство объекта, но выделяет временной интервал, в котором заинтересован наблюдатель. Для такого подхода «время жизни» системы может быть описано одним из известных законов распределения вероятности. Данный закон определяет несколько функций, с помощью которых характеризуются вероятностные оценки состояния системы. К этим функциям относятся: функция распределения $F(t)$ — время до отказа, плотность распределения $f(t)$ — плотность отказов, $R(t)$ — функция надёжности, $z(t)$ — интенсивность отказов. По любой одной функции можно восстановить любую другую (табл. 1).

Решение задачи по определению закона распределения отказов и его параметров даёт возможность найти любую характеристику надёжности компоненты системы. Задача сводится к проверке статистических гипотез на

The basic methods of a mark of models of refusals of difficult systems which can be taken as a principle the complex analysis of a condition of electrotechnical complexes are resulted.

Key words: model of refusals, a tree of decisions, bayesian network.

подготовленных опытных данных с использованием одного из критериев согласия (Пирсона, Колмогорова, Фишера и т.д.).

Исходя из статистики, накопленной по отдельным узлам системы, можно сопоставить каждый вид компонента системы с определённым законом интенсивности отказов, принимая его за постоянную величину при минимальном статистическом наборе. Влияние внешних неблагоприятных факторов на систему в данном случае не может быть определено, поэтому закон распределения и его параметры могут быть найдены некорректно. Выходом из такой ситуации может быть использование справочных данных по аналогам компонентов системы. Знание компонента надёжности не может дать представления о надёжности системы в целом. Для анализа всей системы необходимо иметь представление о её структуре и внутренних функциональных связях. Рассмотрим основные методы качественного анализа системы.

Согласно [1] процедура анализа надёжности включает в себя стадии качественного и количественного анализа. Качественный анализ опирается на описание системы через функциональные блоки и предполагает выполнение функционального анализа системы. Для этих целей существуют несколько видов диаграмм, которые описывают систему через структур-

Зависимость функций, характеризующих надёжность

Функция	$F(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$z(t)$
$F(t) =$	$F(t)$	$\int_0^t f(u)du$	$1 - F(t)$	$1 - \exp\left(-\int_0^t z(u)du\right)$
$f(t) =$	$\frac{d}{dt} F(t)$	$f(t)$	$-\frac{d}{dt} R(t)$	$z(t) \exp\left(-\int_0^t z(u)du\right)$
$R(t) =$	$1 - F(t)$	$\int_t^\infty f(u)du$	$R(t)$	$\exp\left(-\int_0^t z(u)du\right)$
$z(t) =$	$\frac{\frac{d}{dt} F(t)}{1 - F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(u)du}$	$-\frac{d}{dt} \ln R(t)$	$z(t)$

ные и функциональные связи, в частности, диаграммы функциональных блоков были использованы в концепции производства, основанного на надёжности [2]. Функциональный анализ также может включать разработку диаграмм функциональных деревьев и диаграмм, построенных по принципу системного функционального анализа (FAST [3]).

Для создания функциональной модели системы широкое применение получила методология структурного проектирования (SADT), что, по сути, является стандартом графического моделирования нотации IDEF0. Описание данной методологии в контексте функционального анализа надёжности приведено в [3]. Методология SADT может использоваться для моделирования широкого круга систем и определения требований и функций. Для уже существующих систем методология SADT может быть использована для анализа функций, выполняемых системой, а также для указания механизмов, посредством которых они осуществляются.

В стандарте [4] приведены общие методы, которые могут быть использованы для анализа надёжности технической системы. Данные методы приведены в табл. 2. Первые две строки табл. 2 относятся к методам, подразумевающим качественный анализ системы, в котором для определения надёжности системы в целом рассматриваются, в том числе, зависимости и связи между её компонентами. Наиболее информативным, с точки зрения описания существующей системы, является метод анализа дерева неисправности [1].

Данный подход подразумевает разделение системы на основные блоки и выделение связей между компонентами системы, отказ которых может привести к общему отказу всей

системы. На рис. 1 показан пример выделения блоков электронной системы оповещения и построения дерева неисправности.

Компоненты системы могут быть исследованы методами диагностики, приведёнными в [5]. Вывод о том, в каком состоянии находится компонент системы, может быть получен точными и вероятностными методами. При точном выводе для определения состояния системы рассматривается множество сигнальных систем (симптомов) B_1, B_2, \dots, B_m , связанных с состояниями системы A , где m — количество таких рассматриваемых систем. Для системы A , имеющей n возможных состояний (диагнозов), с вероятностями $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_n)$ информативность симптомов относительно вывода находится по следующей формуле:

$$J_A(B_i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l P(A_j B_{ik}) \log_2 \frac{P(A_j B_{ik})}{P(A_j) P(B_{ik})}.$$

В частности, для системы A возможными исходами могут быть всего два несовместных события: исправное состояние A_1 и неисправное A_2 . Используя формулу информативности симптомов, возможно построить оптимальное дерево решений, где наиболее информативные симптомы будут располагаться ближе к его корню.

Метод преобразования дерева решений в правила вида “если <условие> то <вывод>” рассматривается в [6]. Такое преобразование может являться основой для экспертной базы знаний по полученной статистической информации.

В условиях неопределённой информации во многих случаях вывод о состоянии компонентов системы не может быть строго определён, но может быть найден вероятностно (имеет место так называемый вероятностный вывод).

Таблица 2

Методы для решения общих задач анализа надёжности

Метод	Распределение требований/целей надёжности	Качественный анализ	Количественный анализ	Рекомендации
Прогнозирование интенсивности отказов	Применим для последовательных систем без резервирования	Возможно применение для анализа стратегии технического обслуживания	Вычисление интенсивностей отказов и МТТФ для электронных компонентов и оборудования	Поддержка
Анализ дерева неисправностей	Применим, если поведение системы зависит от времени или последовательности событий	Анализ комбинации неисправностей	Вычисление показателей безотказности работоспособности и относительного вклада подсистем в системы	Применим
Анализ дерева событий	Возможен	Анализ последовательности отказов	Вычисление интенсивностей отказов системы	Применим
Анализ структурной схемы надёжности	Применим для систем, у которых можно выделить независимые блоки	Анализ путей работоспособности	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надёжности системы	Применим
Марковский анализ	Применим	Анализ последовательности отказов	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надёжности системы	Применим
Анализ сети Петри	Применим	Анализ последовательности отказов	Подготовка описания системы для марковского анализа	Применим
Анализ режимов и последствий (критичности) отказов FME(C)A	Применим для систем, у которых преобладают единичные отказы	Анализ воздействия отказов	Вычисление интенсивностей отказов (и критичности) системы	Применим
Исследование HAZOP	Поддержка	Анализ причин и последствий отклонений	Не применим	Поддержка
Анализ человеческого фактора	Поддержка	Анализ воздействия действий эффективности человека на работу системы	Вычисление вероятностей ошибок человека	Поддержка
Анализ прочности и напряжений	Не применим	Применим как средство для предотвращения неисправности	Вычисление показателей безотказности для электромеханических компонентов	Поддержка
Таблица истинности (анализ функциональной структуры)	Не применим	Возможен	Вычисление показателей безотказности и комплексных показателей надёжности системы	Поддержка
Статистические методы надёжности	Возможен	Анализ воздействия неисправностей	Определение количественных оценок показателей безотказности с неопределённостью	Применим

Во многих случаях, связанных с вероятностным выводом, получение диагноза сводится к вычислению апостериорного распределения, исходя из имеющегося набора сведений (симптомов). При рассмотрении сведений и диа-

нозов в виде множества дискретных переменных (зависимых и независимых), для нахождения возможного состояния компонента системы будем использовать направленный ациклический граф или байесовскую сеть [7].

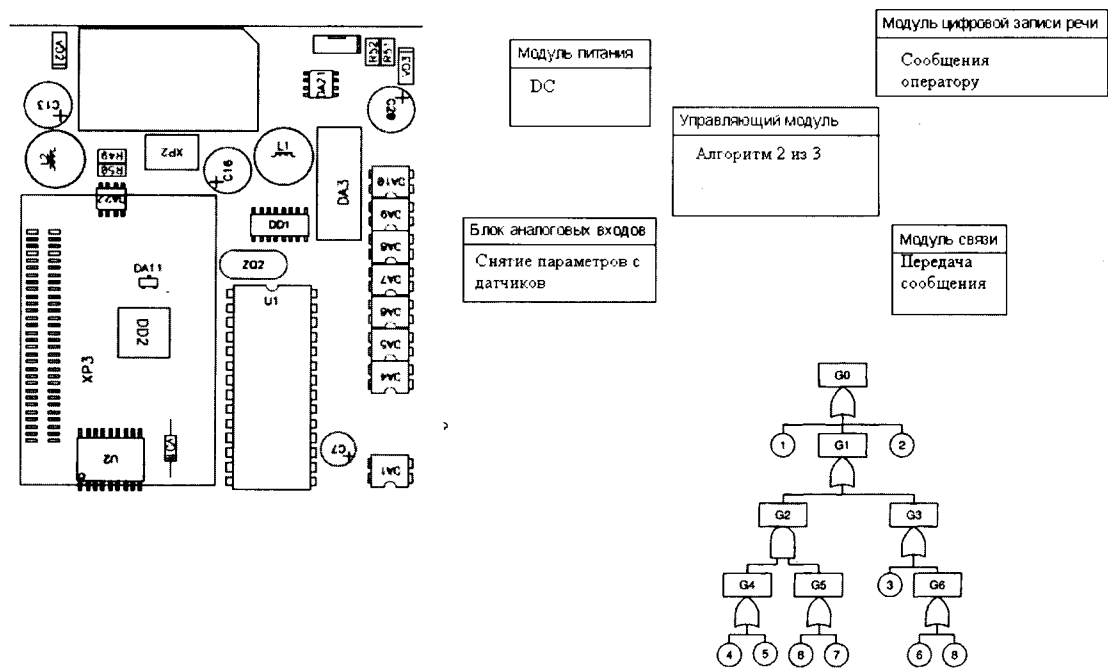


Рис. 1. Дерево неисправности электронной системы оповещения

Для байесовской сети G основное назначение – решение задач вероятностного вывода, т.е. определение вероятности достижения переменными определённых дискретных значений ($U=u, U \subset V$) при означенных переменных ($E=e, E \subset V \setminus U$), или $P(v|e)$. К точным методам определения вероятностного вывода в байесовской сети относится алгоритм распространения вероятности в кластерных деревьях (Probability Propagation in Trees of Clusters (PPTC)) [8]. Данный алгоритм основывается на переходе от байесовской сети через преобразования графа в дерево смежности. $P(v|e)$ определяется как:

$$P(v|e) = \frac{P(V,e)}{P(e)} = \frac{P(V,e)}{\sum_V P(V,e)}. \tag{1}$$

Для сети с одним корнем v (отказ узла) для рассматриваемой системы формула (1) определяет вероятность отказа узла (компонент системы). На рис. 2 приведён пример байесовской сети для анализа одного из компонентов системы.

Следующим шагом к определению вероятности отказа всей системы является построение минимального сечения дерева неисправности, представляющего собой последовательное соединение минимальных наборов компонентов системы, отказ которых приводит к отказу всей системы (рис. 3).

Вероятность отказа j -го минимального сечения может быть найдена по формуле:

$$\hat{P}_j(t) = \prod_{i \in K} p_i(t).$$

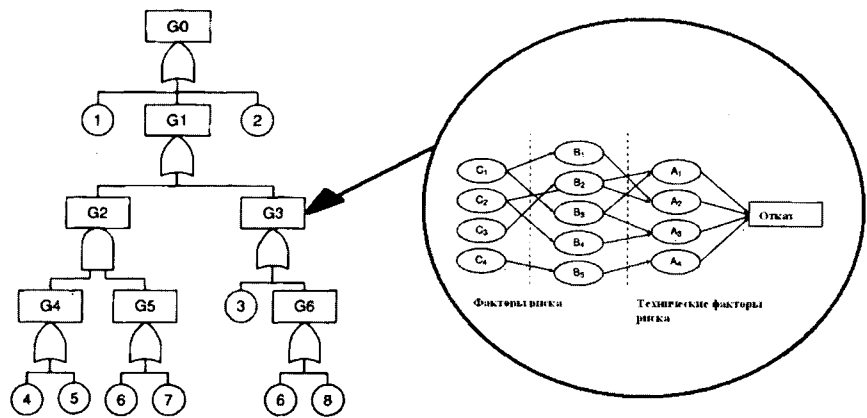


Рис. 2. Анализ компоненты системы через байесовскую сеть

Вероятность отказа системы в целом удовлетворяет неравенству

$$P(t) \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \hat{P}_j(t)). \quad (2)$$

При сложной структуре системы для минимизации вычислений можно полагать, что

$$P(t) \approx 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \hat{P}_j(t)).$$

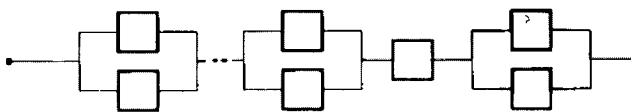


Рис. 3. Минимальные сечения

Общая схема вероятности отказа системы в некоторый момент времени по имеющимся функциям интенсивности отказа отдельных её компонентов может быть представлена следующей последовательностью:

$\lambda(t) \rightarrow p(t) \rightarrow$ пропагация в сети $\rightarrow p^*(t) \rightarrow$ анализ
методом минимальных сечений.

Апостериорная вероятность $p^*(t)$ после поступлений некоторых наблюдаемых свиде-

тельств (симптомов) отличается от «эталонной» вероятности отказа. Некоторые факторы риска или симптомы, наблюдаемые на компоненте системы, изменяют вероятность его отказа. Полученная вероятность используется для анализа посредством метода минимальных сечений для получения общей вероятности отказа системы.

Работы по данному направлению ведутся в рамках гранта № МК-2773.2011.8 «Управление техническим состоянием электроэнергетических объектов с целью повышения параметров их энергоэффективности».

Список литературы

1. Rausand M., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods and application. Wiley interscience, 2004.
2. Smith A.M. Reliability-Centered Maintenance. McGraw-Hill, New York, 1993.
3. Lambert M., B. Riera, and G. Martel. Application of functional analysis techniques to supervisory systems. Reliability Engineering and System Safety, 1999.
4. ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003).
5. Любер Д.Ф. Искусственный интеллект, стратегии и методы решения сложных проблем. М., 2003.
6. Путькина Л.В., Пискунова Т.Г. Интеллектуальные информационные системы. СПб: СПбГУП, 2008.
7. R.G. Cowell, A.P. Dawid, S.L. Lauritzen, and D.J. Spiegelhalter. Probabilistic Networks and Expert Systems. Springer, 1999.
8. Huang, C., Darwiche, A. Inference in belief networks: A procedural guide // International Journal of Approximate Reasoning. October 1996. Vol. 15, N 3. P.225–263.

Расчёт тока нагрева греющего кабеля в нефтяной скважине

КУХАРЧУК И.Б., КОВРИГИН Л.А.

Исследована проблема образования отложений парафина в нефтяных скважинах при добыче нефти. Рассмотрен тепловой метод удаления таких отложений с помощью греющего кабеля. Разработана математическая модель расчёта тока нагрева и времени работы греющего кабеля.

Ключевые слова: нефтяная скважина, греющий кабель.

The problem of paraffin deposits in oil wells during oil production is investigated. The thermal dewaxing method using heating cable is considered. A mathematical model for calculating the heating current and the time of heating cable work is developed.

Key words: oil well, heating cable.

Эксплуатация многих нефтяных скважин осложняется отложениями (АСПО — асфальтосмолопарафиновые отложения) на стенках насосно-компрессорных труб (НКТ). Основными компонентами отложений являются парафины, содержание которых изменяется от 20 до 70% (по массе), и асфальтосмолистые соединения — от 20 до 40% (по массе) [1].

В забое парафин растворён в нефти, так как температура на глубине 1000–2500 м составляет 60–120 °С. По мере поднятия нефти происходит понижение её температуры и резкое снижение растворимости в ней парафинов и асфальтосмолистых веществ, что ведёт к интенсивному их осаждению на внутренней поверхности НКТ (рис. 1). Это вызывает сниже-

ние притока жидкости к забою и повышение гидравлических сопротивлений скважин, что снижает их продуктивность [2].

Для предупреждения пробкообразования и профилактического удаления отложений применяются тепловые, механические, химические и другие методы [3]. В настоящей работе рассматривается тепловой метод удаления АСПО.

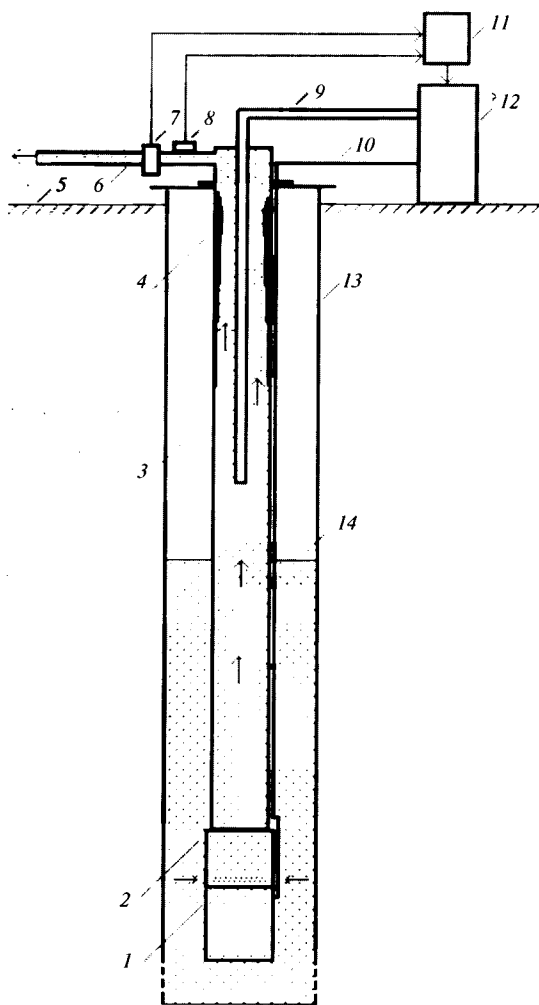


Рис. 1. Отложение парафина на стенках НКТ: 1 – электродвигатель; 2 – насос; 3 – НКТ; 4 – отложения парафина; 5 – поверхность земли; 6 – выкидная труба; 7 – датчик расхода; 8 – датчик температуры; 9 – греющий кабель; 10 – силовой кабель; 11 – компьютер; 12 – силовой блок; 13 – обсадная колонна; 14 – динамический уровень нефти

В результате образования парафиновых пробок в простое находится значительная часть добывающих скважин. На мероприятия по предупреждению и ликвидации отложений парафина расходуются значительные материальные и финансовые ресурсы.

Скважина представляет собой многослойную структуру, состоящую (рис. 2) из 6 областей (шестая область имеет две подобласти – ниже и выше динамического уровня нефти),

обладающими различными теплопроводностями: 1 – токопроводящая жила λ_1 ; 2 – изоляция λ_2 ; 3 – движущаяся нефть λ_3 ; 4 – отложения парафина λ_4 ; 5 – насосно-компрессорная труба λ_5 ; 6 – ниже динамического уровня нефти λ_6 ; 7 – выше – воздух λ_7 . Отложения начинаются с определённой глубины $L_{отл}$, поэтому ниже этой глубины область 4 отсутствует.

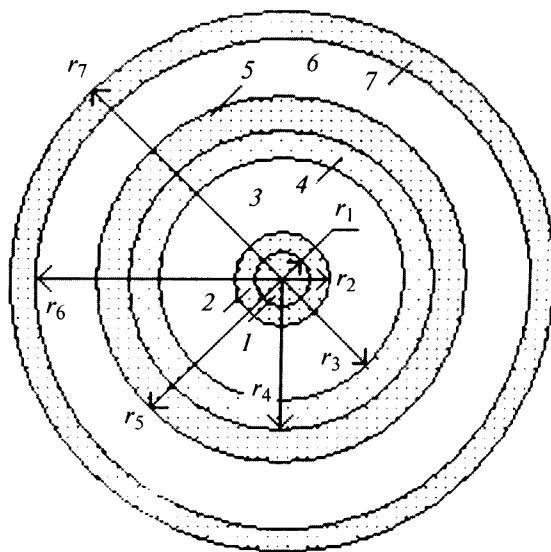


Рис. 2. Поперечный разрез скважины (радиусы: r_1 – токопроводящей жилы; r_2 – кабеля; r_3 – парафиновых отложений; r_4 – внутренний НКТ; r_5 – внешний НКТ; r_6 – внутренний обсадной колонны; r_7 – внешний обсадной колонны)

Ставится задача: ликвидировать отложения с внутренней поверхности НКТ путём нагрева движущейся нефти от забоя к устью до температуры выше температуры плавления АСПО с помощью нагревательного кабеля, расположенного внутри НКТ. Задача является нестационарной трёхмерной осесимметричной.

Для решения поставленной задачи необходимо решить систему дифференциальных уравнений (энергии, движения), замкнутых крайними условиями.

Уравнение энергии в цилиндрической системе координат для областей 1–2 и 4–6 имеет вид:

$$\rho(r)C(r)\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(r)r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

или

$$\rho_i C_i \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial \lambda_i}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda_i r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (i=1,2,\dots,7), \quad (1)$$

где $\rho = f(r)$ – плотность; $C = f(r)$ – теплоёмкость; T – температура; τ – время; $\lambda = f(r)$ – теплопроводность; r – радиус.

Уравнение энергии в цилиндрической системе координат для области 3 имеет вид:

$$\rho(r)C(r)\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(r)r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

или

$$\rho_i C_i \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial \lambda_i}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} + \lambda_i r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (i=3), \quad (2)$$

v_z – скорость нефти в насосно-компрессорной трубе (ось z).

Уравнение движения в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (3)$$

где P – давление; $\mu = f(T)$ – вязкость.

Расход (дебит)

$$Q_z = c \int_{r_2}^{r_3} v_z dr. \quad (4)$$

Граничные условия (рис. 2):

1. $\lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = P_{ж}$ – плотность теплового потока, исходящего из токопроводящей жилы в изоляцию, $P_{ж} = I_{ж}^2 R_{ж} / S_{пов}$, где $I_{ж}$ – ток; $R_{ж}$ – электрическое сопротивление токопроводящей жилы; $S_{пов}$ – площадь поверхности токопроводящей жилы длиной 1 м; $\lambda_{из}$ – теплопроводность изоляции.

2. $\lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \lambda_{неф} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_2}$ – на границе раздела: изоляция – нефть, движущаяся в НКТ, где $\lambda_{неф}$ – теплопроводность нефти.

3. $\lambda_{неф} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = \lambda_{пар} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_3}$ – на границе раздела: нефть, движущаяся в НКТ, – парафиновые отложения на внутренней поверхности НКТ, где $\lambda_{пар}$ – теплопроводность парафина; λ_{Fe} – теплопроводность стали.

4. $\lambda_{пар} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_4} = \lambda_{Fe} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_4}$ – на границе раздела: парафиновые отложения на внутренней поверхности НКТ – стенка НКТ, где λ_{Fe} – теплопроводность стали.

5. $\lambda_{Fe} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_5} = \lambda_{неф} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_5}$ – на границе раздела: внешняя поверхность НКТ – нефть (выше динамического уровня – воздух) в межтрубном пространстве.

6. $T \Big|_{r=r_6} = T_0$ – на внутренней поверхности обсадной колонны температура равна геотерме.

7. $\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$, так как задача осесимметричная.

8. $v_z \Big|_{r=r_2} = 0$ – на поверхности кабеля выполняется условие прилипания.

9. $v_z \Big|_{r=r_3} = 0$ – на поверхности парафиновых отложений выполняется условие прилипания.

10. $v_z \Big|_{r=r_4} = 0$ – на внутренней поверхности НКТ, там, где нет парафиновых отложений, выполняется условие прилипания.

Функциональная схема, реализующая поставленную задачу, представлена на рис. 3. По полученной модели процесса удаления парафина была разработана программа, моделирующая удаление парафина в насосно-компрессорной трубе с учётом температурного поля и скорости движения нефти.

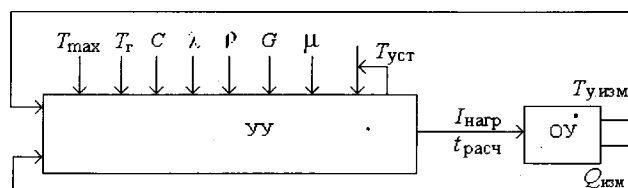


Рис. 3. Функциональная схема: УУ – устройства управления удалением отложений; ОУ – объект управления; T_{max} – максимально допустимая температура токопроводящей жилы; $I_{нагр}$ – ток нагрева; $T_{у.изм}$ – измеренная температура на устье; $T_{уст}$ – вычисленная температура на устье; T_r – геотерма; C – теплоёмкость; λ – теплопроводность; ρ – плотность нефти; $\mu = \mu(T)$ – вязкость нефти; G – геометрические размеры; $t_{расч}$ – расчётное время нагрева; $Q_{изм}$ – измеренный расход (дебит)

УУ восстанавливает координату процесса удаления отложений во время работы нагревательного кабеля: распределение температуры движущейся скважинной жидкости по глубине скважины $T_n = f(L)$ и формирует выходные управляющие воздействия: ток $I_{нагр}$ и время его протекания $t_{нагр}$.

Идентификация модели объекта проводится из условия:

$$|T_{уст} - T_{у.изм}| < \delta T, \quad (5)$$

где $T_{уст}$ — вычисленная температура на устье;
 $T_{уст.изм}$ — измеренная температура на устье;
 $\delta T = 1^\circ\text{C}$.

3. Счётчик времени обнуляется, $t_{тек.нач} = 0$.
 4. Расчётное время приравняется нулю, $t_{расч} = 0$.

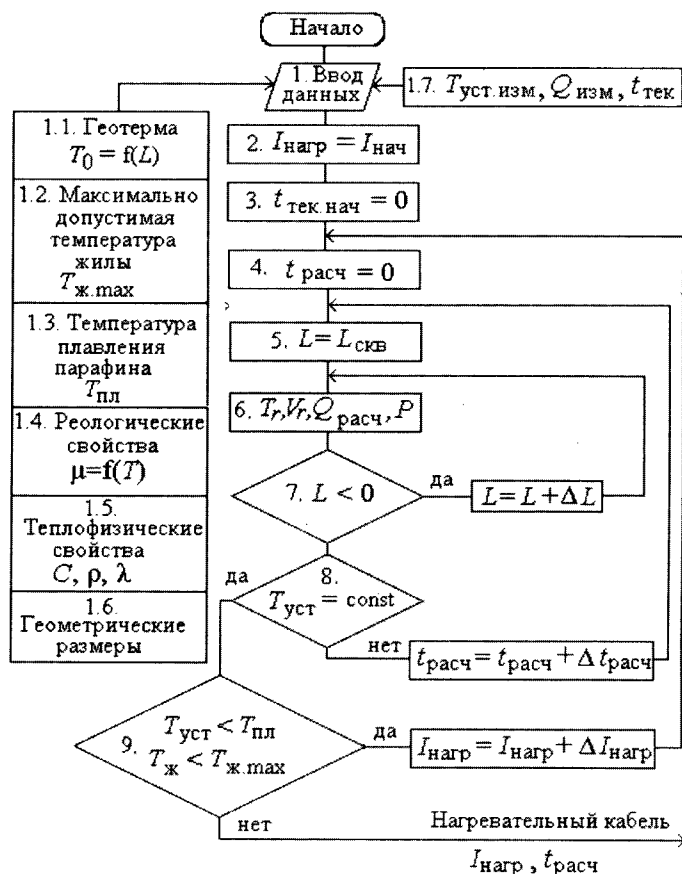


Рис. 4. Блок-схема расчёта тока нагрева и времени его воздействия

Порядок вычисления (рис. 4):

1. Вводятся данные:

1.1. Геотерма $T_0 = f(L)$ — распределение температуры породы по глубине вблизи скважины.

1.2. $T_{ж.мах}$ — максимально допустимая температура жилы.

1.3. $T_{пл}$ — температура плавления парафина.

1.4. Реологические свойства скважинной жидкости (нефти) — зависимость вязкости от температуры $\mu = f(T)$.

1.5. Теплофизические свойства: C — теплоёмкость; λ — теплопроводность; ρ — плотность.

1.6. Геометрические размеры (рис. 2).

1.7. Измеренные значения температуры $T_{уст.изм}$ и расхода (дебит) $Q_{изм}$, непрерывно поступающие с устья скважины, а также фактическое текущее время $t_{тек}$.

2. Устанавливается ток нагрева, равный некоторому начальному значению, $I_{нагр} = I_{нач}$.

3. Счётчик времени обнуляется, $t_{тек.нач} = 0$.

4. Расчётное время приравняется нулю, $t_{расч} = 0$.

5. Задаётся глубина скважины $L = L_{скв}$.

6. Вычисляется распределение по радиусу: температуры (T_r) в скважине, скорости (v_r) нефти, давления (P) и расхода ($Q_{расч}$) по формулам (1)–(4).

7. Расчёт повторяется по всей глубине скважины от забоя к устью с определённым шагом $L = L - \Delta L$.

8. Увеличение расчётного времени (т.е. рассчитывается разогрев) ведётся до стабилизации температуры НКТ на устье $T_{уст}$.

9. В том случае, если температура на устье НКТ ($T_{уст}$) меньше температуры плавления парафина ($T_{пл}$) и температура на жиле ($T_{ж}$) меньше максимально допустимой ($T_{ж.мах}$), добавляется расчётный ток нагрева и все вычисления повторяются. При выполнении условий включается ток нагрева $I_{нагр}$ на рассчитанное время $t_{нагр}$.

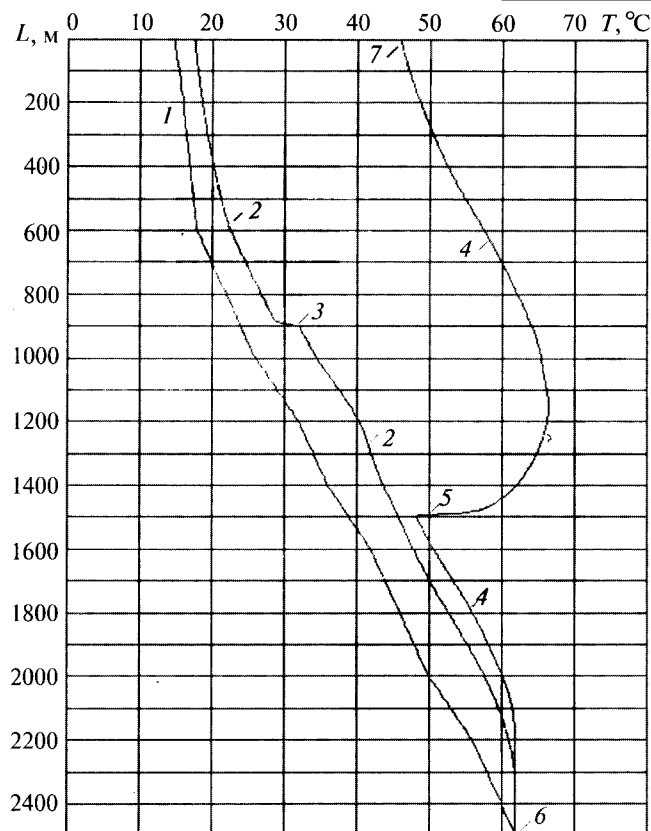


Рис. 5. Восстановленные координаты процесса удаления отложений во время работы нагревательного кабеля: 1 — геотерма; 2 — температура нефти на внутренней стенке НКТ; 3 — динамический уровень 900 м; 4 — температура токопроводящей жилы нагревательного кабеля; 5 — длина нагревательного кабеля 1500 м; 6 — забой; 7 — устье

На рис. 5. представлены восстановленные координаты процесса удаления отложений во время работы нагревательного кабеля.

Расчёт ведётся с учётом распределения температуры по глубине скважины (геотерма 1), переноса тепла за счёт движения нефти от забоя 6 к устью 7. На глубине 1500 м (5) начинается нагревательный кабель, поэтому температура токопроводящей жилы 4 возрастает. На глубине 900 м (точка 3) находится динамический уровень, условия отвода тепла от НКТ изменяются, поэтому кривая 2 меняет форму.

Выводы

1. Разработана математическая модель расчёта тока нагрева и времени работы греющего кабеля для удаления отложений на стенке насосно-компрессорной трубы в нефтяной скважине.

2. Расчёт тока нагрева ведётся с учётом того, чтобы температура изоляции кабеля не превышала допустимую, и в тоже время происходило плавление парафина.

3. Модель учитывает распределение температуры по глубине скважины, дебит, теплофизические и реологические свойства скважинной жидкости.

Список литературы

1. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000.
2. Нагимов Н.М., Ишкаев Г.И., Шарифуллин А.В., Козин В.Г. Новый ряд углеводородных композитов для удаления АСПО // Нефтепромысловое дело. 2001. №9.
3. Малышев А.Г., Черемсин Н.А., Шевченко Г.В. Выбор оптимальных способов борьбы с парафиногидратообразованием // Техника и технология добычи нефти. 1997. №9.

Журнал «Электротехника» переводится на английский язык и выходит в США в издательстве «ALLERTON PRESS, INC» в полном объёме. Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар авторам статей, опубликованных в журнале.

Справки по тел.: (495) 697 33 35.

Применение правил нечёткой логики при эксплуатации электротехнического оборудования

ХОРОШЕВ Н.И., КАЗАНЦЕВ В.П.

Рассмотрены некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнического оборудования на основе правил нечёткой логики. Расчётная часть статьи включает в себя апробацию конкретной модели принятия управленческих решений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, электротехническое оборудование, нечёткая логика, оптимальное решение.

Поскольку при эксплуатации электротехнического оборудования (ЭО) часто приходится иметь дело с недостатком информации, её искажением, нечёткостью, а также несвоевременностью поступления (неактуальностью), то особую значимость приобретают методы, позволяющие с помощью многокритериальной оценки различных альтернатив на основе правил нечёткой логики выбрать оптимальный вариант технико-экономического решения. В статье рассмотрен метод оптимального принятия управленческих решений на базе теории нечётких множеств.

Рассмотрим метод многокритериального выбора альтернатив на основе композиционного правила агрегирования описания рассматриваемых вариантов с информацией о предпочтениях лиц принимающих решения (ЛПР), заданных, как правило, в виде нечётких суждений [1,2].

Введём множество некоторых исследуемых элементов U . Символом A обозначим его нечёткое подмножество, степень принадлежности элементов которого определена на интервале $[0,1]$. Подмножество A представляет собой значения лингвистической переменной X .

Множество решений охарактеризуем набором определённых критериев X_1, X_2, \dots, X_p . Например, X_1 = «Стоимость проведения работ по восстановлению ЭО» может иметь значения «ВЫСОКАЯ», «СРЕДНЯЯ», «НИЗКАЯ» и т.п. Переменная Y — «Удовлетворённость» также является лингвистической. Тогда пример лингвистического высказывания запишется следующим образом:

In the article some aspects of electro engineering equipment exploitation technology on the basis of fuzzy logic rules are considered. The experimental article part includes specific decision acceptance model.

Key words: electrical power system, electro engineering equipment, fuzzy logic, optimal decision.

d_1 : «Если X_1 = НИЗКАЯ, то Y = ВЫСОКАЯ»;
...
 d_i : «Если $X_1 = A_{1i}$ и $X_2 = A_{2i}$ и ... $X_p = A_{pi}$, то $Y = B_i$ ». (1)

Разумеется, при принятии управленческих решений не ограничиваются только лишь одним оценочным критерием.

Обозначим пересечение $X_1 = A_{1i} \cap X_2 = A_{2i} \dots X_p = A_{pi}$ через $X = A_i$. Согласно операции пересечения нечётких множеств получим нахождение минимума их функций принадлежности [3]:

$$\mu_{A_{il}}(v) = \min_{v \in V} (\mu_{A_{1l}}(u_1), \mu_{A_{2l}}(u_2), \dots, \mu_{A_{pl}}(u_p)), \quad (2)$$

где $V = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_p$; $v = (u_1, u_2, \dots, u_p)$; $\mu_{A_{ij}}(u_j)$ — значение принадлежности элемента u_j нечёткому множеству A_{ij} .

Тогда:

$$d_i: \text{«Если } X = A_i, \text{ то } Y = B_i\text{»}. \quad (3)$$

Если обозначить множества U и V через W , то A_i — нечёткое подмножество W , в то время как B_i — нечёткое подмножество единичного интервала I .

Импликация нечётких множеств (3) (т.е. логическая связка «если ..., то ...») выражается следующим образом:

$$\mu_H(\omega, i) = \min_{\omega \in W} (1, (1 - \mu_A(\omega) + \mu_B(i))), \quad (4)$$

где H — нечёткое подмножество на $W \times I$, $\omega \in W$, $i \in I$.

Аналогичным образом высказывания d_1, d_2, \dots, d_q преобразуются во множества H_1, H_2, \dots ,

H_q , объединением которых является множество D :

$$D = H_1 \cap H_2 \cap \dots \cap H_q \quad (5)$$

и для каждого $(\omega, i) \in W \times I$

$$\mu_D(\omega, i) = \min_{\omega \in W} (\mu_{H_j}(\omega, i)), \quad j = \overline{1, q}. \quad (6)$$

Далее опишем способ выбора альтернатив, каждая из которых описывается нечётким подмножеством C из W . Удовлетворительность альтернативы находится на основе композиционного правила вывода (т.е. применение одной функции к результату другой):

$$G = C \circ D, \quad (7)$$

где G – нечёткое подмножество интервала I . С учётом изложенного получаем:

$$\mu_G(i) = \max_{\omega \in W} (\min(\mu_C(\omega), \mu_D(\omega, i))). \quad (8)$$

Сравнение рассматриваемых альтернатив осуществляется на основе точечных оценок. Для нечёткого множества $A \subset I$ определим α -уровневое множество ($\alpha \in [0, 1]$):

$$A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha, \quad x \in I\}. \quad (9)$$

Для каждого A_α можно вычислить среднее число элементов $M(A_\alpha)$:

1. Для множества из n элементов $M(A_\alpha) = \sum_{x_i \in A_\alpha} x_i / n$.

2. Для $A_\alpha = \{a \leq x \leq b\}$ $M(A_\alpha) = \frac{a+b}{2}$.

3. Для $0 \leq a_1 \leq b_1 \leq a_2 \leq b_2 \leq \dots \leq a_n \leq b_n \leq 1$

$$A_\alpha = \bigcup_{i=1}^n \{a_i \leq x \leq b_i\}; \quad M(A_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i + b_i}{2} (b_i - a_i)}{\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)}. \quad (10)$$

Тогда точечное значение для множества A имеет следующий вид:

$$F(A) = \frac{1}{\alpha_{\max} - 0} \int_0^{\alpha_{\max}} M(A_\alpha) d\alpha, \quad (11)$$

где α_{\max} – значение, при котором A имеет максимум.

При выборе той или иной альтернативы для каждой из них находится удовлетворительность и вычисляется соответствующая точечная оценка. Оптимальным вариантом является наибольшее значение данной оценки.

Постановка задачи

Рассмотрим метод применительно к решению задачи выбора однотипных объектов в виде ЭО, входящих в определённую структурную группу предприятия (например, цех добычи нефти и газа (ЦДНГ) или куст ДНГ) для проведения восстановительных работ. Выбор альтернатив также может быть связан не только с приведением процессов $S_i(t)$ к исходным нормативным значениям, определяющим этап нормальной эксплуатации оборудования (например, $\lambda(t) = \text{const}$), но и с проведением работ согласно системам мониторинга и диагностики.

Начальные и граничные условия

Следует учитывать, что принятие решения осуществляется с помощью многокритериальной оценки рассматриваемых вариантов в условиях нечёткости и недостатка исходной информации.

В рамках данной статьи ограничимся рассмотрением только механизма принятия оптимальных управленческих решений [4], не касаясь конкретных моделей надёжности [5] ЭО, формирования множества наиболее информативных параметров оборудования [6, 7], а также прогнозирующих моделей технического состояния (ТС) по данным параметрам $S_i(t)$.

Множество объектов структурных групп обозначим через $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$, т.е. рассматривается 5 альтернативных вариантов. В качестве объекта следует рассматривать энергосетевые компании, поскольку выбор критериев в дальнейшем будет обусловлен специфической деятельностью предприятий данного рода.

Поскольку деятельность энергосетевой компании, как и любого другого хозяйствующего субъекта, связана не только с технической безопасностью и надёжностью эксплуатируемых основных средств, но и с оптимизацией распределения денежных потоков на поддержание деятельности организации, то при принятии управленческих решений, определяющих верхний уровень технологии эксплуатации ЭО по состоянию, следует учитывать экономический критерий. Участие эксперта при принятии решений является крайне важным и формирует так называемый человеко-машинный комплекс управления жизненным циклом (ЖЦ) изделия на этапе его эксплуатации.

Поэтому в качестве ЛПР выбраны эксперты, заведомо придерживающиеся разносторон-

них взглядов в управлении состоянием ТС ЭО:

- руководитель основного структурного подразделения, занимающегося эксплуатацией ЭО, например, начальник отдела энергетического оборудования и энергоснабжения;

- ведущий инженер службы надёжности и промышленной безопасности;

- инженер по вопросам оценки экономической эффективности проведения восстановительных работ.

В качестве ЛПР рассматриваются в первую очередь специалисты, компетентные в своих областях знаний, что представляет собой некоторое ограничение рассматриваемого метода. Стоит отметить, что проверку вхождения каждого из специалистов в область компетентности можно осуществить с помощью определённого проверочного механизма [8].

По мнению авторов статьи, лишь разносторонний учёт важности (приоритетов) критериев позволяет сформировать оптимальное управленческое решение. Следует также отметить, что приведённый список лиц, участвующих в принятии управленческих решений, может быть расширен с учётом рассматриваемых критериев и необходимых дополнительных знаний в области исследования вопросов оптимальности и надёжности работы ЭО.

Сформируем список агрегированных оценочных комплексных критериев:

1. X_1 — техническое состояние ЭО.
2. X_2 — устойчивость (живучесть) системы.
3. X_3 — передаваемая мощность как продукт производственной деятельности.
4. X_4 — время возврата параметра $S(t)$ (или группы параметров $\{S_i(t)\}$) в нулевое (первоначальное) состояние.

Поясним, каким образом ЛПР могут получить информацию о каждом из критериев для формирования собственного профессионального суждения о рассматриваемом явлении, процессе или объекте. Оценка объекта или группы электротехнических объектов, входящих в систему, по критерию 1 осуществляется на основе сформированной базы данных индикаторов (параметров), характеризующих работу оборудования в целом. Прежде всего, к данным показателям следует отнести параметры количественного уровня, а затем уже качественного.

В качестве обобщённых параметров надёжности могут выступать различные законы распределения, интенсивность отказов, параметр потока отказов, средняя наработка на отказ, среднее время восстановления, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, год выпуска ЭО (или общий срок эксплуатации) [5]. Кроме того, могут рассматриваться детальные показатели конкретных типовых единиц оборудования, которые подлежат оценке (например, для силовых трансформаторов — показания температуры верхних слоев масла, термограмма трансформатора, показатель ЧР, состояние сопротивления изоляции обмоток, состояние масла, нагрузочные характеристики и др.).

Критерий 2 связан с возможностью системы противостоять внешним возмущениям, связанным, например, с агрессивным воздействием окружающей среды, способностью переносить сверхноминальные нагрузки в течение необходимого интервала времени, резервируемостью элементов системы [6]. Источником информации для формирования этого оценочного показателя могут быть непосредственно знания эксперта исследуемой предметной области, а также различные электрические, принципиальные, функциональные схемы технических устройств (ТУ) и систем.

Критерий 3 характеризует важность элемента (в частном случае, единицы оборудования) с точки зрения передаваемой мощности и связанных с ней возможных денежных потерь в виде штрафов, пени или неустоек по коммерческим и другим видам договоров поставок энергоносителя.

Критерий 4 связан с временем, необходимым для восстановления оборудования или системы, и, соответственно, с трудозатратами и денежными расходами на его осуществление (т.е. отражает трудозатратность). Исходные данные, подлежащие оценке, могут быть получены из технологических карт, технических паспортов оборудования, справочников, ГОСТ и других нормативных технических документов, а также смет на проведение восстановительных работ, сформированных по рыночному принципу.

Для дальнейшей формализации функции принадлежности в табл. 1 обозначим область определения критериев в лингвистическом смысле.

Таблица 1

Комплексные критерии и область их определения в лингвистическом смысле

Критериальное свойство	Принимаемые критерием лингвистические значения
Техническое состояние ЭО	{ХОРОШЕЕ (аналог ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ) УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ (аналог КРИТИЧНОЕ)}
Устойчивость (живучесть) системы	{УСТОЙЧИВА, НА ГРАНИ УСТОЙЧИВОСТИ, НЕУСТОЙЧИВА}
Передаваемая мощность как продукт производственной деятельности	{ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ, СРЕДНЯЯ, НЕЗНАЧИТЕЛЬНАЯ}
Время восстановления оборудования до его первоначального состояния	{ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ, СРЕДНЕЕ, НЕПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ}

В ходе экспертного обсуждения специалистами получены результаты в виде лингвистических переменных [1], отображённых на множестве альтернатив U :

d_1 = «Если X_1 = УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ и X_2 = НА ГРАНИ УСТОЙЧИВОСТИ и X_3 = СРЕДНЯЯ, то Y = УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ»;

d_2 = «Если X_1 = УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ и X_2 = НА ГРАНИ УСТОЙЧИВОСТИ и X_3 = СРЕДНЯЯ и X_4 = СРЕДНЕЕ, то Y = БОЛЕЕ, ЧЕМ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ»;

d_3 = «Если X_1 = НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ и X_2 = НЕУСТОЙЧИВА и X_3 = ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ, то Y = НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩИЙ»;

d_4 = «Если X_1 = НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ и X_2 = НЕУСТОЙЧИВА и X_3 = ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ и X_4 = ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ, то Y = БЕЗУПРЕЧНЫЙ»;

d_5 = «Если X_1 = ХОРОШЕЕ и X_2 = УСТОЙЧИВА и X_3 = НЕЗНАЧИТЕЛЬНАЯ или X_4 = НЕПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ, то Y = НЕ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ»,

где Y – итоговая оценка альтернатив, эта переменная определена на множестве $J = \{0, 0,1, 0,2, \dots, 1\}$.

Таким образом, имеет место инверсная ситуация, когда альтернатива с наилучшей лингвистической оценкой обладает наихудшими признаками (согласно постановке задачи). Кроме того, данные результаты и суждения могут быть сформированы и одним специалистом, который с позиции логики здравого смысла способен заложить различную важность критериев и тем самым сформировать

стратегию принятия управленческих решений при эксплуатации ЭО.

В табл. 2 формализуем функции принадлежности для различных лингвистических оценок, определяющих альтернативные варианты.

Таблица 2

Формализация функций принадлежности для различных лингвистических оценок

Лингвистическое значение переменной	Функция принадлежности
УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ (S – satisfying)	$\mu_S(x) = x, x \in J$
НЕ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ (US – unsatisfying)	$\mu_{US}(x) = 1 - x, x \in J$
БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ (MS – more than satisfying)	$\mu_{MS}(x) = \sqrt{x^3}, x \in J$
НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩИЙ (VS – very satisfying, аналог – «очень удовлетворяющий»)	$\mu_{VS}(x) = x^2, x \in J$
БЕЗУПРЕЧНЫЙ (P – perfect)	$\mu_P(x) = \begin{cases} 1, x = 1; \\ 0, x \neq 1; \end{cases} x \in J$

Построим необходимые графики функций лингвистических оценок (функций принадлежности), рис. 1.

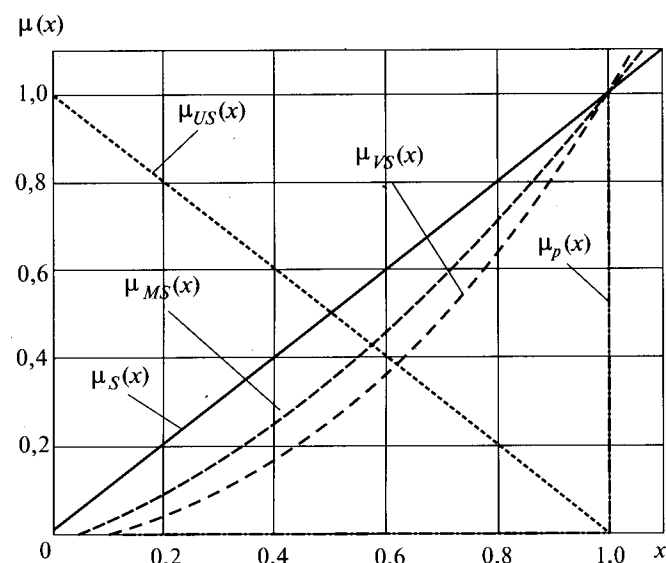


Рис. 1. Функции принадлежности для различных лингвистических оценок

Функции построены таким образом, что не противоречат логике здравого смысла, поскольку выбор наилучшей альтернативы осуществляется по наивысшей степени удовлетворённости (например, в нашем случае – это характеристика μ_P , рис. 1), которой должно соответствовать наибольшее оценочное значение.

ние x_i в сравнении с другими характеристиками, обладающими меньшей значимостью. Выражаясь другими словами, к наивысшей степени удовлетворённости предъявляются повышенные требования, выражающиеся в величинах x_i . Выбор производится из множества альтернатив $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$, т.е. среди пяти потенциально оптимальных вариантов.

Далее приведём оценки каждой из альтернатив, сформированных экспертом:

A_0 = ХОРОШЕЕ ТС ЭО = $\{0,7/u_1; 0,5/u_2; 0,6/u_3; 0,1/u_4; 0,3/u_5\}$;

B_0 = УСТОЙЧИВАЯ СИСТЕМА = $\{0,4/u_1; 1/u_2; 0,1/u_3; 0/u_4; 0,5/u_5\}$;

C_0 = ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ ПЕРЕДАВАЕМАЯ МОЩНОСТЬ = $\{0,3/u_1; 1/u_2; 0,1/u_3; 0,9/u_4; 0,7/u_5\}$;

D_0 = ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ = $\{0,4/u_1; 1/u_2; 0,8/u_3; 0,2/u_4; 0,1/u_5\}$.

Также в целях однозначной интерпретации дальнейших логических лингвистических связей с конструкциями «не», «очень», «не очень», отражающими степень превосходства и, наоборот, недостатка, приведём краткие пояснения для каждой из них в табл. 3.

После получения оценочных значений фрагменты знаний примут вид:

d_1 = «Если $X = A_1$, и B_1 , и C_1 , то $Y = S$ »;

d_2 = «Если $X = A_1$, и B_1 , и C_1 , и D_1 , то $Y = MS$ »;

d_3 = «Если $X = A_2$, и B_2 , и C_2 , то $Y = VS$ »;

d_4 = «Если $X = A_2$, и $X_2 = B_2$, и $X_3 = C_0$, и $X_4 = D_0$, то $Y = P$ »;

d_5 = «Если $X_1 = A_0$, и $X_2 = B_0$, и $X_3 = C_2$ или $X_4 = D_2$, то $Y = US$ ».

Далее, используя правило (2), переведём данные операции в M_i :

$$\mu_{M1}(u) = \min \mu_{A1}(u) \mu_{B1}(u) \mu_{C1}(u);$$

$$d_1 = M_1(u) = \{0,548/u_1; 0,707/u_2; 0,316/u_3; \rightarrow 0/u_4; 0,548/u_5\};$$

$$\mu_{M2}(u) = \min \mu_{A1}(u), \mu_{B1}(u), \mu_{C1}(u), \mu_{D1}(u);$$

$$d_2 = M_2(u) = \{0,548/u_1; 0,707/u_2; 0,316/u_3; \rightarrow 0/u_4; 0,316/u_5\};$$

$$\mu_{M3}(u) = \min \mu_{A2}(u), \mu_{B2}(u), \mu_{C2}(u);$$

$$d_3 = M_3(u) = \{0,136/u_1; 0/u_2; 0,225/u_3; 0,051/u_4; \rightarrow 0,163/u_5\};$$

$$\mu_{M4}(u) = \min \mu_{A2}(u), \mu_{B2}(u), \mu_{C2}(u), \mu_{D2}(u);$$

$$d_4 = M_4(u) = \{0,136/u_1; 0/u_2; 0,1/u_3; \rightarrow 0,2/u_4; 0,5/u_5\};$$

$$(\min \mu_{A0}(u), \mu_{B0}(u), \mu_{C2}(u)),$$

$$\mu_{M5}(u) = \max(\min \mu_{A0}(u), \mu_{B0}(u), \mu_{D2}(u));$$

$$d_5 = M_4(u) = \{0,4/u_1; 0/u_2; 0,1/u_3; 0,1/u_4; \rightarrow 0,3/u_5\};$$

Следовательно,

$d_1 = 0$ «Если $X = M_1$, то $Y = S$ »;

$d_2 = 0$ «Если $X = M_2$, то $Y = MS$ »;

Таблица 3

Интерпретация различных конструкций логических связей

Обозначение	Конструкция логической связи	Содержательный смысл и функция принадлежности
A_1	«не очень A »*	Удовлетворительное ТС ЭО, $\sqrt{\mu_{A1}(u)}$, связь «не очень» в данном случае не интерпретируется как полное противоречие A
A_2	«не «не очень A »**	Неудовлетворительное ТС ЭО, $1 - \sqrt{\mu_{A1}(u)}$
B_1	«не очень B »	Система (или объект) находится на грани устойчивости, $\sqrt{\mu_{B1}(u)}$
B_2	«не «не очень B »	Неустойчивая система, $1 - \sqrt{\mu_{B1}(u)}$
C_1	«не очень C »	Средняя передаваемая мощность, $\sqrt{\mu_{C1}(u)}$
C_2	«не «не очень C »	Незначительная передаваемая мощность, $1 - \sqrt{\mu_{C1}(u)}$
D_1	«не очень D »	Среднее время восстановления, $\sqrt{\mu_{D1}(u)}$
D_2	«не «не очень D »	Непродолжительное время восстановления ЭО, $1 - \sqrt{\mu_{D1}(u)}$

*Связка «не очень» не интерпретируется как полное противоречие A .

**В данном случае классическое понимание двойного отрицания величины A не работает, в других подобных случаях аналогично.

$d_3=0$ «Если $X = M_3$, то $Y = VS$ »;

$d_4=0$ «Если $X = M_4$, то $Y = P$ »;

$d_5=0$ «Если $X = M_5$, то $Y = US$ ».

Применяя правило (4) преобразования импликации «Если $X=M$, то $Y=Q$ » в выражении $\mu_D(u,i) = \min_{\omega \in W} (1, (1 - \mu_M(u) + \mu_Q(u)))$, для каждой пары $(u,i) \in U \times J$ получим нечёткие подмножества на $U \times J$ в виде матриц D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 .

В результате вычислений получаем общее функциональное решение в виде матрицы

$$D = D_1 \cap D_2 \cap D_3 \cap D_4 \cap D_5,$$

$$\text{т.е. } \mu_D(u,i) = \min(\mu_{D_j}(u,i)).$$

Для расчёта удовлетворительности каждого из рассматриваемых вариантов (альтернатив) применим правило композиционного вывода (7) в нечёткой среде, т.е. $E_k = G_{k0}D$, где E_k – степень удовлетворения альтернативы k в виде нечёткого подмножества U ; D – функциональное решение. Тогда $\mu_{E_k}(i) = \max_{u \in U} (\min(\mu_{G_k}(u), \mu_D(u,i)))$. В данном случае $\mu_{G_k}(u) = 0, u \neq u_k$; $\mu_{G_k}(u) = 1, u = u_k$. Отсюда $\mu_{E_k}(i) = \mu_{D_k}(u_k, i)$. Другими словами, E_k есть k -я строка в матрице D .

На данном этапе применим процедуру для сравнения нечётких подмножеств E_k , $k = 1, \dots, 5$. Приведём краткое содержательное описание необходимых расчётов для первой альтернативы, поскольку алгоритм для последующих вариантов будет работать аналогично.

Для первой альтернативы имеем:

$$\begin{aligned} E_1 &= \{0,452/0; 0,484/0,1; 0,541/0,2; 0,616/0,3; \rightarrow \\ &\rightarrow 0,705/0,4; 0,806/0,5; 0,864/0,6; 0,864/0,7; \rightarrow \\ &\rightarrow 0,8/0,8; 0,7/0,9; 0,6/1\}. \end{aligned}$$

Вычислим уровневые множества $E_{j\alpha}$ и их мощность $M(E_{j\alpha})$ согласно выражению

$$M(E_{j\alpha}) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}.$$

Тогда согласно (11) точечная оценка

$$F(E_1) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(E_{1\alpha}) d\alpha = 0,580.$$

Произведя аналогичные расчёты, получим следующие точечные оценки для других альтернатив: $F(E_2) = 0,542$, $F(E_3) = 0,415$, $F(E_4) = 0,319$, $F(E_5) = 0,368$.

Таким образом, точечная оценка удовлетворительности для альтернативы $u_1 = 0,580$ наибольшая, следовательно, данный вариант является наиболее приемлемым, т.е. оптимальным согласно комплексным критериям для решения поставленной задачи. Следует отметить, что данный механизм принятия решений в условиях недостатка и нечёткости исходной информации может применяться не только для формирования долгосрочной стратегии управления ЭО, но и для реализации оперативных управленческих решений, в том числе с использованием аппарата краткосрочного прогнозирования.

Список литературы

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.
2. Шапиро Д.И. Принятие решений в системах организационного управления: Использование расплывчатых категорий. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечётких моделей: Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990.
4. Гук Ю.Б., Долгов П.П., Окороков В.Р. и др. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М., 1982.
6. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем: Учеб. пособие для вузов. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006.
8. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высшая школа, 1979.
9. Ящур А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: справочник. М.: НЦ ЭНАС, 2005.

Авторы опубликованных статей

Боронников Андрей Андреевич — аспирант ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ). Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 2010 г.

Бочкарёв Сергей Васильевич — профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ, доктор техн. наук, доцент. Окончил машиностроительный факультет Пермского политехнического института в 1971 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Применение композиционных материалов в технике» (спец. тема) в 1995 г.

Елтышев Денис Константинович — ассистент кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 2008 г.

Зиннатуллин Ренат Раилевич — доцент ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук, доцент. Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 2003 г. Защитил диссертацию по теме «Управление процессом охлаждения экструдированной полимерной изоляции при производстве электрических кабелей» в 2009 г.

Кавалеров Борис Владимирович — доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук. Окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института в 1991 г. Защитил диссертацию по теме «Математическое моделирование мини-энергосистем с газотурбинными установками» в 2000 г.

Казаков Алексей Владимирович — старший преподаватель ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 2005 г.

Казанцев Владимир Петрович — профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ, доктор техн. наук, доцент. Окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института в 1976 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Методологические и теоретические основы испытаний изделий авиационной и ракетной техники на ротационных стендах» в 2001 г.

Ковригин Леонид Александрович — профессор ФГБОУ ВПО ПНИПУ, доктор техн. наук, доцент. Окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института в 1970 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка абсорбционного метода контроля процесса сушки и пропитки силовых кабелей для АСУТП кабельного производства» в 1982 г., докторскую — по теме «Теорети-

ческие основы иерархической системы управления с детерминированной математической моделью процессом экструзии полимеров в производстве кабелей» в 2002 г.

Костыгов Александр Михайлович — декан электротехнического факультета, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук. Окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института в 1977 г. Защитил диссертацию по теме «Центробежный испытательный стенд на основе дугостаторного асинхронного двигателя» в 1989 г.

Кузнецов Михаил Иванович — доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук. Окончил факультет электрификации Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства в 1955 г. Защитил диссертацию по теме «Исследование системы пуска привода рудничных центробежных машин с короткозамкнутыми асинхронными двигателями» в 1968 г.

Кухарчук Ирина Борисовна — старший преподаватель ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончила электротехнический факультет Пермского политехнического института в 2006 г.

Кычкин Алексей Владимирович — доцент кафедры ИТАС ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук. Окончил Пермский ГТУ в 2006 г. Защитил диссертацию по теме «Информационно-измерительная система для оценки состояния сосудов» в 2010 г.

Москоков Александр Юрьевич — старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончил Пермский государственный технический университет в 2006 г.

Навалихина Екатерина Юрьевна — аспирантка ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончила электротехнический факультет Пермского ГТУ в 2011 г.

Петроченков Антон Борисович — заведующий кафедрой микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук, доцент. Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 1999 г. Защитил диссертацию по теме «Автоматизация выбора режимов функционирования систем электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий» в 2003 г.

Ромодин Александр Вячеславович — доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации, директор научно-образовательного центра энергосбережения ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук.

Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 1995 г. Защитил диссертацию по теме «Автоматизация управления миниэлектроэнергетическими системами в аварийных режимах работы» в 2004 г.

Савченко Владимир Григорьевич — технический директор ООО «Камский кабель». Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 1997 г.

Сидельников Леонид Григорьевич — генеральный директор ООО «ТестСервис», канд. техн. наук, доцент. Окончил горный факультет Пермского политехнического института в 1976 г. Защитил диссертацию по теме «Линейный шаговый электродвигатель для транспортных систем технологических установок» в 1989 г.

Солодкий Евгений Михайлович — старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 2006 г.

Труфанова Наталия Михайловна — заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» ФГБОУ ВПО ПНИПУ, доктор техн. наук, профессор. Окончила факультет авиадвигателей Пермского политехнического института в 1979 г. Защитила докторскую диссертацию по теме «Разработка методов расчёта процесса пластикации и рабочих органов экструзионного оборудования для пластмасс» в 1993 г.

Файзрахманов Рустам Абубакирович — заведующий кафедрой ИТАС ФГБОУ ВПО ПНИПУ, доктор экон. наук, профессор. Окончил кафедру АСУ Пермского политехнического института в 1979 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Математическое моделирование материальных производственных потоков и управление ими с учётом факторов неопределённости и риска» в 2002 г.

Фёдоров Андрей Борисович — ассистент кафедры ИТАС ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончил Пермский ГТУ в 2009 г.

Франк Томас — генеральный директор компании «Envidatec GmbH», Гамбург, Германия. Окончил Университет прикладных наук (HAW), Гамбург, в 1996 г.

Хижняков Юрий Николаевич — доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ, канд. техн. наук, доцент. Окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института в 1968 г. Защитил диссертацию по теме «Разработка и исследование системы параллельной работы судовых синхронных генераторов с релейными полупроводниковыми регуляторами напряжения» в 1980 г.

Хорошев Николай Иванович — ассистент кафедры микропроцессорных средств автоматизации ФГБОУ ВПО ПНИПУ. Окончил электротехнический факультет Пермского ГТУ в 2008 г.

Щербинин Алексей Григорьевич — профессор кафедры «Конструирование и технология электрической изоляции» ФГБОУ ВПО ПНИПУ, доктор техн. наук, доцент. Окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института в 1987 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Процессы движения и теплообмена нелинейных полимерных сред в условиях фазового перехода в каналах экструзионного оборудования» в 2006 г.

Южиков Александр Анатольевич — профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ, доктор техн. наук, проф. Окончил электротехнический факультет Пермского политехнического института в 1979 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Методологические и теоретические основы проектирования адаптивных системных аналого-цифровых преобразователей потоковой динамической архитектуры на основе нейронных технологий» в 1997 г.

***К 100-летию со дня рождения видного учёного-электротехника,
доктора технических наук, профессора
Льва Поликарповича Петрова***

Лев Поликарпович Петров родился 31 декабря 1911 г. в Одессе. В 1937 г. он окончил Одесский политехнический институт, в котором затем трудился непрерывно более 60 лет. За эти годы он прошёл нелёгкий путь от преподавателя до доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой электропривода, которой успешно руководил многие годы. Руководимая им кафедра электропривода являлась и сегодня остается одной из ведущих кафедр электропривода в странах СНГ.

Основное научное направление, которому посвятил свои многолетние исследования и разработки Л.П. Петров, касается решения проблем управления динамическими режимами асинхронных электроприводов. По результатам многолетних научных исследований и разработок профессором Л.П. Петровым было написано и опубликовано более 200 научных статей, 13 монографий и учебных пособий, получено 28 авторских свидетельств и патентов.



Научные работы профессора Л.П. Петрова высоко оценены специалистами-электротехниками.

Многие его работы послужили основой разработок новых видов электроприводов для различных технологий машиностроения. Лев Поликарпович был создателем и руководителем Одесской научной школы электроприводчиков,

имеющей широкие связи с производством. Много физических сил и интеллекта отдал Лев Поликарпович научно-педагогической работе. Пока позволяло здоровье, он продолжал читать лекции студентам и был научным руководителем аспирантов. По его учебникам поколения студентов осваивают теорию электропривода и практическую реализацию полученных знаний. Им подготовлено 17 кандидатов технических наук.

Много внимания Л.П. Петров уделял учебно-методической работе, участвуя в дискуссиях на методсоветах по вопросам методической и содержательной части преподавания. Его идеи находили затем отражение в принимаемых методсоветом рекомендациях.

Все, кому приходилось общаться с Львом Поликарповичем, отмечали талант учёного и педагога, признанный авторитет, исключительное трудолюбие, прекрасные человеческие качества, снискавшие большое уважение к нему. Лев Поликарпович — пример служения отечеству для многих поколений учёных.

***Слежановский О.В., Юньков М.Г., Онищенко Г.Б.,
Масандилов Л.Б., Иванов Г.М., Сергиевский Ю.Н., профессора***

**Требования к содержанию и оформлению статей
журнала «Электротехника»**

I. Содержание.

1. Введение. Состояние вопроса, рассматриваемого в статье. Постановка задачи, её новизна и актуальность.

2. Основное содержание. Последовательное изложение существа рассматриваемого вопроса или решаемой задачи. При изложении избегать громоздких аналитических выражений, формул, расчётов и др. Основные аналитические соотношения представлять в обобщённой форме с указанием методов их решения. Оригинальные методы решения могут быть пояснены более подробно. Изложение желательно иллюстрировать соответствующими рисунками, схемами, диаграммами и др., максимально отражающими существо рассматриваемых вопросов.

3. Моделирование и экспериментальная часть (если они есть). Краткое описание математической или физической моделей. Оценка полученных результатов при моделировании.

4. Заключение. Выводы и значимость результатов для соответствующих областей науки и техники.

5. Список литературы. Приводится в конце статьи в порядке последовательности ссылок в тексте. Указываются:

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, наименование статьи или сборника, год издания, номер;

— для книг — фамилия и инициалы авторов, название книги, наименование издательства, город его нахождения, год издания.

В список литературы не должны включаться не напечатанные материалы и материалы для служебного пользования.

6. К статье должны быть приложены аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, а также название статьи на английском языке.

II. Оформление.

1. Объём статьи не должен превышать 12 страниц текста, набранного на компьютере через 2 интервала с полями 2—3 см и иметь не более 5—6 рисунков, сделанных с помощью компьютера (Word, Photoshop) в черно-белом исполнении. Формулы должны быть набраны на компьютере в отдельные строки.

2. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации, где она выполнена. К статье должны быть приложены сведения об авторах: фамилии, имена и отчества авторов, место работы, должности, учёные звания, степени, а также название вуза и факультета с указанием года его окончания. Необходимо указать контактные телефоны и электронные адреса.

3. Статья представляется в электронной форме по электронному адресу: elektrotechnika@mtu-net.ru. или по почте с приложением CD-диска с текстом и рисунками.

В соответствии с решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электротехника» включен в перечень ведущих научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук.