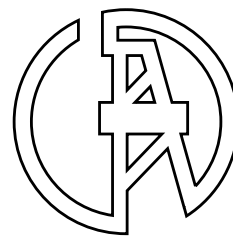


ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УГНТУ

№ 4, т. 15, 2019

Журнал основан в 2005 году. Выходит 4 раза в год.

Учредитель

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Международный стандартный серийный номер ISSN 1999-5458.

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

М.И. Хакимьянов — д-р техн. наук, доц. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

Зам. главного редактора:

Ш.З. Валиев — канд. техн. наук, д-р экон. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)

Члены редакционной коллегии:

В.М. Аргюшенко — д-р техн. наук, проф. ГБОУ ВО МО «Технологический университет» (г. Москва, Российская Федерация)



Б.М. Горшков — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса» (г. Тольятти, Российская Федерация)



М.Ю. Долوماتов — д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



В.Г. Крымский — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



В.Г. Кушнир — д-р техн. наук, проф. Костанайского государственного университета им. Ахмета Байтурсынова (г. Костанай, Казахстан)



С.В. Павлов — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Р.Р. Сафин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Б. Брудник — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Тель-Авивского университета (г. Тель-Авив, Израиль)



А.Ф. Романченко — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



П.С. Серенков — д-р техн. наук, проф. Белорусского национального технического университета (г. Минск, Белоруссия)



М.А. Ураксеев — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Н.А. Феоктистов — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии» (г. Москва, Российская Федерация)



Ф.Ф. Хизбуллин — д-р хим. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



В.А. Шабанов — канд. техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



Р.Б. Яруллин — д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа, Российская Федерация)



И. Зицмане — д-р техн. наук, профессор Рижского технического университета, эксперт научного совета Латвийской академии наук (г. Рига, Латвия)



Г.Д. Георгиев — д-р техн. наук, преподаватель Технического университета (г. Варна, Болгария)



И.В. Пентегов — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины (г. Киев, Украина)



Ответственный секретарь: А. А. Мухамадиев

Технический редактор: С. В. Халитова

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Доступ и подписка на электронную версию журнала — на сайте www.ugntu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-67387 от 05.10.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

© Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019.

Адрес редакции и издательства: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Тел.: (347) 243-16-19, ies.rusoil.net

Цена свободная. 12+

Подписано в печать 09.12.2019 г. Формат 60×84/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,27.

Тираж 1 000 экз. Заказ № 205.

Адрес типографии: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Электротехнические и информационные комплексы и системы», допускается только с письменного разрешения редакции.

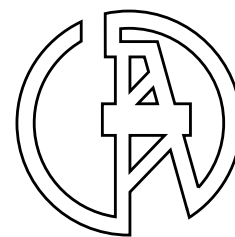
Материалы приводятся в авторской редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых статей.

Отпечатано в типографии издательства УГНТУ с готовых электронных файлов.

ELECTRICAL AND DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY



USPTU

№ 4, v. 15, 2019

The journal was founded in 2005. Issued 4 times a year.

Founder

Federal State-Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University» (USPTU)

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of theses on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences».

International standard serial number ISSN 1999-5458.

Editorial board:

Editor-in-chief:

M.I. Khakimyanov — Dr. Sci. Tech. Assoc. Prof.
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological
University» (Ufa, Russian Federation)

Deputy editor-in-chief:

Sh.Z. Valiev — Cand. Sci. Tech., Dr. Sci. Econ., Prof.
of FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological
University» (Ufa, Russian Federation)

Members of an editorial board:

V.M. Artyushenko — Dr. Sci. Tech., Prof. of SBEI HE
MR «University of Technology»
(Moscow, Russian Federation)



B.M. Gorshkov — Dr. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Volga Region State University of Service»
(Tolyatti, Russian Federation)



M.Yu. Dolomatov — Dr. Sci. Chem., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russian Federation)



V.G. Krymsky — Dr. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russian Federation)



V.G. Kushnir — Dr. Sci. Tech., Prof. of Kostanaysky
State University of Ahmet Baytursynov
(Kostanay, Kazakhstan)



S.V. Pavlov — Dr. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Aviation Technical University»
(Ufa, Russian Federation)



R.R. Safin — D. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russian Federation)



B. Brudnik — Dr. Sci. Tech., Leading Researcher
of Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel)



A.F. Romanchenko — Dr. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russian Federation)



P.S. Serenkov — Dr. Sci. Tech., Prof. of Byelorussian
National Technical University»
(Minsk, Byelorussia)



M.A. Urakseev — Dr. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Aviation Technical University»
(Ufa, Russian Federation)



N.A. Feoktistov — Dr. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Moscow State University of Design and Technology»
(Moscow, Russian Federation)



F.F. Hizbullin — Dr. Sci. Chem., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russian Federation)



V.A. Shabanov — Cand. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Ufa State Petroleum Technological University»
(Ufa, Russian Federation)



R.B. Yarullin — Dr. Sci. Tech., Prof. of FSBEI HE
«Bashkir State Agrarian University»
(Ufa, Russian Federation)



I. Zicmane — Dr. Sci. Tech., Prof. of Riga Technical
University, Expert the Latvian Council of Science
(Riga, Latvia)



G.D. Georgiev — Dr. Sci. Tech., Lecturer Technical
University (Varna, Bulgaria)



I.V. Pentegov — Dr. Sci. Tech., Prof., Leading Researcher
the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National
Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)



Assistant editor: A. A. Mukhamadiev

Technical editor: S. V. Khalitova

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC).

Access and subscription to the electronic version of the journal is available on the website www.ugues.ru.

Mass media registration certificate ПИ № ФС 77-67387 dd. 05.10.2016 given by Federal service of supervision in the scope of communication, information technologies and mass media.

© Ufa State Petroleum Technological University, 2019.

Address of Editors office and Founder: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Tel. (347) 243-16-19, ies.rusoi.net

Price is free. **12+**

Publishing authorized on 09.12.2019. Paper format 60×84/8. Offset printing. 16.27 publication base sheets.

Volume 1 000 copies. Order № 205.

Address of Publishing Office: 450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced without prior written consent of the Editors office of the «Electrical and data processing facilities and systems».

The items of this publication preserve original edition by their authors.

The Editors office do not always share an opinion of authors of the articles published.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Кушнин В.Г., Кошкин И.В., Грязнова Е.Д.</i> Моделирование режимов электрической сети с учетом влияния переходного сопротивления на точность определения места повреждения в сетях напряжением 6-35 кВ	5
<i>Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С., Киснеева Л.Н., Тухбатуллина Д.И.</i> К вопросу о развитии теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта	12
<i>Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б.</i> Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева	19
<i>Шуваева А.О., Труднев С.Ю.</i> Моделирование источника автономной катодной защиты	30
<i>Герасимов В.Е., Дмитриев А.А., Малышева Н.Н.</i> Разработка концепции энергоэффективного управления системами промышленного электрообогрева нефтегазовых промыслов	39
<i>Ахметшин Р.С., Пичугин П.И.</i> Влияние взаимоиндукции в некоторых вопросах работы и эксплуатации электрооборудования и электрических сетей	48
<i>Галимова А.А.</i> Методика расчета относительного срока службы трансформатора в распределительных сетях на этапе проектирования	56
<i>Решетняк М.Ю.</i> Исследование гармонического состава в электрических сетях поверхностного комплекса высокопроизводительных угольных шахт	61
<i>Герасименко А.А., Пузырев Е.В.</i> Программная реализация детерминированной и статистической методики расчёта потерь электроэнергии и учёта множества режимов электрической сети	68
<i>Хазиева Р.Т., Иванов М.Д.</i> Математическая модель колебательной механической системы	74
<i>Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Калимгулов А.Р., Сергеенкова Е.В.</i> Исследование зависимости КПД электродвигателя и преобразователя частоты от коэффициента загрузки и частоты вращения	83

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

<i>Казанцев В.П., Даденков Д.А., Поносова Л.В.</i> Следящая система управления электроприводами сеточной части бумагоделательной машины	91
<i>Дорофеев Р.С., Дорофеев А.С.</i> Применение авторской системы поддержки принятия решений «квалиметрическая экспертиза» для оценки биологических объектов	99
<i>Шулаева Е.А., Маиштанов Н.М., Иванов А.Н.</i> Моделирование ртутного электролизера для получения каустической соды с применением нейронной сети	107
<i>Самаров Е.К.</i> Сравнительный анализ алгоритмов сжатия изображений	114

НАНОЭЛЕКТРОНИКА И КВАНТОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Доломатов М.Ю., Шуткова С.А., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И., Рыжиков О.Л., Гильманишина К.А.</i> Исследование донорно-акцепторных свойств аморфных полупроводников на основе нанокластеров нефтяных асфальтенов	121
Об авторах	128
Список статей, изданных в 2019 году	136

CONTENT

ELECTRICAL FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Kushnir V.G., Koshkin I.V., Gryaznova E.D.</i> Modeling of electric network modes taking into account the influence of transient resistance on the accuracy of determining the fault location in 6–35 kV networks	5
<i>Auhadeev A.E., Litvinenko R.S., Kisneeva L.N., Tukhbatullina D.I.</i> About theory of traction electric equipment of urban electric transport	12
<i>Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B.</i> Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection	19
<i>Shuvaeva A.O., Trudnev S.Yu.</i> Simulation of autonomous cathodic protection source	30
<i>Gerasimov V.E., Dmitriev A.A., Malysheva N.N.</i> Concept development of energy-efficient management of industrial electric heating systems for oil and gas fields	39
<i>Ahmetshin R.S., Pichugin P.I.</i> Mutual induction influence on specific terms of electrical equipment and electrical circuits use and operation	48
<i>Galimova A.A.</i> Calculation method of transformer relative service life in distribution networks at the design stage	56
<i>Reshetnyak M.Yu.</i> Harmonic composition study in electrical networks of surface complex of high-performance coal mine	61
<i>Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V.</i> Software implementation of deterministic and statistical methods for calculating power losses and accounting for multiple modes of electric network	68
<i>Khazieva R.T., Ivanov M.D.</i> Simplified mathematical model of the oscillating mechanical system	74
<i>Shabanov V.A., Khakimov E.F., Kalimulov A.R., Sergeenkova E.V.</i> Research of dependence of electric motor efficiency and frequency converter on loading rate and rotation frequency	83

DATA PROCESSING FACILITIES AND SYSTEMS

<i>Kazantsev V.P., Dadenkov D.A., Ponosova L.V.</i> Electric servo drive system of paper machine	91
<i>Dorofeev R.S., Dorofeev A.S.</i> Application of the author's decision support system «qualimetric expertise» for biological objects assessment	99
<i>Shulaeva E.A., Mashtanov N.M., Ivanov A.N.</i> Modeling of the mercury electrolytic cell to obtain caustic soda using a neural network	107
<i>Samarov E.K.</i> Comparative analysis of image compression algorithms	114

NANOELECTRONICS AND QUANTUM DATA SYSTEMS

<i>Dolomatov M.Yu., Shutkova S.A., Bakhtizin R.Z., Sharipov T.I., Ryzhikov O.L., Gilmanshina K.A.</i> Research of amorphous semiconductors donor and acceptor properties on oil asphaltene nanoclusters basis	121
About the authors	128
List of articles published in 2019	136



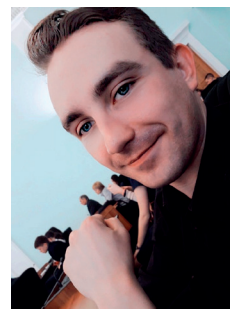
Шулаева Е. А.
Shulaeva E. A.

кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Автоматизированные
технологические и
информационные системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
филиал,
г. Стерлитамак,
Российская Федерация



Маиштанов Н. М.
Mashtanov N. M.

студент кафедры
«Автоматизированные
технологические и
информационные системы»,
ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет»,
филиал,
г. Стерлитамак,
Российская Федерация



Иванов А. Н.
Ivanov A. N.

аспирант,
ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный
университет»,
г. Уфа, Российская
Федерация

УДК 004.94

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-107-113

МОДЕЛИРОВАНИЕ РТУТНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАУСТИЧЕСКОЙ СОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются удобным и естественным базисом для представления информационных моделей и обладают рядом преимуществ. Они не требуют формализации задачи и позволяют адаптировать свойства нейросетевой модели к задачам теоретически неограниченной размерности и сложности.

Единственным требованием является возможность описания моделируемого явления непрерывными функциями. Скорость создания нейросетей существенно выше, чем моделей, создаваемых традиционными методами, а трудоемкость разработки ниже. Кроме того, метод нейронных сетей является новым, перспективным и активно развивающимся, что в условиях усложнения технологических моментов позволяет оставаться конкурентоспособным.

Данная работа посвящена нейросетевому моделированию режима работы ртутного электролизера при получении чистой каустической соды. Взаимосвязи между параметрами электролизера весьма сложны, вследствие чего использование традиционных методов моделирования неэффективно, причем отклонение параметров электролизера от нормальных может привести к катастрофическим последствиям.

В ходе работы разработана нейросетевая модель работы ртутного электролизера. Для создания и обучения нейронных сетей была использована программа Deductor Academic.

Целью данной работы являлось создание точной модели ртутного электролизера при помощи следующих задач: проектирование оптимальных структур нейронных сетей и процесса их обучения, создание модели электролизера путем обучения нейронных сетей, а также обработка результатов моделирования.

В результате данной работы была разработана нейросетевая модель, которая позволяет рассчитывать быстро и точно результат работы электролизера при любых начальных условиях.

Ключевые слова: нейронная сеть, ртутный электролизёр, каустическая сода, моделирование, нейросетевой метод, resilient propagation.

MODELING OF THE MERCURY ELECTROLYTIC CELL TO OBTAIN CAUSTIC SODA USING A NEURAL NETWORK

Artificial neural networks (ANN) are a convenient and natural basis for the presentation of information models, and have several advantages. They do not require formalization of the problem and allow adapting the properties of the neural network model to problems of theoretically unlimited dimension and complexity.

The only requirement is the ability to describe phenomenon by continuous functions. The speed of creating neural networks is significantly higher than the models created by traditional methods, and the complexity of development is lower. In addition, the method of neural networks is a new, promising and actively developing, which, given the complexity of technological issues, allows to remain competitive.

This work is devoted to neural network modeling of the operation mode of a mercury electrolytic cell when producing pure caustic soda. The interconnections between the parameters of the electrolytic cell are very complex, as a result of which the use of traditional modeling methods is inefficient, and the deviation of the parameters of the electrolytic cell from normal can lead to catastrophic consequences.

In the course of work, a neural network model of the operation of a mercury electrolytic cell was developed. The Deductor Academic program was used to create and train neural networks.

The aim of this work was to create an accurate model of a mercury electrolytic cell using the following tasks: designing optimal structures of neural networks and the process of their training, creating an electrolytic cell model by training neural networks, and also processing modeling results.

As a result of this work, a neural network model was developed, which allows you to quickly and accurately calculate the result of the electrolytic cell operation under any initial conditions.

Key words: neural network, mercury electrolytic cell, caustic soda, modeling, neural network method, resilient propagation.

Стремительно развивается направление прикладной математики, специализирующееся на искусственных нейронных сетях. Искусственные нейронные сети используют для распознавания образов таких высоких технологий, как Google, Yandex и др. В передовых нефтяных компаниях иницируются и разрабатываются проекты по принципу интеллектуального месторождения. С учетом мировых и российских инновационных тенденций в нефтяной отрасли происходит модернизация нефтегазовой промышленности в сферах интеллектуализации месторождений и высоких технологий [1], в том числе и производства каустической соды.

Взаимосвязь параметров режима работы ртутного электролизёра является достаточно сложной. Так, напряжение на рамах электролизера зависит от силы тока и от сопротивления раствора (по закону Ома). Однако сопротивление раствора зависит от: температуры раствора, концентрации хлористого натрия в растворе и газонаполнения раствора пузырьками хлора. Последнее зависит от давления хлорогаза и множества других

параметров, в том числе и от напряжения (рисунок 1).

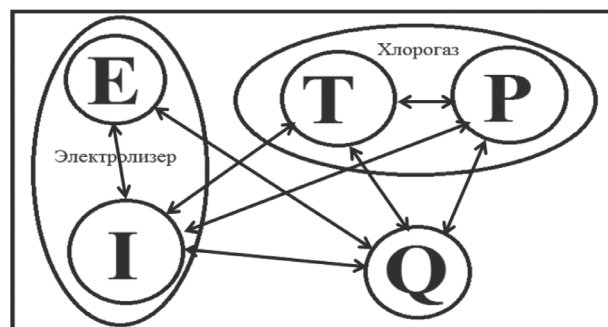


Рисунок 1. Взаимосвязь параметров электролизера

Отклонения таких показателей, как ток и напряжение, при работе ртутного электролизера может привести к следующим последствиям:

- увеличение силы тока приводит к увеличенному образованию хлора, повышению давления в коллекторе хлора, что может вызвать разрыв трубопроводов, поломку компрессоров хлора, а также повреждение самого электролизера вплоть до взрыва;
- рост силы тока и напряжения вызывают увеличение тепловых потерь в ходе

электролиза, за счет чего повышается температура электролита и ртути. Данное обстоятельство может привести к вскипанию электролита и, как следствие, к аварии;

— повышенное напряжение приводит к снижению перенапряжения водорода (т.е. к росту его выделения в ходе электролиза воды). Выделяющийся водород образует взрывоопасную смесь с хлором, что может стать причиной крупной аварии;

— низкий ток приведет к снижению образования хлора, а также натрия в амальгаме, что снизит производительность. Также упадет качество за счет большей доли примесей в технологических потоках;

— низкое напряжение (ниже перенапряжения по хлору) приведет к полному прекращению процесса электролиза хлористого натрия [2].

Нейросетевое моделирование режима работы ртутного электролизера предупреждает возникновение всех этих негативных явлений, тем самым обеспечивая безопасность технологического процесса.

Объектом моделирования в данной работе является ртутный электролизер для производства каустической соды.

Входные параметры для моделирования режима работы ртутного электролизера: водородный показатель pH рассола на электролизере (pH); сила тока на электролизер, кА (I); расход обессоленной воды в передние карманы электролизной ванны, м³/ч (Q_{aqua}); температура обессоленной воды, °C (T_{aqua}); температура рассола на электролизерах, °C (T_{ras}); концентрация NaCl в рассоле, г/л (C_{NaCl_ras}); объемный расход рассола на электролизеры, м³/ч (Q_{ras}); объемный расход ртути в электролизере, м³/ч (Q_{Hg}).

Выходные параметры для моделирования режима работы ртутного электролизера: температура анолита, °C (T_{anolit}); напряжение рамы электролизера № 1, В (E1); напряжение рамы электролизера № 2, В (E2); напряжение рамы электролизера № 3, В (E3); напряжение рамы электролизера № 4, В (E4); объемная доля водорода в хлорогазе, % об. (C_{H2_in_Cl2}); концентрация хлора в хлорогазе, % об. (C_{Cl2}); температура хлорогаза, °C (T_{Cl2}); разряжение хлорогаза, мм.вод.ст. (P_{Cl2});

концентрация NaCl в анолите, г/л (C_{NaCl_anolit}).

Для моделирования в качестве данных использованы значения параметров электролизера в разные моменты времени. Эти данные получены опытным путем и загружены в программу Deductor Academic.

Имеющиеся данные использованы для построения и обучения нейронных сетей. Обученные нейронные сети использованы для расчета ими возможных значений параметров электролизера.

В рамках данной статьи была представлена модель для следующих выходных параметров: объемная доля водорода в хлорогазе (C_{H2_in_Cl2}), концентрация хлора в хлорогазе (C_{Cl2}), температура хлорогаза (T_{Cl2}), разряжение хлорогаза (P_{Cl2}).

Необходимое количество нейронов в скрытых слоях персептрона можно определить по формуле, являющейся следствием теорем Арнольда-Колмогорова-Хехт-Нильсена [3–7]:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y,$$

$$\frac{4 \cdot 1676}{1 + \log_2(1676)} \leq N_w \leq 8 \cdot \left(\frac{1676}{8} + 1 \right) \cdot (4 + 8 + 1) + 8,$$

$$573 \leq N_w \leq 10950,$$

где N_y — размерность выходного сигнала ($N_y=4$);

N_w — необходимое число синаптических связей;

N_x — размерность входного сигнала ($N_x=8$);

Q — число элементов множества обучающих примеров ($Q=1676$).

Оценив с помощью этой формулы необходимое число синаптических связей N_w , можно рассчитать необходимое число нейронов в скрытых слоях. Например, число нейронов в скрытых слоях двухслойного персептрона будет равно: $N = \frac{N_w}{N_x + N_y}$.

Минимальное число нейронов равно:

$$N = \frac{573}{8 + 4} = 40.$$

Максимальное число нейронов:

$$N = \frac{10950}{8 + 4} = 912.$$

Для обучения первой нейросети выбирается минимальное значение нейронов на единственном скрытом слое — 40.

Далее необходимо определить максимально допустимую ошибку. Выходной параметр непрерывен, лежит в интервале от 0,709 до 1,279. На производстве каустической соды точность измерения объемной доли водорода в хлорогазе составляет 0,01 %.

Именно с такой точностью было дано напряжение в исходных данных. Таким образом, минимальная ошибка должна составлять не

$$\text{более, чем } \varepsilon = 0,01 \cdot \frac{1}{|0,709 + 1,279|} = 0,018.$$

Устанавливается значение ошибки равным 0,005. Количество эпох равно 1000.

В таблице 1 представлены параметры обучения нейронных сетей.

Таблица 1. Параметры обучения нейронных сетей

Обучающее множество (строк)	1676 (80 %)
Тестовое множество (строк)	419 (20 %)
Тип функции	Сигмоида
Крутизна	1
Алгоритм	RPROP
Шаг спуска	0,5
Шаг подъема	1,2
Допустимая ошибка	0,05
Количество эпох	1000

На рисунке 2 представлен результат обучения первой нейронной сети 8×40×4 после превышения количества эпох обучения.

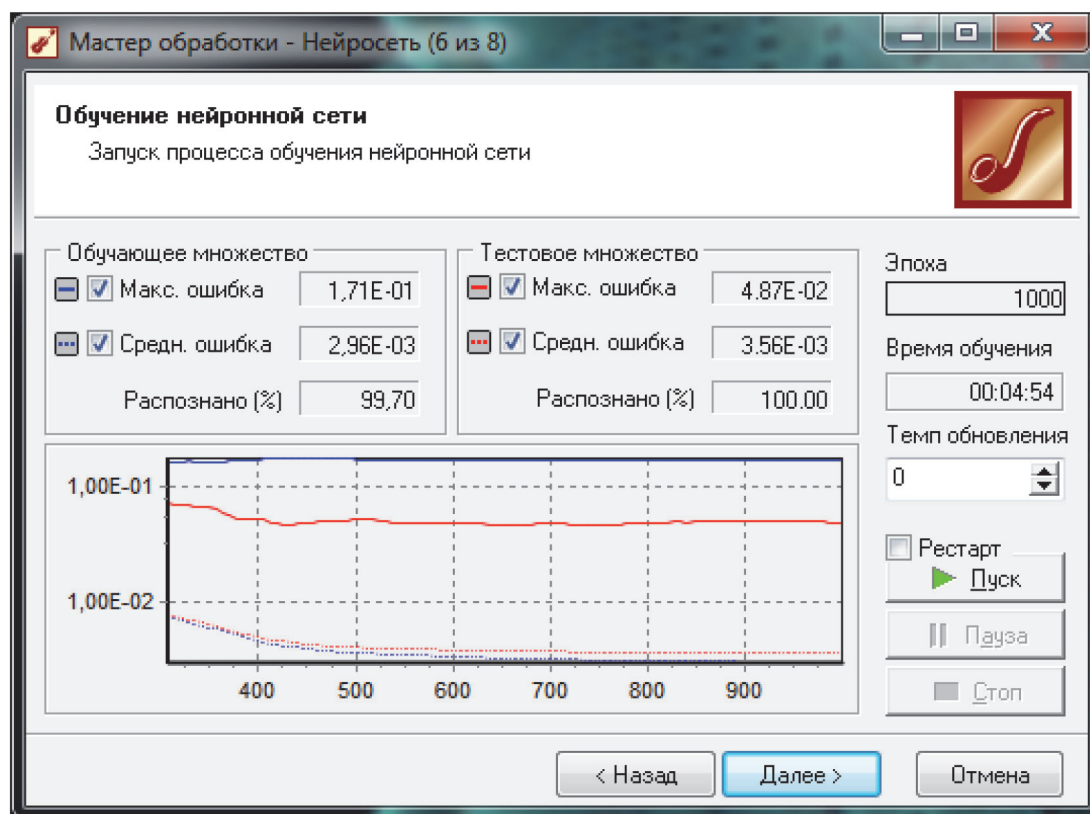


Рисунок 2. Результат обучения сети 8×40×4

Аналогично создается вторая нейросеть с одним скрытым слоем. Параметры аналогичны предыдущей сети за исключением числа нейронов на скрытом слое — оно равно максимальному значению и равняется 912 нейронов. Обучение завершилось после превышения количества эпох (рисунок 3).

Третья нейросеть создается с двумя скрытыми слоями. Количество нейронов в обоих скрытых слоях одинаково. Формула количества синаптических связей:

$$N \cdot N_x + N^2 + N \cdot N_y = N_w;$$

$$N \cdot 8 + N^2 + N \cdot 4 = 1676.$$

Решая полученное уравнение, находим его положительный корень: $N = 89,789 \approx 99$.

Таким образом, создаем сеть с 2 скрытыми слоями по 99 нейронов в каждом. Обучение завершилось после превышения количества эпох (рисунок 4).

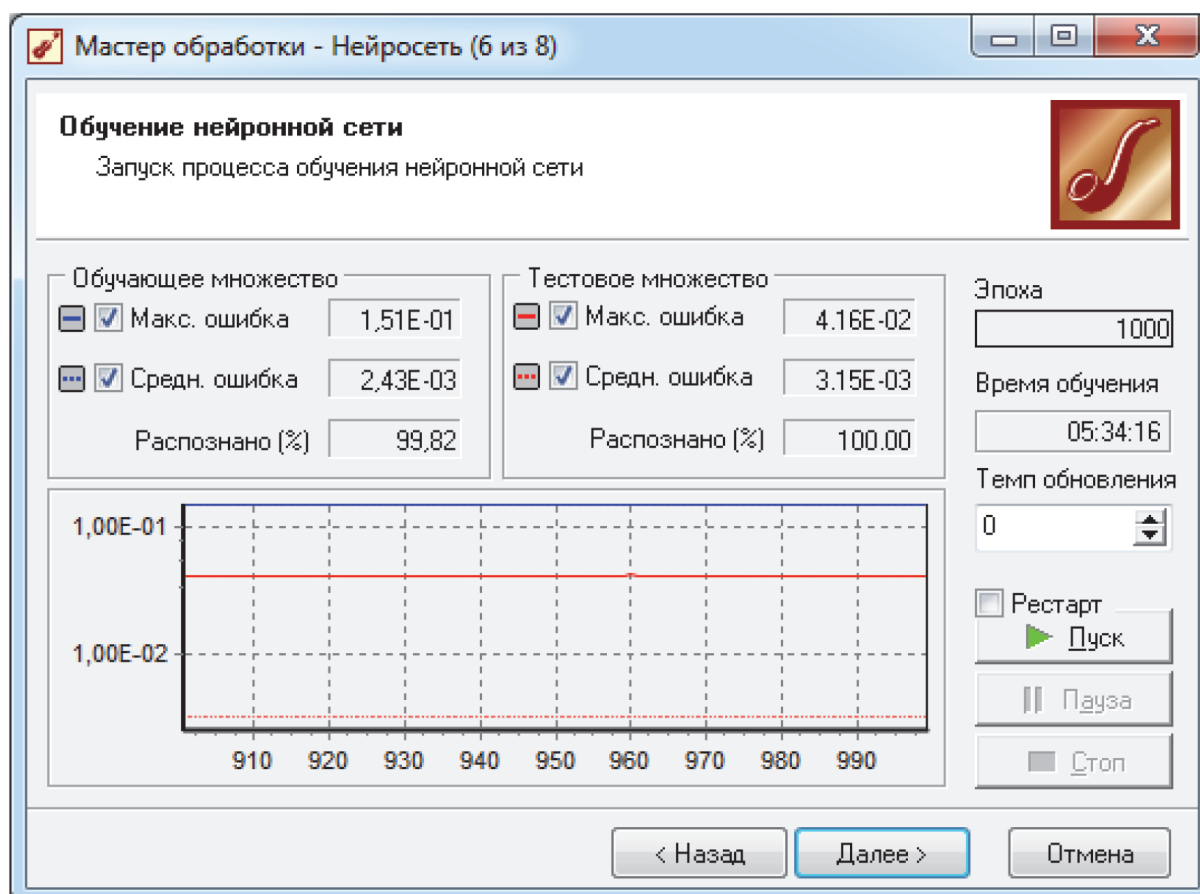


Рисунок 3. Результат обучения сети 8×912×4

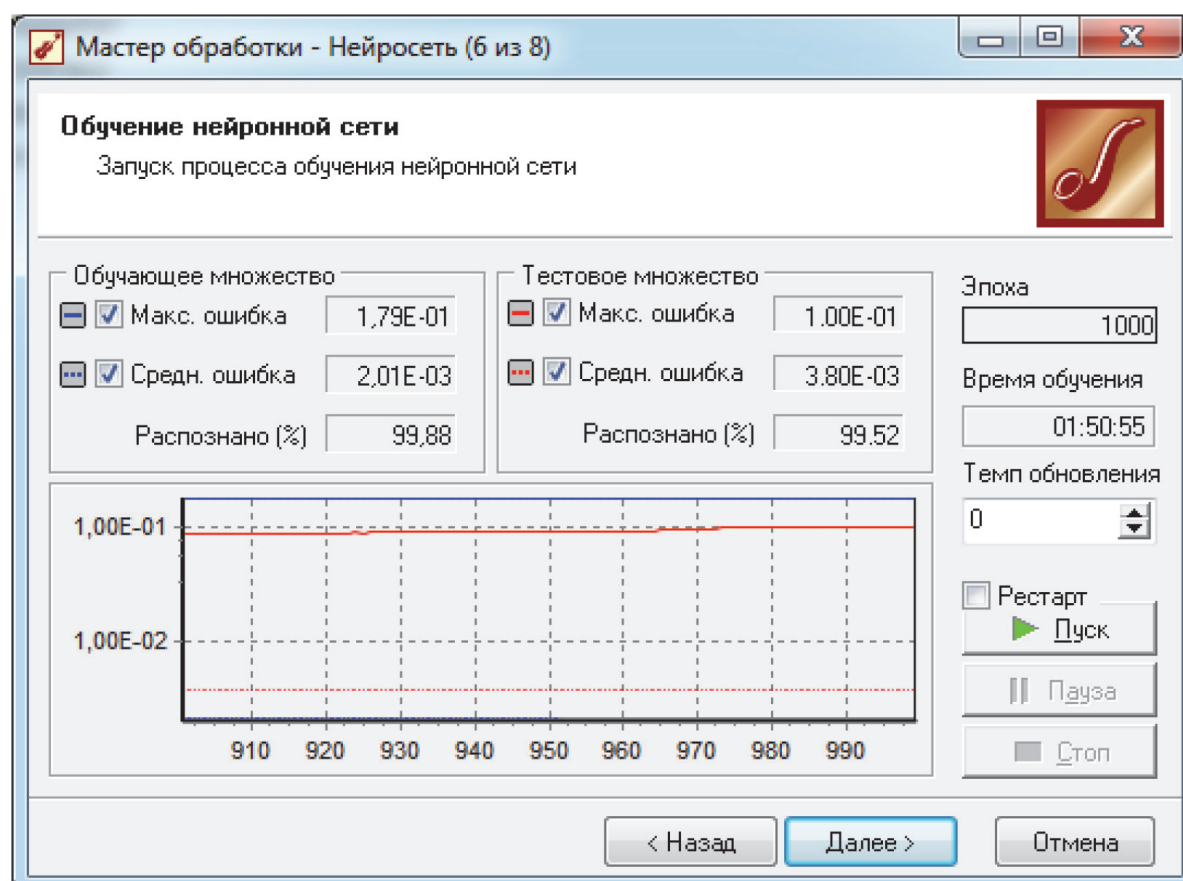


Рисунок 4. Результат обучения сети 8×99×99×4

Наконец проводится выбор наиболее точной нейросети. Критерием для выбора является средняя ошибка тестового множе-

ства. После сравнения представленных в таблице 2 результатов наиболее точной оказалась нейросеть $8 \times 912 \times 4$.

Таблица 2. Сравнение результатов обучения нейронных сетей

Нейросеть	I	II	III
Число скрытых слоев	1	1	2
Число нейронов	40	912	99 / 99
Время обучения	4 мин 54 с	5 ч 34 мин 16 с	1 ч 50 мин 55 с
Обучающее множество			
Распознано, %	99,70	99,82	99,88
Максимальная ошибка	0,0171	0,0151	0,0179
Средняя ошибка	0,000296	0,000243	0,000201
Тестовое множество			
Распознано, %	100,00	100,00	99,52
Максимальная ошибка	0,00487	0,00416	0,01000
Средняя ошибка	0,000356	0,000315	0,000380

Выводы

В ходе данной работы были рассчитаны нейросетевые модели получения хлорогаза ртутного электролизера и выбрана наиболее точная. Полученная нейросетевая модель режима работы ртутного электролизёра обладает высоким потенциалом к практическому использованию. Так, она может быть внедрена на производство каустической соды

для системы безопасности и предсказания аварийных ситуаций, а также использована для расчёта параметров электролизёра при его проектировании и реконструкции. Данный метод моделирования также может быть использован для технологической установки любой сложности при условии наличия экспериментальных данных.

Список литературы

1. Подольский А.К. Применение методов искусственного интеллекта в нефтегазовой промышленности // Современная наука. 2016. № 3. С. 33–36.
2. Бесчатнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. М.: Химия, 1976. 368 с.
3. Арнольд В.И. О функциях трех переменных // Докл. АН СССР. 1957. Т. 114, № 4. С. 679–681.
4. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Докл. АН СССР. 1957. Т. 114. С. 953–956.
5. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 236 с.
6. Kolmogorov A.N. On the Representation of Continuous Functions of Many Variables by Superposition of Continuous Functions of One Variable and Addition // American Math. Soc. Transl. 1963. No. 28, pp. 55–63.

7. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks, San Diego. 1987. Vol. 3. P. 11–13.

References

1. Podol'skii A.K. Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta v neftegazovoi promyshlennosti [The Application of Artificial Intelligence Methods in the Oil and Gas Industry]. *Sovremennaya nauka — Modern Science*, 2016, No. 3, pp. 33–36. [in Russian].
2. Beschatnov M.V., Sokolov V.M., Kats M.I. *Avarii v khimicheskikh proizvodstvakh i mery ikh preduprezhdeniya* [Accidents in Chemical Production and Their Prevention]. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 368 p. [in Russian].
3. Arnol'd V.I. O funktsiyakh trekh peremennykh [About the Functions of Three Variables]. *Doklady AN SSSR — Reports of AS USSR*, 1957, Vol. 114, No. 4, pp. 679–681. [in Russian].
4. Kolmogorov A.N. O predstavlenii nepreryvnykh funktsii neskol'kikh peremennykh v vide superpozitsii nepreryvnykh funktsii

odnogo peremennogo i slozheniya [On the Representation of Continuous Functions of Several Variables as Superpositions of Continuous Functions of One Variable and Addition]. *Doklady AN SSSR — Reports of AS USSR*, 1957, Vol. 114, pp. 953–956. [in Russian].

5. Wossermen F. *Neirokomp'yuternaya tekhnika: Per. s angl.* [Neurocomputer Technology: Transl. from Engl.]. Moscow, Mir Publ., 1992. 236 p. [in Russian].

6. Kolmogorov A.N. On the Representation of Continuous Functions of Many Variables by Superposition of Continuous Functions of One Variable and Addition. *American Math. Soc. Transl.*, 1963, No. 28, pp. 55–63.

7. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem. *IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks*, San Diego, 1987, Vol. 3, pp. 11–13.

Доломатов Михаил Юрьевич

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры технологии нефти и газа, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры физической электроники и нанофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

Дорофеев Андрей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вычислительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: dorbaik@istu.edu

Дорофеев Роман Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Российская Федерация

Иванов Александр Николаевич

аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Российская Федерация

Иванов Максим Дмитриевич

студент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

Казанцев Владимир Петрович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация

Калимгулов Айрат Ринатович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа. Российская Федерация, e-mail: airatkr@gmail.com

Кирпичникова Ирина Михайловна

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск, Российская Федерация

Киснеева Ляйля Нургалиевна

старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Российская Федерация

Кошкин Игорь Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и физики, Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан

Gilmanshina Karina A.

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Gryaznova Ekaterina D.

Undergraduate Student, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan

Khazieva Regina T.

Cand. Sci. Tech., Senior Lecturer of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: khazievart@mail.ru

Ivanov Aleksandr N.

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State University», Ufa, Russian Federation

Ivanov Maxim D.

Student of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation

Kalimgulov Ayrat R.

Cand. Sci. Phys.-Math., Assistant Professor of Electrical Engineering and Electrical Facilities of Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Ufa, Russian Federation, e-mail: airatkr@gmail.com

Kazantsev Vladimir P.

Dr. Sci. Tech., Associate Professor, Professor of Microprocessor Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russian Federation

Khakimov Emil F.

Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University», Ufa, Russian Federation, e-mail: hair99@inbox.ru

Kirpichnikova Irina M.

Dr. Sci. Tech., Professor, Head of Electric Power Generation Stations, Networks and Supply Systems Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «South Ural State University», Chelyabinsk, Russian Federation

Kisneeva Lyaila N.

Senior Lecturer of Electrotechnical Complexes and Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation

Koshkin Igor V.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Head of Electric Power and Physics Department, Kostanay State University named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan

Kushnir Valentina G.

Dr. Sci. Tech., Professor, Vice-Rector, Kostanay State University Named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan, e-mail: valkush@mail.ru

Litvinenko Ruslan S.

Cand. Sci. Tech., Associate Professor, Assistant Professor of Electrotechnical Complexes and Systems Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation