



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2024. Т. 32, № 1

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2024. Том 32. № 1

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

В. Наске (проф., Германия)

М. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2024. Том 32. № 1)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.
Федеральная служба по надзору
в сфере связи информационных
технологий и массовых
коммуникаций

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, Самарская область,
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Подписано в печать 30.05.24
Выход в свет 20.06.24

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 27,27 п.л.
Уч.-изд. л. 26,62 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 70/24
Заказ № 214

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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 по следующим группам научных специальностей: 2.3 – Информационные технологии и коммуникации; 2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.4 – Энергетика и электротехника. Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2024
© Самарский государственный
технический университет, 2024

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2024. Vol. 32. Issue 1

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)

Yu.B. Kazakov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU
and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>)
and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Ural-Press catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Афанасьева О.С., Егорова Г.Ф., Афанасьева Е.А.</i> Прогнозирование диаграмм состояния двухкомпонентных солевых систем	6
<i>Гнутов М.С., Гнутов С.К., Титаренко В.Н.</i> Оценка эффективности работы автоматизированных систем на базе процессоров с архитектурой VLIW и x86-64 с помощью тестирования.....	18
<i>Деревянов М.Ю.</i> Системный анализ сложноструктурированного комплекса переработки нефтесодержащих отходов.....	32
<i>Заровчатская Е.В., Мисник А.Е., Аверченков О.Е.</i> Комплексное повышение эффективности управления обучением сварщиков на основе алгоритмов роевого интеллекта и эволюционного моделирования.....	56
<i>Moiseeva T.V.</i> Intersubjective Management Theory: Decision Support System Creation.....	74

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

<i>Боровик С.Ю., Данильченко В.П., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н.</i> Погрешности измерения осевых перемещений вала в системе контроля состояния радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя НК-33 на основе одновитковых вихретоковых датчиков	86
<i>Плотников Д.А., Лачин В.И., Муженко А.С.</i> Оценка интенсивности межмодульного взаимодействия и выбор средств его организации в системах вибромониторинга турбоагрегатов.....	102

Энергетика и электротехника

<i>Зубков Ю.В., Владимиров Д.А., Бикташев И.Х.</i> Численно-аналитический расчет механических напряжений ротора синхронной электрической машины с встроенными постоянными магнитами	116
<i>Пешкин К.С.</i> Проблемно-ориентированная численная модель процесса зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки	130

Информационные технологии и коммуникации

УДК 541.123/.123.8/9

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СОЛЕВЫХ СИСТЕМ*

О.С. Афанасьева, Г.Ф. Егорова, Е.А. Афанасьева

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: afanaseva.os@samgtu.ru, galahouse2009@mail.ru, afanaseva.ea@samgtu.ru

Аннотация. В статье предлагается методика прогноза и приближенного расчета характеристик диаграмм состояния двухкомпонентных систем. Представлены результаты статистического анализа диаграмм плавкости 200 солевых систем с общим катионом и 100 систем с общим анионом. Рассматриваются два признака наличия эвтектических точек у бинарных систем и методика приближенного расчета значений температуры и концентрации эвтектической точки. Первый критерий наличия или отсутствия эвтектических точек в системе определяется с помощью удельных изобарных теплоемкостей компонентов. Второй критерий основан на известном факте – большей разнице значений энтропий для компонентов эвтектических систем, чем разница величин энтропий для компонентов систем с непрерывными рядами твердых растворов. Приведена методика приближенных расчетов значений температур и состава эвтектических точек двухкомпонентных солевых систем, в которых отсутствует промежуточное химическое взаимодействие между компонентами. Проведен сравнительный анализ результатов вычислений по предложенной авторами методике и значений термодинамических характеристик эвтектик, полученных с помощью уравнения Шредера – Ле Шателье. Адекватность предлагаемой модели анализа и определения термодинамических характеристик двухкомпонентных солевых систем подтверждается результатами расчетов состава и температур эвтектик 120 двухкомпонентных систем, средние погрешности, которых составили 6% по концентрациям и 7% по температурам. На основе предложенной процедуры аппроксимации создана программа расчета на языке Pascal в визуальной среде Delphi с пользовательским интерфейсом. Одним из преимуществ этой среды является то, что исполняемые модули программ, созданные в ней, не требуют оснащения компьютера дополнительным программным обеспечением, кроме наличия операционной системы.

Ключевые слова: эвтектика, двухкомпонентные солевые системы, концентрация, температура плавления, энтальпия, энтропия, теплоемкость, дистектика, перитектика, абсолютная погрешность, относительная погрешность



© Автор(ы), 2024

*Ольга Сергеевна Афанасьева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика».

Галина Федоровна Егорова, кандидат технических наук, доцент.

Елена Андреевна Афанасьева, аспирант кафедры «Прикладная математика и информатика».

Введение

Задачей исследования, результаты которого представлены в данной статье, являлась разработка методики приближенных расчетов характеристик эвтектических двухкомпонентных систем с целью снижения материальных затрат на проведение экспериментов. Не секрет, что большинство проблем с решением вопросов, связанных с фазовыми переходами, возникает в связи с отсутствием данных или расхождениями в их значениях для таких существенных термодинамических характеристик химических систем, как теплота и энтропия этих процессов в различной литературе и в Internet [1–11].

Авторами был проведен статистический анализ 200 солевых систем с общим катионом и 100 солевых систем с общим анионом [12, 13]. Эти солевые системы имеют ряд существенных отличий, данные о которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Особенности солевых систем

Двухкомпонентные системы	Непрерывный ряд твердых растворов	Наличие конгруэнтно плавящихся соединений	Наличие инконгруэнтно плавящихся соединений	Эвтектические (одна эвтектическая точка)
С общим катионом	25 %	15 %	3 %	57 %
С общим анионом	20 %	35 %	25 %	30 %

Как видно из табл. 1, большая часть солевых систем с общим анионом отличаются, кроме имеющих эвтектических точек, наличием конгруэнтно и инконгруэнтно плавящихся соединений, что существенно затрудняет исследование и прогнозирование фазовых равновесий и координат эвтектических расплавов. Это главная причина, по которой попытки авторов выведения признаков наличия эвтектических точек на основе статистического анализа для солевых систем с общим анионом оказались безуспешными. Однако авторам удалось вывести эмпирическую формулу, позволяющую прогнозировать наличие эвтектической точки для солевых систем с общим катионом. В ходе вычислительных экспериментов выяснилось, что главное отличие между эвтектическими системами и системами из непрерывных рядов твердых растворов состоит в том, что средневзвешенные значения удельных изобарных теплоемкостей простых веществ компонентов неэвтектических систем мало отличаются между собой. Рассмотрим две бинарные системы с общим катионом: AgBr-AgI и $\text{BaBr}_2\text{-BaCl}_2$. Первая имеет единственную эвтектическую точку, а вторая представляет собой непрерывный ряд твердых растворов [12]. Значения удельных изобарных теплоемкостей (Дж/гК) взяты из [14]: $\text{Ag} - 0,237$; $\text{Br} - 0,474$; $\text{I} - 0,214$; $\text{Ba} - 0,2$; $\text{Cl} - 0,497$. Обозначим через \tilde{C}_1 , \tilde{C}_2 средневзвешенные удельные изобарные теплоемкости. Для AgBr-AgI значения \tilde{C}_1 , \tilde{C}_2 и разность между ними будут следующими:

$$\tilde{C}_1 = \frac{0,247 + 0,474}{2} = 0,361; \quad \tilde{C}_2 = \frac{0,247 + 0,214}{2} = 0,231; \quad |\tilde{C}_1 - \tilde{C}_2| = 0,13.$$

Для $\text{BaBr}_2\text{-BaCl}_2$

$$\tilde{C}_1 = \frac{0,2 + 0,474 \cdot 2}{3} = 0,38; \quad \tilde{C}_2 = \frac{0,2 + 0,497 \cdot 2}{3} = 0,4; \quad |\tilde{C}_1 - \tilde{C}_2| = 0,02.$$

Статистический анализ 200 эвтектических систем с общим катионом показал, что для 130 систем выполняется неравенство

$$0,1 < |\tilde{C}_1 - \tilde{C}_2|. \quad (1)$$

Среди таких систем присутствуют системы следующего вида:

115 (85 %) – это эвтектические системы с одной эвтектической точкой;

10 (11 %) – эвтектические системы с наличием инконгруэнтно и конгруэнтно плавящихся соединений;

3 (2 %) – с наличием непрерывных рядов твердых растворов;

2 (2 %) – с полной взаимной нерастворимостью.

Среди оставшихся 70 систем, для которых оказывается справедливым неравенство (1), имеются системы следующего вида:

1. 47 (70 %) – системы, образующие при соединении непрерывные ряды твердых растворов;

2. 13 (20 %) – системы с одним или несколькими конгруэнтно плавящимися соединениями;

3. 6 (7 %) – эвтектические системы;

4. 4 (3 %) – системы с наличием инконгруэнтно плавящихся соединений.

Эти результаты приводят к выводу, что для систем с общим катионом существует корреляция между значениями средневзвешенных удельных изобарных теплоемкостей простых веществ, входящих в состав компонентов, и наличием или отсутствием эвтектических точек в этих бинарных системах. Выявленная закономерность для систем с общим катионом позволяет до проведения эксперимента при выполнении (1) прогнозировать в 85 % случаев наличие эвтектической точкой и при нарушении (1) для 70 % систем – наличие непрерывных рядов растворов.

Для солевых систем с общим анионом ввиду их перегруженности разными типами фазовых равновесий такой закономерности не наблюдается, поэтому выведенный авторами критерий (1) для таких систем не работает. Вместе с тем существуют различные признаки наличия эвтектических точек в системах, например в [15], где указан критерий наличия эвтектики, представляющий неравенство

$$1,10 < \frac{S_2}{S_1} \quad \text{или} \quad \frac{S_2}{S_1} < 0,909. \quad (2)$$

Здесь S_1 , S_2 – энтропии компонентов. Для изотермического процесса [16] справедлива формула $S = \frac{\Delta H}{T}$, здесь ΔH – энтальпия плавления, T – температура плавления вещества. С использованием этого выражения неравенства (2) могут быть представлены в виде

$$1,1 < \frac{T_1 \Delta H_2}{T_2 \Delta H_1} \quad \text{или} \quad \frac{T_1 \Delta H_2}{T_2 \Delta H_1} < 0,909. \quad (3)$$

То есть для систем, не имеющих эвтектических точек, должно выполняться следующее неравенство:

$$0,909 < \frac{T_1 \Delta H_2}{T_2 \Delta H_1} < 1,1. \quad (4)$$

Рассмотрим в качестве примеров системы $K_2WO_4 - K_2CrO_4$ с общим катионом и $LiF - NaF$ с общим анионом.

1. Проверим выполнение формулы (1) для системы $K_2WO_4 - K_2CrO_4$.

Значения удельных теплоемкостей (Дж/гК) взяты из [14]: К – 0,765; Cr – 0,474; W – 0,136; O – 0,918; $\tilde{C}_1 = \frac{0,765 \cdot 2 + 0,136 + 0,918 \cdot 4}{7} = 0,76$;

$\tilde{C}_2 = \frac{0,765 \cdot 2 + 0,474 + 0,918 \cdot 4}{7} = 0,81$; $|\tilde{C}_1 - \tilde{C}_2| = 0,05 < 0,1$ – формула (1) не выполняется.

Проверим выполнение формулы (3) для системы $K_2WO_4 - K_2CrO_4$:

$T_1 = 1196$ (К); $\Delta H_1 = 25,9$ (кДж/моль), $T_2 = 1246$ (К); $\Delta H_2 = 21,1$ (кДж/моль);

$$\frac{T_2 \Delta H_1}{T_1 \Delta H_2} = \frac{25,9 \cdot 1246}{21,1 \cdot 1196} = 1,28 > 1,1.$$

Неравенство (3) выполняется. По критерию (1) в системе будет наблюдаться непрерывный ряд твердых растворов, по признаку (3) система будет эвтектической. По справочным данным [12], система представляет собой непрерывный ряд твердых растворов.

2. Проверим выполнение формулы (1) для системы $LiF - NaF$.

Значения удельных теплоемкостей (Дж/гК) взяты из [14]: Li – 3,25; F – 0,89; Na – 1,22; $\tilde{C}_1 = \frac{3,52 + 0,89}{2} = 2,205$; $\tilde{C}_2 = \frac{1,22 + 0,89}{2} = 2,37$; $|\tilde{C}_1 - \tilde{C}_2| = 0,165 > 0,1$ – формула (1) выполняется.

Проверим выполнение формулы (3) для системы $LiF - NaF$:

$T_1 = 1012$ (К); $\Delta H_1 = 10$ (кДж/моль), $T_2 = 1269$ (К); $\Delta H_2 = 32,6$ (кДж/моль);

$$\frac{T_1 \Delta H_2}{T_2 \Delta H_1} = \frac{32,6 \cdot 1012}{10 \cdot 1269} = 2,6 > 1,1.$$

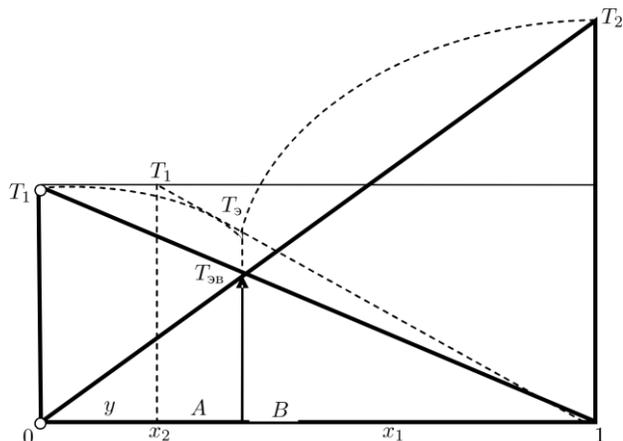
Неравенство (3) выполняется и можно предположить, что система будет эвтектической. Этот вывод подтверждается справочными данными [12]. При проверке 20 систем критерий (3) оказался верным для 14 систем.

Предлагаемая далее процедура приближенной оценки характеристик эвтектических систем эффективна для двухкомпонентных систем с одной эвтектической точкой.

Геометрический подход к вычислению значений температуры эвтектики, несомненно, имеет недостатки, но для приближенной оценки этих значений оказывается практически ценным. На рисунке схематично представлена фазовая диаграмма эвтектической системы с известной концентрацией второго компонента, представленного на чертеже точкой x_2 . В расчетах используется известная приближенная оценка доли тугоплавкого компонента системы [17–19]:

$$x_2 = \frac{T_1}{T_1 + T_2}.$$

Необходимо определить значение температуры эвтектики, представленной на диаграмме точкой T_3 .



Фазовая диаграмма эвтектической системы

Из подобия треугольников ΔOT_1 и $\Delta BT_{э}1$ получаем приближенную формулу для вычисления температуры эвтектики в следующем виде:

$$T_{э} = T_1 \frac{1-x_2}{1}$$

Так как линии ликвидуса представляют собой кривые второго порядка, точка их пересечения будет располагаться выше точки пересечения прямых T_1 и OT_2 . Поэтому вместо формулы (4) необходимо использовать уточненную формулу, получающуюся из подобия треугольников ΔAT_1 и ΔBT_31 , здесь y – отрезок от 0 до A.

$$T_3 = T_1 \frac{1-x_2}{1-y}$$

Для эвтектических систем $x_2 < 0,5$ и $|x_2 - y| \ll 1$, поэтому, используя формулу суммы бесконечно убывающей геометрической прогрессии, имеем следующее выражение для вычисления температуры эвтектики системы:

$$T_3 = T_1 (1-x_2) (1 + y + y^2 + \dots) \quad (5)$$

Из (5) после раскрытия скобок получаем соотношение

$$T_3 = T_1 [(1-x_2)(1+y) + O(x_2, y)] \approx T_1 (1-x_2^2) \quad (6)$$

Для большинства систем с единственной эвтектической точкой $y \leq \frac{x_2}{2}$ и статистически установлено, что формула (6) имеет погрешность не больше 7%. Найденное по формуле (6) значение температуры эвтектики позволяет вычислить уточненное значение доли легкоплавкого компонента по следующей известной формуле [15]:

$$x_1 = \frac{T_2 - T_3}{T_1 + T_2 - 2T_3}. \quad (7)$$

Таким образом, процедура прогнозирования термодинамических характеристик систем с одной эвтектической точки производится в два этапа.

1. Вычисляется приближенное значение температуры эвтектики по формуле

$$T_3 \approx T_1 \left(1 - \frac{T_1^2}{(T_1 + T_2)^2} \right). \quad (8)$$

2. По формуле (7) уточняется значение доли легкоплавкого компонента бинарной системы.

С помощью этой методики авторами были произведены расчеты для 100 систем с общим катионом и 20 систем с общим анионом [18, 19]. Средняя погрешность по температурам составила 7 %, по концентрациям 6 %. Из исследованных 120 систем только для 4 погрешности по температуре превысили 15 %. Максимальная погрешность по температуре 16 %, по концентрациям 15 %. Погрешности не превышают 10 % по температуре для 73 % и по концентрациям – для 80 % систем.

Для сравнения авторами также были проведены расчеты термодинамических характеристик 15 эвтектических систем с помощью уравнений Шредера – Ле Шателье:

$$\begin{cases} \ln x_1 = -\frac{\Delta H_1}{R} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1} \right), \\ \ln x_2 = -\frac{\Delta H_2}{R} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right), \\ x_1 + x_2 = 1, \end{cases}$$

здесь ΔH_1 , ΔH_2 , R – энтальпии первого и второго компонентов и универсальная газовая постоянная соответственно, T_1 , T_2 , T_3 – температуры их плавления и эвтектики, x_1 , x_2 – мольные концентрации первого и второго компонентов.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. При расчетах были использованы значения температур из [12, 13], энтальпий плавления для солевых систем из Internet ресурса Chtmister.ru > Database > properties, для органических кислот – из работ [20–22]. Для расчетов погрешностей использованы экспериментальные значения температур эвтектик и концентраций компонентов из [12, 13]. Для температур вычислялись относительные, для концентраций – абсолютные погрешности, выраженные в процентах, по следующим формулам:

$$\delta T_{эв} = dT_{эв} = \frac{|T_{эв} - T_{эв.расч}|}{T_{эв}} 100\%, \quad \delta x_1 = dx_1 = |x_{1экс} - x_{1расч}| 100\% .$$

Как видно из табл. 2, результаты вычислений с помощью уравнений Шредера – Ле Шателье оказываются более точными для органических кислот и менее точными для солевых систем, поскольку растворы органических кислот ближе по характеристикам к идеальным растворам, чем твердые растворы солей.

Таблица 2

Результаты вычислений

№	Система	ΔH_1 , кДж/ моль	ΔH_1 , кДж/ моль	T_1 , К	T_2 , К	$T_{эв}$, К	x_1	δT	Δx	dT	dx
								Формулы (7), (8)		Уравнения Шредера	
1	AgBr-AgI	12,6	9,4	673	829	340,0	0,7	5 %	2 %	6 %	2 %
2	CsCl-CsF	15,1	21,7	909	976	440,0	0,6	1 %	6 %	5%	4 %
3	LiF-NaF	10,0	32,6	1121,9	1269	652,0	0,6	0 %	5 %	13%	7 %
4	LiF-CaF ₂	10,0	29,7	1121,9	1691	761,0	0,8	3 %	3 %	2%	7 %
5	NaI-NaCl	22,0	28,5	934	1074	572,9	0,6	6 %	2 %	3%	12 %
6	NaI-NaF	22,0	32,6	934	1269	597,0	0,8	5 %	8 %	7%	7 %
7	LiF-LiCrO ₄	10,0	38,0	1122	1131	464,0	0,86	10 %	8 %	3%	4 %
8	KCl-K ₂ CO ₃	25,5	32,6	1044	1164	704,0	0,6	4 %	6 %	9%	14 %
9	KBr-K ₂ CO ₃	25,5	32,6	1001	1164	680,0	0,5	9 %	12 %	6%	13 %
10	NaCl-NaF	28,5	32,6	1074	1269	746,0	0,7	3 %	2 %	1%	4 %
11	(CH ₂) ₃ (COOH) ₂ -(CH ₂) ₈ (COOH) ₂	20,9	40,8	370,5	407,5	88,2	0,8	4 %	6 %	3%	2 %
12	(CH ₂) ₃ (COOH) ₂ -(CH ₂) ₇ (COOH) ₃	20,9	32,7	370,5	379,5	75,3	0,7	7 %	11 %	2%	7 %
13	(CH ₂) ₈ (COOH) ₂ -(CH ₂) ₄ (COOH) ₄	34,9	40,8	407,5	426	119,2	0,6	3%	2 %	1%	0 %
14	(CH ₂) ₃ (COOH) ₂ -(CH ₂) ₄ (COOH) ₅	20,9	34,9	370,5	426	87,2	0,8	8%	4 %	1%	5 %
15	(CH ₂) ₇ (COOH) ₂ -(CH ₂) ₈ (COOH) ₆	32,7	40,8	379,5	407,5	96,0	0,8	1 %	6 %	1%	5 %
	Средние погрешности							4,6 %	5 %	4%	6 %

Выводы

1. Для 70 % двухкомпонентных систем с общим катионом выполнение неравенства $|\tilde{C}_1 - \tilde{C}_2| < 0,1$ гарантирует наличие непрерывных рядов твердых растворов.

2. Предварительный расчет, подтверждающий выполнение предлагаемого авторами критерия $0,1 < |\tilde{C}_1 - \tilde{C}_2|$, для 85 % систем с общим катионом и для 70 % систем с общим анионом предполагает наличие в исследуемой системе хотя бы одной эвтектической точки.

3. Для бинарных, эвтектических, солевых систем и систем из двух органических кислот предложенная процедура расчетов температуры и концентраций компонентов эвтектики проста в применении и для 80 % систем имеет погрешности вычисленных характеристик сравнительно с их экспериментальными значениями не выше 10 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Моргунова О.Е., Трунин А.С.* Электронный генератор фазовых диаграмм физико-технических систем. Самара: СамГТУ, 2006. 132 с.
2. HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software whis extensive Thermochemical Database [Электронный ресурс] / Outotec Reseach Of Information Servise, Finland. Режим доступа: www.outotec.com/hsc.
3. Фазовые равновесия в системе $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Li}_2\text{SO}_4$ / *Z.N. Verdieva, A.B. Alkhasov, N.N. Verdiev, G.A. Rabadanov, P.A. Arbukhanova, E.G. Iskenderov* // Изв. высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2018. 62(1). С. 20–25. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5727>.
4. *Самаров А.А., Тойкка М.А., Тойкка А.М.* Фазовые равновесия в системах спирт-эфир с глубокими эвтектическими растворителями на основе хлорида холина при 293.15 и 313.15 К // Теоретические основы химической технологии. 2021. 55(2). С. 224–234.
5. *Popel P.S., Calvo-Dahlborg M., Dahlborg U.* Metastable microheterogenety of melts in eutectic and monotectic systems and its influence on the properties of the solidified alloy // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2007. Т. 353. № 32–40. Pp. 3243–3253.
6. *Асадова И.Б., Джаббарова Н.Э.* Синтез монокристаллов и термодинамические свойства соединения типа PBLNBIS4 // Вестник науки и образования. 2018. Т. 2. № 3(39). С. 16–21.
7. Последовательность фазовых превращений в системе ND-MN-O / *Л.Б. Ведмидь, А.М. Янкин, О.М. Федорова, В.Ф. Балакирев* // В сб.: Упорядочение в минералах и сплавах, 2013. С. 69–72.
8. Experimental study and thermodynamic analysis of phase equilibria in the silicon-rich part of the SI-SR and SI-BA systems / *B.N. Rygalin, V.K. Prokofeva, L.M. Pavlova, E.B. Sokolov* // *Inorganic Materials*. 2010. 46(2). Pp. 97–103.
9. *Lorenz N., Liu J., Palberg T.* Phase behaviour of binary mixtures of colloidal charged spheres // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2008. V. 319. № 1–3. Pp. 109–115.
10. *Mikhalkina O.G., Monina L.N., Petrova M.D.* Phase equilibria in the BAF 2 – SMSF section of the BAF 2-SMF 3-SM 2S 3-BAS quadrangle // *Tyumen State University Herald*. 2013. № 5. Pp. 74–81.
11. Electronic generator of phase diagrams as an expert system for refining parameters of three-component eutectics / *A.S. Trunin, O.E. Morgunova, E.A. Andreev, S.V. Gorbachev* // *Doklady Physical Chemistry*. 2008. 423(1). Pp. 306–310.
12. Диаграммы плавкости солевых систем: сочник / Под ред. *В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой, Н.А. Васина*. Ч. III. Двойные системы с общим катионом. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
13. Диаграммы плавкости солевых систем: справочник / Под ред. *В.И. Посыпайко*. Ч. II. Двойные системы с общим анионом. М.: Металлургия, 1977. 303 с.

14. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справочник / Под ред. *О.А. Банных, М.Е. Дрица*. М.: Metallurgia, 1986. 224 с.
15. *Крукович М.Г., Бадерко Е.А.* Расчет эвтектических параметров систем и построение многокомпонентных схем диаграмм состояния. www.science-bsea.bgita.ru/2011/mashin_2011.../krukovich_rachet.htm.
16. *Стромберг А.Г., Семченко Д.П.* Физическая химия. М.: Высш. школа, 2006. 527 с.
17. Методика расчета тройных эвтектик по данным об элементах ограничения систем низшей мерности / *О.С. Афанасьева, Г.Ф. Егорова, О.Е. Моргунова, А.С. Трунин* // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физ.-мат. науки, 2007. Вып. 14. С. 182–183.
18. *Афанасьева О.С., Егорова Г.Ф., Моргунова О.Е.* Расчет состава и температур эвтектик двухкомпонентных систем по известным температурам плавления исходных веществ // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физ.-мат. науки. 2009. № 1(18). С. 228–238.
19. *Афанасьева О.С., Егорова Г.Ф.* Расчет состава и температур эвтектик двухкомпонентных систем по известным температурам плавления исходных веществ // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физ.-мат. науки. 2011. № 1(25). С. 134–145.
20. *Аленова С.М., Колядо А.В., Гаркушин И.К.* Исследование фазовых равновесий в двухкомпонентных системах, содержащих адипиновую, глутаровую, азелаиновую, себациновую кислоты // Proceedings: International Conference on thermal analysis and Calorimetry in Russia (RTAC – 2016). Vol. I. St. Petersburg.: SPbPU. 2016. С. 536–539.
21. *Аленова С.М., Колядо А.В., Гаркушин И.К.* Диаграммы системы из двухосновных органических кислот: адипиновой, глутаровой, себациновой // Журн. физ. химии. 2016. Т. 90. № 6. С. 964–968.
22. *Аленова С.М., Колядо А.В., Гаркушин И.К.* Исследование фазовых равновесий в системе из двухосновных органических кислот: адипиновой, глутаровой, себациновой // Изв. Сарат. ун-та. Новая серия. Серия: Химия, Биология, Экология. 2016. Т. 16. № 3. С. 270–273.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2023 г.

FORECASTING STATE DIAGRAMS TWO-COMPONENT SALT SYSTEMS*

O.S. Afanaseva, G.F. Egorova, E.A. Afanaseva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: afanaseva.os@samgtu.ru, galahouse2009@mail.ru, afanaseva.ea@samgtu.ru

Abstract. *The article proposes a method for forecasting and approximate calculating the two-component systems characteristics state diagrams. The results for 200 salt systems with a common cation and 100 with a common anion systems statistical analysis of fase diagrams are presented. In this paper, the authors propose to consider two signs of the eutectic points presence in binary systems and a method for approximate calculation the eutectic point temperature and concentration values. The first criterion for the presence or absence of eutectic points in the system is determined using specific, isobaric heat capacities of the components. The second criterion is based on the well-known fact that entropy values difference for components of eutectic systems are greater than entropy differences for components of systems with continuous series of solid solutions. A method for approximate calculating the temperatures values and the composition of two-component salt systems eutectic points, in which there is no intermediate chemical interaction between the components, is given. A comparative analysis of the calculations results according to the methodology proposed by the authors and the eutectics thermodynamic characteristics values obtained using the Schroeder-Le Chatelier equation is carried out. The adequacy of the proposed model for the analysis and determination of the thermodynamic characteristics of two-component salt systems is confirmed by the calculations results of the eutectics composition and temperatures of 120 two-component systems with average errors, which amounted to 6% in concentrations and 7% in temperatures. Based on the proposed approximation procedure, a calculation program in the Pascal language was created in the Delphi visual environment with a user interface. One of the advantages of this environment is that the executable modules of programs created in it do not require equipping the computer with additional software, except for the presence of an operating system.*

Keywords: *eutectic, two-component salt systems, concentration, melting point, enthalpy, entropy, heat capacity, dystectic, peritectic, absolute error, relative error*

REFERENCES

1. *Morgunova O.E., Trunin A.S.* Elektronnyj generator fazovyh diagramm fiziko-tekhnicheskikh sistem [Electronic generator of phase diagrams of physical and technical systems]. Samara: SamGTU. 2006. 132 p. (In Russian).
2. HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software whis extensive Thermochemical Database [Electronic resource] / Outotec Reseach Of Information Servise, Finland. Access mode: www.outotec.com/hsc.
3. Fazovye ravnovesiya v sisteme $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Li}_2\text{SO}_4$ [Phase equilibria in the system $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Li}_2\text{SO}_4$] / *Z.N. Verdieva, A.B. Alkhasov, N.N. Verdiev, G.A. Rabadanov, P.A. Arbukhanova, E.G. Iskenderov* // *Izv. vysshih uchebnyh za-vedenij. Ser. Himiya*



© The Author(s), 2024

* *Olga S. Afanaseva, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Galina F. Egorova, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Elena A. Afanaseva, Postgraduate Student.*

- i himicheskaya tekhnologiya. 2018. 62(1). Pp. 20–25. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196201.5727> (In Russian).
4. *Samarov A.A., Tojka M.A., Tojka A.M.* Fazovye ravnovesiya v sistemah spirt-efir s glubokimi evtekticheskimi rastvoritelyami na osnove hlorida holina pri 293.15 i 313.15 K [Phase equilibria in alcohol-ether systems with deep eutectic solvents based on choline chloride at 293.15 and 313.15 K] // *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*. 2021. 55(2). Pp. 224–234. (In Russian).
 5. *Popel P.S., Calvo-Dahlborg M., Dahlborg U.* Metastable microheterogeneity of melts in eutectic and monotectic systems and its influence on the properties of the solidified alloy // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2007. T. 353. № 32–40. Pp. 3243–3253.
 6. *Asadova I.B., Dzhabbarova N.E.* Sintez monokristallov i termodinamicheskie svojstva soedineniya tipa PBLNBIS4 [Synthesis of single crystals and thermodynamic properties of the PBLNBIS4 type compound] // *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2018. V. 2. № 3(39). Pp. 16–21. (In Russian).
 7. *Posledovatel'nost' fazovyh prevrashchenij v sisteme ND-MN-O* [Sequence of phase transformations in the ND-MN-O system] / *L.B. Vedmid', A.M. Yankin, O.M. Fedorova, V.F. Balakirev* // *V sb.: Uporyadochenie v mineralah i splavah*, 2013. Pp. 69–72. (In Russian).
 8. Experimental study and thermodynamic analysis of phase equilibria in the silicon-rich part of the SI-SR and SI-BA systems / *B.N. Rygalin, V.K. Prokofeva, L.M. Pavlova, E.B. Sokolov* // *Inorganic Materials*. 2010. 46(2). Pp. 97–103.
 9. *Lorenz N., Liu J., Palberg T.* Phase behaviour of binary mixtures of colloidal charged spheres // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2008. V. 319. № 1–3. Pp. 109–115.
 10. *Mikhalkina O.G., Monina L.N., Petrova M.D.* Phase equilibria in the BAF 2 – SMSF section of the BAF 2-SMF 3-SM 2S 3-BAS quadrangle // *Tyumen State University Herald*. 2013. № 5. Pp. 74–81.
 11. Electronic generator of phase diagrams as an expert system for refining parameters of three-component eutectics / *A.S. Trunin, O.E. Morgunova, E.A. Andreev, S.V. Gorbachev* // *Doklady Physical Chemistry*. 2008. 423(1). Pp. 306–310.
 12. *Diagrammy plavkosti solevykh sistem: Spravochnik* [Fusibility diagrams of salt systems: Reference book] / Pod red. *V.I. Posypajko, E.A. Alekseevoj, N.A. Vasina*. Part III. Dvoynye sistemy s obshchim kationom. M.: Metallurgiya, 1979. 208 p. (In Russian).
 13. *Diagrammy plavkosti solevykh sistem: Spravochnik* [Fusibility diagrams of salt systems: Reference book] / Pod red. *V.I. Posypajko*. Part II. Dvoynye sistemy s obshchim anionom. M.: Metallurgiya, 1977. 303 p. (In Russian).
 14. *Diagrammy sostoyaniya dvoynyh i mnogokomponentnyh sistem na osnove zheleza: Spravochnik* [State diagrams of binary and multicomponent systems based on iron: Reference book] / Pod red. *O.A. Bannyh, M.E. Drica*. M.: Metallurgiya, 1986. 224 p. (In Russian).
 15. *Krukovich M.G., Baderko E.A.* Raschet evtekticheskikh parametrov sistem i postroenie mnogokomponentnykh skhem diagramm sostoyaniya [Calculation of eutectic parameters of systems and construction of multicomponent diagrams of phase diagrams]. www.science-bsea.bgita.ru/2011/mashin_2011.../krukovich_rachet.htm (In Russian).
 16. *Stromberg A.G., Semchenko D.P.* *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. M.: Vyssh. shkola, 2006. 527 p. (In Russian).
 17. Metodika rascheta trojnyh evtektik po dannym ob elementah ograneniya sistem nizshej mernosti [Methodology for calculating ternary eutectics using data on the cutting elements of lower-dimensional systems] / *O.S. Afanaseva, G.F. Egorova, O.E. Morgunova, A.S. Trunin* // *Vestn. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Fiz.-mat. nauki*. 2007. Issue 14. Pp. 182–183. (In Russian).
 18. *Afanaseva O.S., Egorova G.F., Morgunova O.E.* Raschet sostava i temperatur evtektik dvuhkomponentnyh sistem po izvestnym temperaturam plavleniya iskhodnyh veshchestv [Calculation of the composition and temperatures of eutectics of two-component systems based on the known melting temperatures of the starting substances] // *Vestn. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Fiz.-mat. nauki*. 2009. №1(18). Pp. 228–238. (In Russian).
 19. *Afanaseva O.S., Egorova G.F.* Raschet sostava i temperatur evtektik dvuhkomponentnyh sistem po izvestnym temperaturam plavleniya iskhodnyh veshchestv [Calculation of the composition and temperatures of eutectics of two-component systems based on the known melting temperatures of the starting substances] // *Vestn. Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Fiz.-mat. nauki*, 2011, №1(25). Pp. 134–145. (In Russian).

20. *Alenova S.M., Kolyado A.V., Garkushin I.K.* Issledovanie fazovyh ravnovesij v dvuh-komponentnyh sistemah, sodержashchih adipinovuyu, glutarovuyu, azelainovuyu, sebacinovuyu kisloty [Study of phase equilibria in two-component systems containing adipic, glutaric, azelaic, and sebacic acids] // Proceedings: International Conference on thermal analysis and Calorimetry in Russia (RTAC – 2016). Vol. I. St. Petersburg.: SPbPU. 2016. Pp. 536–539.
21. *Alenova S.M., Kolyado A.V., Garkushin I.K.* Diagrammy sistemy iz dvuhosnovnyh organicheskikh kislot: adipinovej, glutarovej, sebacinovej [Diagrams of a system of dibasic organic acids: adipic, glutaric, sebacic] // Zhurn. fiz. himii. 2016. V. 90. № 6. Pp. 964–968. (In Russian).
22. *Alenova S.M., Kolyado A.V., Garkushin I.K.* Issledovanie fazovyh ravnovesij v sisteme, iz dvuhosnovnyh organicheskikh kislot: adipinovej, glutarovej, sebacinovej [Study of phase equilibria in a system of dibasic organic acids: adipic, glutaric, sebacic] // Izv. Sarat. un-ta. Novaya seriya. Ser. Himiya, Biologiya, Ekologiya. 2016. V. 16. № 3. Pp. 270–273.

Original article submitted 20.12.2023

УДК 004.272.4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ПРОЦЕССОРОВ С АРХИТЕКТУРАМИ VLIW И X86-64 С ПОМОЩЬЮ ТЕСТИРОВАНИЯ*

М.С. Гнутов¹, С.К. Гнутов², В.Н. Титаренко¹

¹Краснодарское высшее военное орденов Жукова
и Октябрьской Революции Краснознаменное училище
им. генерала армии С.М. Штеменко,
Россия, 350063, г. Краснодар, ул. Красина, 4

² Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» филиал в г. Сызрани
Россия, 446006, Самарская область, г. Сызрань-7, ул. Маршала Жукова, 1

E-mail: monk666@bk.ru, votung@bk.ru, peresl77@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены типовые архитектурные концепции популярных семейств процессоров, их особенности, преимущества и недостатки. Приведены примеры структур известных процессоров. Обозначены технические ограничения для дальнейшего развития популярных архитектур RISC (CISC) в соответствии с парадигмой машины фон Неймана. Обращается внимание на увеличения размера аппаратного планировщика и возникающий дефицит места на кристалле при росте количества функциональных модулей на ядрах с «последовательной» структурой. Описаны преимущества концепции VLIW и компилятора, работающего с данной архитектурой. Для оценки эффективности функционирования автоматизированных систем с различными архитектурами проведен ряд синтетических тестов, использованы тестовые программы. Проведены измерения производительности для сравнения электронно-вычислительных машин, основанных на ядрах VLIW и x86-64. Предложен ряд алгоритмов для ускорения вычислительных задач автоматизированной системы с параллельной структурой. Подчеркивается необходимость применения концепции параллельного программирования при доработке существующего и разработке нового программного обеспечения для современных автоматизированных систем. Приведен пример преобразования программного кода в параллельную структуру для описания алгоритма последовательной задачи, иллюстрирующего сложные информационные связи.



© Автор(ы), 2024

*Максим Сергеевич Гнутов, кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Защита информации».

Сергей Константинович Гнутов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Общетехнические дисциплины».

Виктор Николаевич Титаренко, кандидат технических наук, слушатель магистратуры.

Ключевые слова: автоматизированная система, параллельное программирование, архитектура центрального процессора, Astra Linux

Введение

Центральный процессор – наиважнейшая часть компьютера, осуществляющая выполнение последовательности команд, реализованных с помощью логических операций. Переход от первых процессоров, имевших несложную однопроцессорную архитектуру и работавших на частотах 2,5–4 МГц, к современным процессорам, включающим в себя до нескольких миллиардов транзисторов и работающим на частотах 2–5 ГГц (например, Intel Core i9, AMD Ryzen 9), происходит на фоне и вследствие лавинообразного развития информационных технологий [1]. Растущие потребности пользователей и приложений, требования защиты информации и огромные потоки цифровых данных приводят к необходимости повышения производительности автоматизированных систем не только за счет увеличения их мощности. Концепция параллельных вычислений, реализованная, в том числе, за счет использования «параллельных» процессорных архитектур (например, Intel Itanium), позволит повысить эффективность применения многопроцессорных и многопоточных систем.

Для обеспечения безопасности информации, а также в целях развития национальной экономики, поддержки российских организаций, осуществляющих свою деятельность в сфере информационных технологий и защиты внутреннего рынка Российской Федерации, правительством Российской Федерации были введены ограничения на допуск иностранного программного обеспечения, используемого для государственных и муниципальных нужд. Это простимулировало отечественных производителей электроники и программного обеспечения, а также создало более благоприятные условия для распространения и продвижения национальной продукции внутри страны [2].

Многообещающим направлением, реализующим принципы параллельных вычислений в нашей стране, является семейство микропроцессоров «Эльбрус», основанных на архитектуре VLIW, которые разрабатываются российской компанией АО «Московский центр SPARC-технологий» (базовая организация кафедры ИВТ МФТИ) при участии Института электронных управляющих машин.

Типовые архитектурные концепции популярных семейств процессоров

Слово «архитектура» можно перевести с греческого языка как «искусство строить». Фактически это расположение частей и элементов в общей структуре. Архитектура процессора с точки зрения:

программиста – это совместимость с определенным кластером команд (работающих, например, на Intel x86-64), их систем адресации, организации регистровой памяти (и др.) и способа конечной реализации программы;

непосредственно аппаратной конфигурации – некие определенные свойства, качества и внутренняя конструкция рассматриваемого семейства процессоров.

В настоящее время существует множество видов процессоров и базовых архитектур. Рассмотрим основные виды.

CISC (англ. Complex Instruction Set Computer – «компьютер с полным набором команд») – тип архитектуры, в первую очередь, с нефиксированной длиной команд, а также с кодированием арифметических действий в одной команде

и небольшим числом регистров, многие из которых выполняют строго определенную функцию. Примеры архитектуры: x86 (IA-32) и x86_64 (AMD64).

RISC (англ. Reduced Instruction Set Computer – «компьютер с сокращённым набором команд») – архитектура процессора, в котором быстродействие увеличивается за счёт упрощения инструкций: их декодирование становится более простым, а время выполнения – меньшим. Примеры архитектуры: PowerPC, серия ARM.

VLIW (англ. Very Long Instruction Word – «очень длинная машинная команда») – архитектура с несколькими вычислительными устройствами. Характеризуется тем, что одна инструкция процессора содержит несколько операций, которые должны выполняться параллельно. Примеры архитектуры: Intel Itanium, Эльбрус.

MISC (англ. Minimal Instruction Set Computer – «компьютер с минимальным набором команд») – простая архитектура, используемая в первую очередь для ещё большего снижения энергопотребления процессора и итоговой цены. Используется в IoT-сегменте, роутерах.

OISC (One Instruction Set Computer – «архитектура с единственной инструкцией») – такие архитектуры часто имеют вид: Сделать действие и в зависимости от результата сделать прыжок или продолжить исполнение. Зачастую ее реализация достаточно простая, производительность маленькая, имеется ограничение шириной данных. Примеры архитектуры: BitBitJump, ByteByteJump, SUBLEQ.

TTA (Transport triggered architecture) – вариант архитектуры микропроцессоров, в которой программы непосредственно управляют внутренними соединениями (шинами) между блоками процессора (например, АЛУ, Регистровый файл). TTA является разновидностью OISC. Примеры архитектуры: MOVE Project [13].

Некоторые из указанных выше архитектур сильно разнятся, некоторые схожи, некоторые со временем объединяются. Еще в 80-х годах популярная CISC архитектура начала приобретать некоторые RISC черты. Сейчас в современных процессорах x86-64 и x86 внутри стоит RISC ядро и используется микрокод.

На протяжении многих лет распространенная архитектура x86, x86-64 выигрывала не только за счет совокупности показателей цена – удобство – популярность. Дело в совместимости – x86_64 всё ещё лидер, только как наследник x86. Так как старые программы работают только на x86, то и новые системы должны быть совместимыми для работы привычного программного обеспечения. Развитие архитектуры RISC в современных реалиях оказалось ограниченным из-за парадигмы машины фон Неймана [3], в которой программы реализованы с допущением, что инструкции должны выполняться последовательно, в том же порядке, в каком они указаны в коде. Это не полное отсутствие параллелизма. В суперскалярных процессорах, позволяющих выполнять сразу несколько команд за такт (путем использования нескольких конвейеров) для распознавания зависимостей между машинными инструкциями применяется сложный аппаратный планировщик. Однако при росте количества функциональных модулей в геометрической прогрессии растет и размер этого предсказателя переходов, занимая всё свободное место на кристалле процессора. Это ограничивает развитие ядер на супербыстрых RISC-архитектурах.

При подходе VLIW можно назначить все планирование программному компилятору, который должен выискать в программе независимые инструкции, собрать их вместе в очень длинные слова-инструкции, после чего отправить на одновременное

исполнение функциональными модулями, количество которых (в идеале) равно количеству операций в этой инструкции. Аппаратно VLIW-процессор состоит из нескольких простых функциональных модулей, подключенных к шине процессора, нескольких регистров и блоков кэш-памяти. Максимальная скорость обработки определяется только количеством и внутренними составом самих функциональных модулей.

Сравнение производительности процессоров Эльбрус 8С и Intel Core-i7 на основе синтетических тестов

В рамках данной научно-исследовательской работы был проведен ряд сравнительных исследований автоматизированных систем с различными процессорными архитектурами. Для оценки производительности архитектур VLIW и x86-64 были использованы ЭВМ со следующими характеристиками:

Intel – на базе процессора Intel Core-i7 4570U 1,7 Ghz, процессорная архитектура X86-64, количество ядер/потоков 2/4, видеоадаптер Intel HD Graphics 4600 на операционной системе Astra Linux Special Edition «Смоленск» 1.6;

Эльбрус – на базе процессора Эльбрус 8С 1,3 Ghz, процессорная архитектура VLIW, количество ядер/потоков 8/8, видеоадаптер Radeon HD 7450 1GB на операционной системе Astra Linux Special Edition «Ленинград» 8.1.

Характеристики твердотельных накопителей и оперативной памяти не представлены из-за их малого влияния на результат тестирования ЭВМ.

Для тестирования производительности рабочих станций стенда на базе процессора Эльбрус-8С и его сравнения с ЭВМ на базе процессора Intel решено использовать следующие синтетические тесты: CoreMark, BusSpeed, Dhrystone, Linpack, Memspeed, MPMFLOPS, Whetstone.

Для тестирования производительности стенда было принято решение использовать следующие прикладные программы: PostgreSQL, OpenSSL, Apache 2, PHP 7.0, 7-zip, LibreOffice.

Использование данного программного обеспечения позволяет оценить, каким образом будет вести себя ЭВМ при повседневной работе пользователя или при использовании данного ЭВМ в качестве сервера приложений [4].

Результаты сравнительного тестирования программой mpmfloors.

Результаты тестирования процессора Эльбрус бенчмарком mpmfloors было решено разбить по размеру используемых массивов (1 элемент массива равен 4 байтам). Обобщённые результаты тестирования представлены в табл. 1–3.

В данном тесте процессор Эльбрус 8С демонстрирует преимущество своей архитектуры. При тестировании с использованием массива меньшей длины процессор Эльбрус 8С обгоняет процессор Intel в три раза (при использовании режима тестирования с 2 и 8 операндами). При увеличении размера массива процессор Intel догоняет процессор Эльбрус 8С. При тестировании ЭВМ Эльбрус в режиме 32 операций на малых объёмах данных его преимущество по сравнению с Intel вырастает до пяти раз. Из этого следует, что для увеличения производительности работы программы на процессоре Эльбрус 8С требуется группировать операции и тщательно подбирать размер обрабатываемых данных одного прохода.

Таблица 1

Максимальные показатели на процессоре Эльбрус

Размер массива (количество элементов)	Количество операций	Количество проходов	Время выполнения (сек)	Итоговый результат (Мфлопс)
102400	2	x10000	0,07513	54519
1024000	2	x1000	0,061275	66846
10240000	2	x100	1,809834	2263
102400	8	x10000	0,168349	97322
1024000	8	x1000	0,150419	108923
10240000	8	x100	1,796708	9119
102400	32	x10000	0,439658	149061
1024000	32	x1000	0,401153	163369
10240000	32	x100	1,831856	35776

Таблица 2

Максимальные показатели на процессоре Intel

Размер массива (количество элементов)	Количество операций	Количество проходов	Время выполнения (сек)	Итоговый результат (Мфлопс)
102400	2	x10000	0,102671	19947
1024000	2	x1000	0,165377	12384
10240000	2	x100	0,894984	2288
102400	8	x10000	0,221797	36935
1024000	8	x1000	0,231863	35331
10240000	8	x100	0,898049	9122
102400	32	x10000	0,931825	35165
1024000	32	x1000	0,938907	34900
10240000	32	x100	0,998724	32810

Таблица 3

Показатели ЭВМ «Эльбрус» по отношению к «Intel»

Размер массива (количество элементов)	Количество операций	Количество проходов	Время выполнения (сек)	Итоговый результат (Мфлопс)
102400	2	x10000	136,66 %	36,59 %
1024000	2	x1000	269,89 %	18,53 %
10240000	2	x100	49,45 %	101,10 %
102400	8	x10000	131,75 %	37,95 %
1024000	8	x1000	154,14 %	32,44 %
10240000	8	x100	49,98 %	100,03 %
102400	32	x10000	211,94 %	23,59 %
1024000	32	x1000	234,05 %	21,36 %
10240000	32	x100	54,52 %	91,71 %

Результаты сравнительного тестирования с помощью архиватора «7zip» (рис. 1).

В данном тесте процессор Эльбрус 8С оказывается быстрее процессора Intel. Это можно объяснить большим количеством ядер и возможностью оптимизации под особенности архитектуры VLIW. В задаче архивации процессор Эльбрус оказался быстрее на 10 %, в задаче разархивирования – на 30 %. Из этого можно сделать вывод, что работа с алгоритмами сжатия рабочая станция Эльбрус работает достаточно эффективно, несмотря на малую частоту.

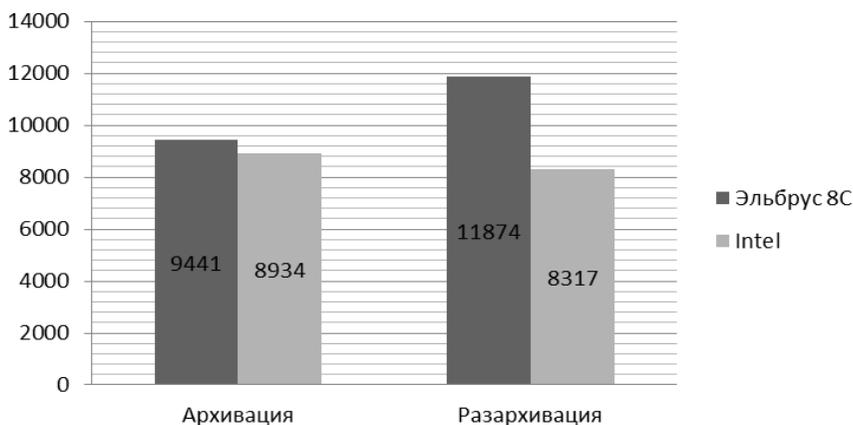


Рис. 1. Результаты тестирования «7zip» (в MIPS)

К сожалению, остальные тестовые программы и синтетические тесты показали в целом отставание российской системы от ее зарубежного аналога. Тестирование прикладных программных продуктов показало, что основной недостаток новой архитектуры VLIW – отсутствие оптимизации уже имеющегося программного кода. Этим объясняется низкая эффективность работы серверов баз данных, интерпретаторов языка, алгоритмов шифрования.

Это происходит в том числе из-за самой концепции написания программ. Современные системы требуют современных решений – при написании программ необходимо использовать подход так называемого «параллельного программирования». Это требует от программиста определенных усилий и понимания работы компилятора. Однако программное обеспечение, оставшееся как наследство от одноядерных CISC- и RISC-систем, не дает воспользоваться всей мощностью архитектуры VLIW. Совместное использование возможностей компилятора, а также методов представления и преобразования алгоритмов при написании программистом кода, даст значительное ускорение работы автоматизированных систем за счет увеличения доли параллельных вычислений и достаточно компактной формы алгоритма.

Варианты ускорения вычислительной задачи в автоматизированной системе с параллельной структурой

Написание программы для параллельной структуры может быть достаточно непростым из-за особенностей человеческого мышления. Сложно держать в голове явное (неявное) распараллеливание программного кода и рассчитывать количество свободных функциональных модулей, способных обработать за такт

максимальное количество данных. Рассмотрим теоретические аспекты преобразования алгоритмов на примере запуска приоритетных процессов автоматизированной системы.

Любой набор процессов использует конечное количество системных ресурсов. Для каждого элемента множества системных ресурсов имеется ряд факторов, определяющих очередность исполнения того или иного процесса. Зададим алгоритм запуска приоритетных процессов на 11 позиций с помощью графа (рис. 2).

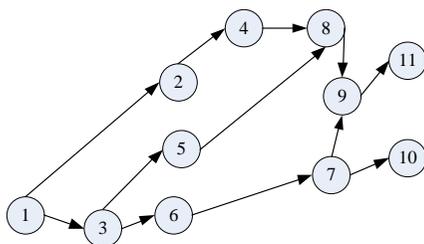


Рис. 2. Произвольный граф алгоритма

Данный граф алгоритма можно преобразовать в ярусно-параллельную форму (рис. 3).

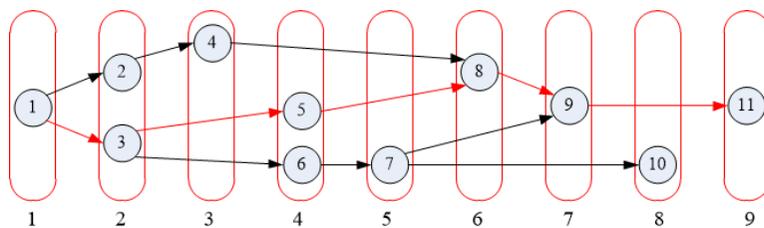


Рис. 3. Граф алгоритма в ярусно-параллельной форме представления

Закон Амдала иллюстрирует, что возможная выгода от использования параллельных вычислений во многом predeterminedена свойствами применяемых в программах методов и алгоритмов.

Естественно, что максимальное ускорение, которое можно получить при исполнении задач на параллельной вычислительной системе, по закону Амдала рассчитывается как

$$S = \frac{1}{p + \frac{1-p}{c}},$$

где S – коэффициент максимального увеличения скорости работы системы, p – доля параллельных операций в рассматриваемой системе, c – количество ядер.

При большом количестве ядер графического процессора коэффициент максимального увеличения скорости работы системы можно обозначить как

$$S \approx \frac{1}{p}$$

То есть при доле параллельных операций $p = 50\% = 0.5$, вычисляемых на системе с большим количеством процессоров (или одновременно обрабатываемых параллельных потоков), максимальное ускорение будет всего лишь в два раза выше относительно последовательного варианта расчета. При $p = 9$ – в 10 раз.

В программном исполнении можно добиться максимального ускорения процесса:

первое – увеличивая ширину на ярусно-параллельной форме (далее – ЯПФ) представления алгоритма и уменьшая ее высоту после расчета высоты канонической ЯПФ (поиск кратчайшего пути – путь 1–3–5–8–9–11 на рис. 3 и преобразование ЯПФ на рис. 4). Шириной ЯПФ является количество исполнителей (вычислительных ядер или функциональных модулей), которые могут быть задействованы. Высота ЯПФ – скорость выполнения алгоритма, т. е. количество ярусов можно представить количеством тактов. Построенная ЯПФ дает максимальную скорость и максимальную «жадность» (максимальное количество исполнителей) без изменения программной структуры самого алгоритма.

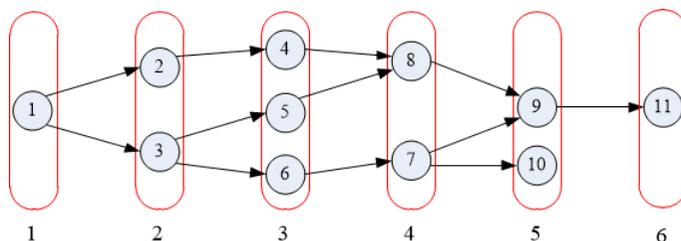
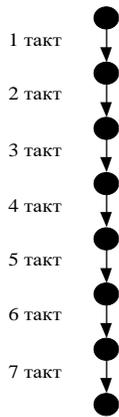


Рис. 4. Преобразованный граф алгоритма в ярусно-параллельной форме представления и второе – распараллеливанием задач – т. е. преобразовывая отношения между элементами массива. На рис. 5 слева схематично изображена задача сложения элементов, выполненное последовательно за семь тактов, затем то же самое действие, выполненное параллельно попарным сложением с помощью четырех функциональных модулей и за четыре такта

Если на этапе преобразования ЯПФ назначение на процессорные вычислители может совершаться средствами операционной системы и (или) существующим специальным программным обеспечением с определенными наборами библиотек, то на данном этапе необходима работа программиста для преобразования программного кода выполняемого алгоритма [12].

Последовательное сложение



Попарное сложение

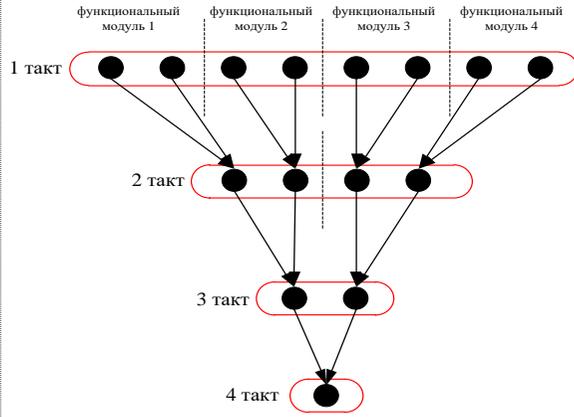


Рис. 5. Эквивалентное преобразование – шифрование в режиме простой замены

Пример преобразования программного кода

Итак, для чего же нужны эти преобразования? Используем алгоритмический язык программирования для описания алгоритма последовательной задачи, иллюстрирующего сложные информационные связи [5]:

- (1) read (x,y,z,n);
- (2) x:=x*2;
- (3) y:=y+3;
- (4) z:=-z/4;
- (5) n:=n-z;
- (6) z:=z*z;
- (7) y:=y*y*4;
- (8) x:=x+5;
- (9) x:=y+x;
- (10) write (x,y,z,n).

Оптимизируем данный алгоритм для, условно, трехпоточной системы. Таким образом, в данном случае за один такт система может одновременно обрабатывать m выражений, $0 \leq m \leq 3$, соответственно, при $m \rightarrow \max$, найдем максимально возможное ускорение по закону Амдала.

С помощью эквивалентного преобразования из последовательного кода получаем следующую схему в параллельном исполнении (рис. 6).

Количество тактов выполнения алгоритма снизилось с 10 до 5. Данное значение является минимумом, выполнить алгоритм за меньшее количество шагов не представляется возможным. Тем не менее здесь задействовано 4 вычислителя. Можно применить ЯПФ для оптимизации алгоритма (рис. 7).

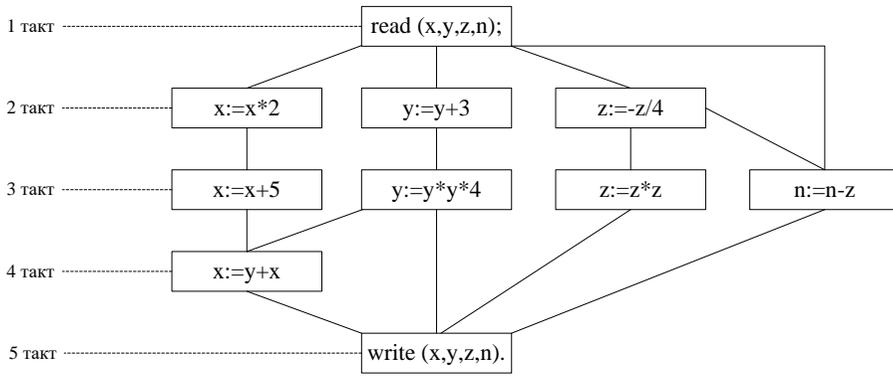


Рис. 6. Эквивалентное преобразование последовательного алгоритма

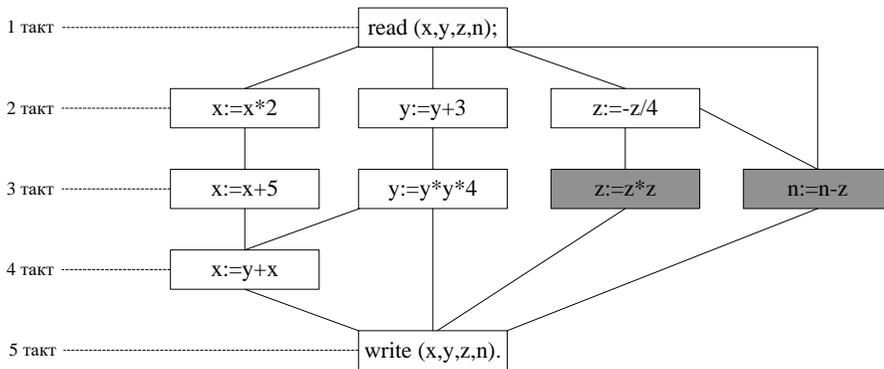


Рис. 7. Выбор блоков для преобразования в ярусно-параллельной форме

Блоки « $z:=z*z$ » и « $z:=n-z$ » можно выполнить как на третьем, так и на четвертом такте, это конечные значения переменных, они не влияют на вычисление переменных x или y . Перенос одного из этих действий на четвертый такт позволит сохранить скорость выполнения и уменьшить количество задействованных потоков до трех (рис. 8).

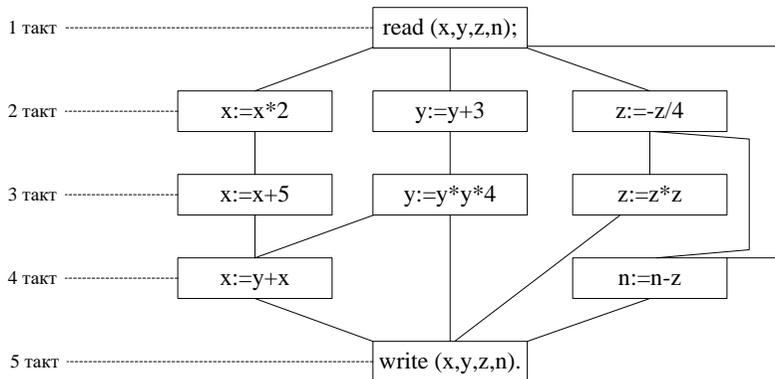


Рис. 8. Оптимальная форма алгоритма

Оптимизационная задача выполнена. Блоки « $y:=y+3$ », « $z:=-z/4$ », « $y:=y*y*4$ », « $z:=z*z$ », « $n:=n-z$ », выполняемые в начале задачи в одном последовательном потоке, были перераспределены и стали блоками, вычисляемыми на соседних потоках, так что значение доли параллельных вычислений p (учитывая операции ввода и вывода) стало равным 0,5. По количеству тактов алгоритм стал вдвое короче, но по закону Амдала максимальное ускорение системы, использующей программу, исполненную с помощью данного алгоритма, составит

$$S = \frac{1}{p + \frac{1-p}{c}} = \frac{1}{0,5 + \frac{1-0,5}{3}} = 1,5.$$

То есть благодаря эквивалентному преобразованию и оптимизации ЯПФ в данной задаче программа на системе с тремя потоками ускорится в полтора раза.

Выводы

Сложным многопроцессорным системам, входящим в состав современных комплексов средств автоматизации, сегодня приходится одновременно обрабатывать множество различных задач. Многопроцессорность и многопоточность на аппаратном уровне, совмещенная с параллелизмом, реализованном на программном уровне с применением алгоритмов преобразования, позволит отечественным процессорам, основанным на архитектуре VLIW, со временем занять одно из лидирующих мест на рынке информационных технологий [6–8].

На данный момент тактовая частота процессора Эльбрус ниже, чем у процессоров Intel, но за счёт организации параллелизма и хорошей оптимизации кода разница в частоте не будет решающим фактором. По пиковой производительности отечественный процессор уже сейчас обгоняет серверный Intel Xeon E5-2609, а по количеству выполняемых команд за один такт превосходит практически любого конкурента.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что в целом автоматизированная система, основанная на процессоре Эльбрус и операционной системы Astra Linux «Ленинград» 8.1 уже сейчас способна в ряде задач заменить аналогичную на основе ЭВМ с процессором Intel и ОС Windows. ЭВМ с процессором Эльбрус обеспечивает большую надёжность от хакерских атак по сравнению с ЭВМ на основе Intel в связи с использованием собственной защищённой архитектуры и отсутствием известных аппаратных уязвимостей [9,10]. Операционная система Astra Linux Special Edition «Ленинград» также способна обеспечить защищённость данных на программном уровне с использованием как встроенных систем защиты информации [11], так и средств защиты информации, поставляемых сторонними разработчиками. Дополнительная система защиты parsec данной ОС гарантирует защиту от несанкционированного доступа и возможности повышения прав пользователя, а мандатные метки и метки конфиденциальности обеспечивают защищённость от распространённых атак на аналогичные системы семейства Linux.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концепция RISC архитектур [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://life-prog.ru/2_16623_concept_risk_architectyri.html

2. Постановление правительства РФ от 16.11. 2015 N 1236 «Об установлении запрета на допуск программного обеспечения, происходящего из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд» // Собрание законодательства РФ. 2015. № 47.
3. *Sohi G.S., Breach S.E., Vijaykumar T.N.* Multiscalar processors // In 25 Years ISCA: Retrospectives and Reprints. 1998. Pp. 521–532.
4. *Мишин А.А.* Исследование и сравнительная оценка эффективности архитектуры «Эльбрус» // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2019. № 1. С. 91–95.
5. *Плаксин М.А.* «Суперкомпьютеры» vs «параллельное программирование» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. № 11. С. 302–309.
6. ФСТЭК подписал указ об использовании отечественного ПО на объектах критической информационной инфраструктуры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/news/512136.php>.
7. Большое тестирование процессоров различных архитектур [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://habr.com/ru/company/icl_services/blog/501588/
8. *Приходько Д.И.* Экспертный анализ недостатков и методы их преодоления для архитектуры VLIW // Научные достижения и открытия современной молодёжи. 2018. С. 14–15.
9. *Мельников М.О., Игонина Е.В.* Аппаратные уязвимости микропроцессоров архитектуры X86/X86_64 IAARM // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. 2019. С. 128 –133.
10. *Ким А.К., Перекатов В.И., Ермаков С.Г.* Микропроцессоры и Вычислительные комплексы семейства «Эльбрус»: учебное пособие. СПб: Питер, 2013. 272 с.
11. *Яковлева Е.С.* Модели управления доступом в операционной системе Astra Linux: Сила привилегий // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность». 2020. С. 204–216.
12. *Гнутов М.С., Титаренко В.Н., Сизоненко А.Б.* Оценка эффективности функционирования автоматизированных систем с различными процессорными архитектурами // Информатика: Проблемы, Методы, Технологии (ISMP). Материалы XXI Международной научно-технической конференции. Воронеж: ВЭЛБОРН, 2021. С. 1582–1591.
13. Виды популярных архитектур процессоров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tproger.ru/articles/processors-architectures-review>.

Статья поступила в редакцию 03 марта 2024 г.

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF AUTOMATED SYSTEM BASED ON PROCESSORS WITH VLIW AND X86-64 ARCHITECTURES THROUGH TESTING*

M.S. Gnutov¹, S.K. Gnutov², V.N. Titarenko¹

¹Krasnodar Higher Military Order of Zhukov
and the October Revolution Red Banner School
named after Army General S.M. Shtemenko
4, Krasina st., Krasnodar, 350063, Russian Federation

²Military Educational and Scientific Center of the Air Force
"Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin"
1, Marshala Zhukova st., Syzran-7, 446006, Russian Federation

E-mail: monk666@bk.ru, votung@bk.ru, peresl77@mail.ru

Abstract. *The typical architectural concepts of popular processor families, their features, advantages and disadvantages are considered. Examples of structures of known processors are given. Technical limitations for the further development of popular RISC (CISC) architectures in accordance with the von Neumann machine paradigm are outlined. Attention is drawn to the increase in the size of the hardware scheduler and the resulting shortage of space on the chip with an increase in the number of functional modules on cores with a "sequential" structure. The advantages of the VLIW concept and the compiler working with this architecture are described. To assess the effectiveness of the functioning of automated systems with various architectures, a number of synthetic tests were carried out and test programs were used. Performance measurements were carried out to compare electronic computers based on VLIW and x86-64 cores. A number of algorithms have been proposed to accelerate computational tasks of an automated system with a parallel structure. The need to apply the concept of parallel programming when refining existing and developing new software for modern automated systems is emphasized. An example of converting program code into a parallel structure is given to describe an algorithm for a sequential task, illustrating complex information connections.*

Keywords: *Automated system, parallel programming, central processor architecture, Astra Linux*

REFERENCES

1. Concept of RISC architectures [Electronic resource]. Access mode: https://life-prog.ru/2_16623_concept_risk_architectyri.html
2. Postanovlenie pravitelstva RF ot 16.11. 2015 N 1236 «Ob ustanovlenii zapreta na dopusk programmnoho obespecheniya, proiskhodyashchego iz inostrannyh gosudarstv, dlya celej osushchestvleniya zakupok dlya obespecheniya gosudarstvennyh i municipal'nyh nuzhd» [On establishing a ban on the admission of software originating from foreign countries for the purposes of procurement to meet state and municipal needs] // Sobranie zakonodatel'stva RF. 2015. №. 47. (In Russian).
3. *Sohi G.S., Breach S.E., Vijaykumar T.N.* Multiscalar processors // In 25 Years ISCA: Retrospectives and Reprints. 1998. Pp. 521–532.
4. *Mishin A.A.* Issledovanie i sravnitel'naya ocenka effektivnosti arhitektury «Elbrus» [Research and comparative assessment of the effectiveness of the Elbrus architecture] // Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tekhnologii. 2019. №. 1. Pp. 91–95. (In Russian).



© The Author(s), 2024

**Maksim S. Gnutov, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.*
Sergey K. Gnutov, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Viktor N. Titarenko, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

5. *Plaksin M.A.* «Superkompyutery» vs «parallelnoe programmirovaniye» [“Supercomputers” vs “parallel programming”] // *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye*. 2015. № 11. Pp. 302–309. (In Russian).
6. FSTEC signed a decree on the use of domestic software at critical information infrastructure facilities [Electronic resource]. Access mode: <https://www.securitylab.ru/news/512136.php>.
7. Large testing of processors of various architectures [Electronic resource]. Access mode: https://habr.com/ru/company/icl_services/blog/501588/
8. *Prikhodko D.I.* Ekspertnyj analiz nedostatkov i metody ih preodoleniya dlya arhitektury VLIW [Expert analysis of shortcomings and methods for overcoming them for VLIW architecture] // *Nauchnyye dostizheniya i otkrytiya sovremennoj molodyozhi*. 2018. Pp. 14–15. (In Russian).
9. *Melnikov M.O., Igonina E.V.* Apparatnyye uyazvimosti mikroprocessorov arhitektury X86/X86_64 IARM [Hardware vulnerabilities of microprocessors of the X86/X86_64 IARM architecture] // *Fundamentalno-prikladnyye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadezhnosti, ustojchivosti i effektivnosti sistem*. 2019. Pp. 128–133. (In Russian).
10. *Kim A.K., Perekatov V.I., Ermakov S.G.* Mikroprocessory i vychislitelnye komplekсы semeystva «Elbrus» [Microprocessors and Computing Complexes of the Elbrus Family]. SPb: Piter, 2013. 272 p. (In Russian).
11. *Yakovleva E.S.* Modeli upravleniya dostupom v operacionnoj sisteme Astra Linux: Sila privilegij [Access control models in the Astra Linux operating system: The power of privileges] // *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sovremennoj nauki po napravleniyu «Informatsionnaya bezopasnost»*. 2020. Pp. 204–216. (In Russian).
12. *Gnutov M.S., Titarenko V.N., Sizonenko A.B.* Ocenka effektivnosti funkcionirovaniya avtomatizirovannyh sistem s razlichnyimi processornymi arhitekturami [Assessing the efficiency of functioning of automated systems with different processor architectures] // *Informatika: Problemy, Metody, Tekhnologii (ISMP). Materialy XXI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Voronezh: VELBORN, 2021. Pp. 1582–1591. (In Russian).
13. Types of popular processor architectures [Electronic resource]. Access mode: <https://tproger.ru/articles/processors-architectures-review>.

Original article submitted 03.03.2024

УДК 665.6/.7:502.171

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ*

М.Ю. Деревянов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: mder2007@mail.ru

Аннотация. *Предлагается новый подход к системному анализу сложноструктурированного комплекса переработки (КП) нефтесодержащих отходов (НСО) на основе метода Data Envelopment Analysis, который позволяет решать задачи выбора оптимальных технологий переработки по разнородным критериям ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения и комплексной эффективности. Представлены новые классификации: НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности и методам переработки. Проведен анализ системных проблем, сопровождающих технологические процессы переработки НСО, которые подтверждают необходимость рассматривать хранилища НСО и технологии их переработки в рамках единой системы, состоящей из двух подсистем размещения и переработки. Проанализированы общесистемные свойства КП НСО и взаимосвязи его основных элементов, выявлено наличие устойчивых связей между элементами системы.*

Разработана методика системного анализа и оптимизации КП НСО, состоящая из 10 последовательных этапов и включающая разработку баз данных и специального программного обеспечения, проведение многофакторного анализа и оптимизации, использование искусственных нейронных сетей для увеличения скорости вычислений, разработку системы информационной поддержки принятия научно-обоснованных управленческих решений.

Показаны результаты апробации методики для анализа КП, состоящего из 90 хранилищ НСО и 14 технологий переработки, расположенных в пределах одного региона. Получены результаты решения задач оптимизации системы переработки НСО по критерию максимальной комплексной эффективности с учётом постоянного и переменного эффектов масштаба.

Предлагаемый подход может быть распространён на другие регионы Российской Федерации с развитой нефтегазовой промышленностью, где существует необходимость принятия срочных мер по ликвидации хранилищ отходов и улучшению экологической обстановки.

Ключевые слова: *системный анализ, комплекс переработки, нефтесодержащие отходы, технологии, классификация, методика, Data Envelopment Analysis, нефтегазовая промышленность*



© Автор(ы), 2024

*Максим Юрьевич Деревянов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Введение

Нефтедержащие отходы (НСО) – это различающиеся по составу и физико-химическим свойствам отходы, содержащие углеводородные смеси, образующиеся в различных отраслях промышленности в процессе транспортировки, использования и хранения нефтепродуктов, испытаний и ремонтов оборудования, строительства, утилизации промышленных отходов и агрегатов [1]. По данным Росстата, в 2022 году в секторе добычи нефти и газа и предоставлении услуг в этой сфере образовалось 13,94 млн тонн НСО [2]. В связи с ужесточением законодательства в области охраны окружающей среды производитель и потребитель несут прямую ответственность за переработку (обезвреживание и утилизацию) образовавшихся отходов [3]. Поскольку нормы переработки НСО в России до сих пор не утверждены, доля переработанных НСО в 2022 году составила всего 26,2 % (3,54 млн тонн) [2]. Это привело к нарастанию экологических проблем из-за ежегодного увеличения площадей специальных полигонов для захоронения отходов примерно на 400 тысяч га [4] и неэффективного использования технологий утилизации и обезвреживания, основной из которых в настоящее время является сжигание [5]. Мировой опыт показывает, что за счёт применения современных технологий и обоснованных управленческих решений долю переработки НСО можно довести до 90 % [6; 7]. Основными причинами низкой эффективности использования отходов в нефтегазовой промышленности Российской Федерации можно считать недостаток отечественных инновационных технологий переработки и отсутствие целевого системного подхода к проблемам рационального использования и обращения с НСО. В условиях усиливающейся международной конкуренции развитие нефтегазовой промышленности должно удовлетворять современным тенденциям, требующим инновационных наукоемких подходов к вовлечению НСО в хозяйственный оборот в качестве вторичных материальных ресурсов при обеспечении максимальной энергоэффективности производственного цикла и его экологической безопасности.

В основу современного обращения с любыми отходами, включая нефтедержащие, закладывается концепция экономики замкнутого цикла [8–10], согласно которой ресурсы используются максимально полно и эффективно, что приводит к отсутствию накоплений отходов [11]. Этот эффект может быть достигнут за счёт применения остатков переработанных НСО в производстве битумных смесей [12; 13], строительных материалов [14; 15], топлива для котельных установок [16] и др. [17; 18].

В статье предлагается новый системный подход, основанный на рассмотрении объектов хранения отходов и технологий их переработки как элементов единой системы, представляющей собой сложноструктурированный комплекс переработки (КП) НСО. Такой системный подход и разработанная методика многофакторного анализа позволяют решать задачи выбора оптимальных технологий по разнородным критериям ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения и комплексной эффективности и формировать научно обоснованные стратегии управления на основе информационной системы поддержки принятия решений.

Исследование можно разделить на следующие этапы: а) приводится классификация НСО по источникам их образования в нефтегазовой промышленности; б) рассматривается классификация методов переработки НСО и анализируются основные системные проблемы, связанные с процессами переработки; в) анали-

зируются взаимосвязи основных элементов КП НСО; г) приводится описание разработанной методики системного анализа КП НСО в нефтегазовой промышленности; д) представляются основные результаты апробации методики на примере одного региона; е) приводятся основные выводы и рекомендации по практическому использованию методики в нефтегазовой промышленности.

1. Классификация НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности

Подходы к классификации НСО по различным признакам широко представлены в литературных источниках [19–24], однако в них не в полном объеме учитываются источники образования отходов в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов (ФККО) [25]. По данным ФККО, в 2024 году насчитывается 367 видов НСО во всех сферах производства и потребления, в том числе 173 вида отходов в нефтегазовой промышленности, классификация которых показана на рис. 1 и 2.

Большая часть отходов в представленной классификации относится к III (93 вида НСО) и IV (77 видов НСО) классам опасности и образуется при добыче сырой нефти и природного газа, включая газовый конденсат нефтяного (попутного) газа, пластовую воду, нефтесодержащую эмульсию при очистке и осушке природного газа и/или газового конденсата, отработанные буровые растворы и шламы, сточные воды и отходы ремонта оборудования. Компонентный состав и агрегатное состояние таких отходов в случае отсутствия длительного хранения варьируются в известных пределах и позволяют использовать существующие на предприятиях нефтегазовой промышленности технологии переработки НСО [6; 26]. Это не исключает проблем, связанных с низкой производительностью и высокими материальными, энергетическими и финансовыми затратами при реализации типовых технологий по сравнению с новыми передовыми технологиями переработки. Кроме того, в случае необходимости переработки НСО из законсервированных хранилищ или отходов, поступающих на переработку из неизвестных источников, выбор оптимального решения по способу переработки (утилизация или обезвреживание) и соответствующей технологии переработки представляет собой сложную задачу. Решение этой задачи невозможно без применения многофакторного подхода к анализу НСО и технологий для их переработки как элементов единого комплекса переработки.

2. Классификация методов переработки НСО

Существующие подходы к классификации НСО в основном разделяют технологии переработки на два направления обращения с отходами: утилизацию и обезвреживание [18; 20; 22–24] (см. рис. 1, 2). Такая классификация не учитывает выраженные функции технологий по очистке жидких НСО физическими методами (фильтрация, флотация, гравитационное разделение и др.) в основном от механических и минеральных примесей и предназначенных, по сути, для восстановления сырья на основе нефтяных углеводородов и его дальнейшего вторичного использования [27; 28]. Кроме того, комбинирование различных технологий переработки НСО может дать синергетический эффект от их применения [28].

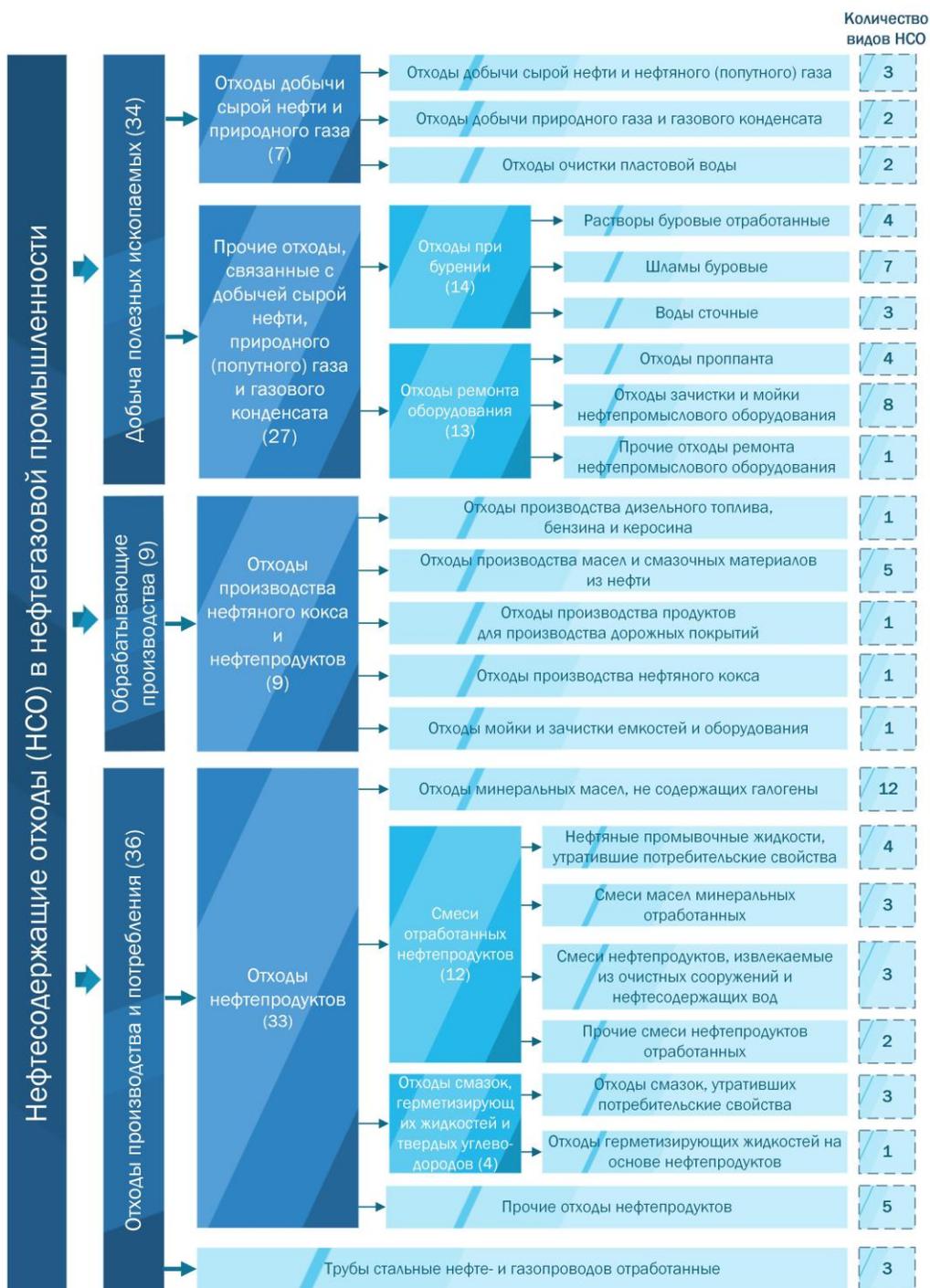


Рис. 1. Классификация НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности (начало)

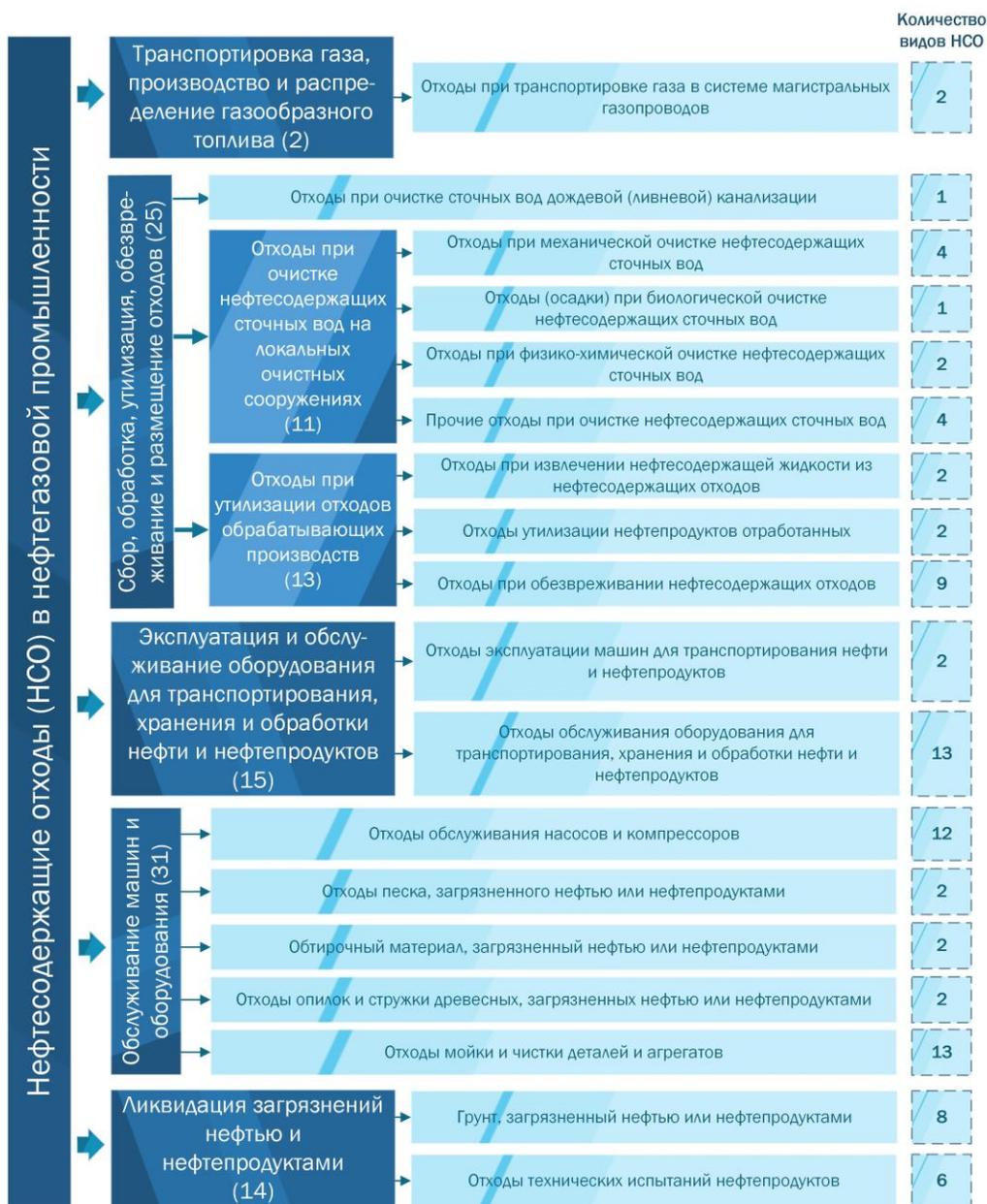


Рис. 2. Классификация НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности (окончание)

Методы переработки НСО можно разделить на четыре категории: восстановительные, утилизационные, обезвреживающие и комбинированные (рис. 3). К восстановительным методам переработки НСО относятся физические методы, которые обычно применяются для предварительной очистки в сочетании с другими способами переработки с целью уменьшения их объема [29]. Физико-химические методы утилизации с использованием высокотемпературной обработки подразумевают извлечение нефтяных углеводородов из НСО с высоким

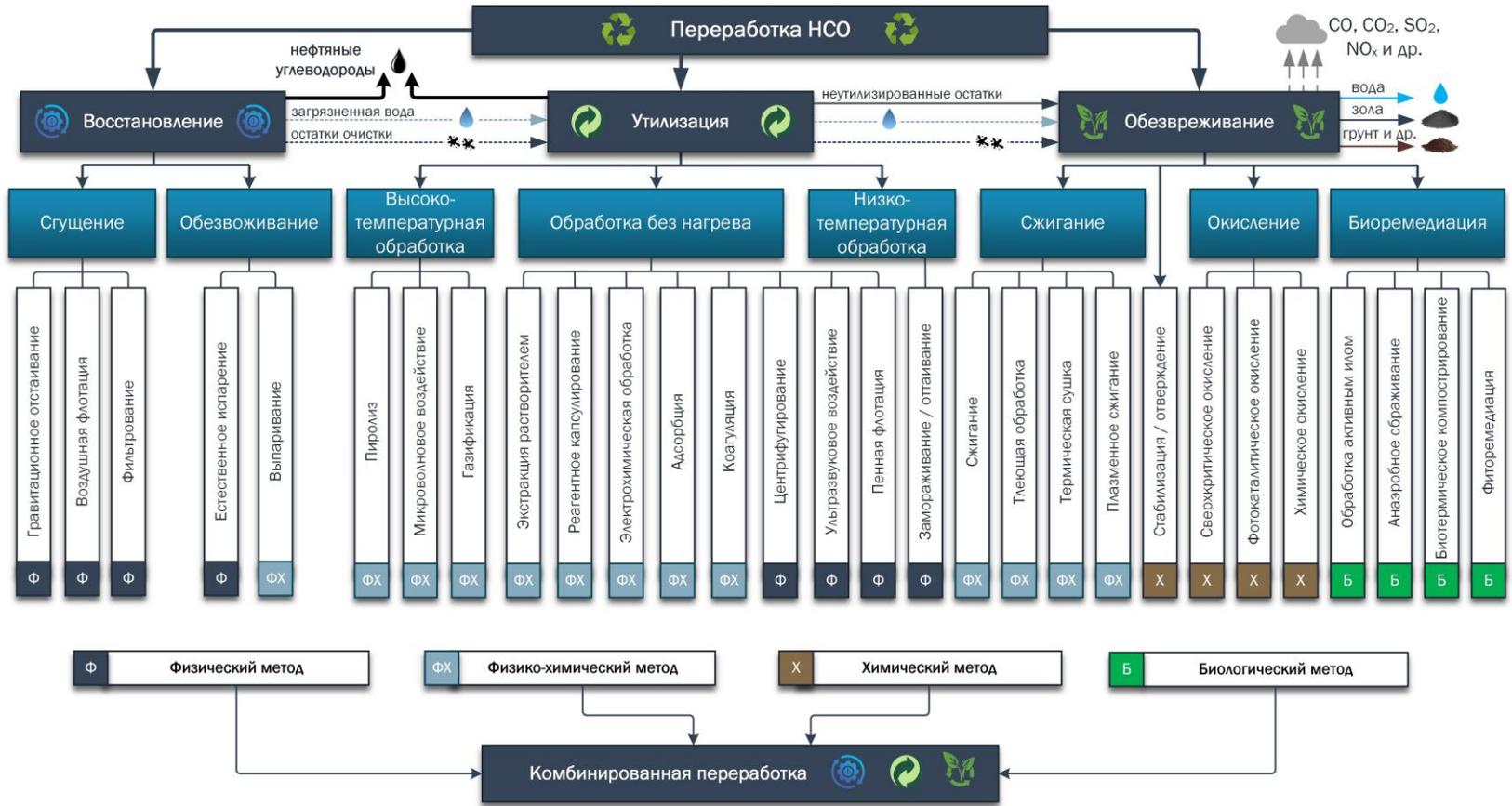


Рис. 3. Классификация методов и технологий переработки HCO

содержанием нефти [30; 31]. Химические и физико-химические методы обезвреживания обычно используются для обработки НСО с низким содержанием нефти [32], а обезвреживание загрязненного грунта обычно производят путем его восстановления биологическими методами [33]. Комбинированная переработка сочетает различные методы для повышения эффективности утилизации и обезвреживания.

Анализ технологий переработки НСО показывает, что их реализация связана со следующими системными проблемами:

- *Физические методы*: длительность процесса отстаивания; образование вторичных отходов; трудоемкость очистки оборудования; низкая степень очистки; сбросы сточных вод; возможность применения только к жидким отходам.

- *Физико-химические методы*: сложность утилизации адсорбента; сложность оборудования; образование вторичных отходов; сбросы сточных вод; сложность подбора растворителей; выбросы в атмосферу продуктов сгорания; образование вторичных отходов; необходимость утилизации теплоты сгорания; необходимость хранения (накопления), утилизации и обезвреживания отходов и применение реагентов; физическое воздействие на окружающую среду (шум, запахи и т. д.).

- *Химические методы*: высокая стоимость реагентов; образование вторичных отходов; сбросы сточных вод; применение в основном к жидким отходам.

- *Биологические методы*: большая длительность переработки; необходимость подготовки площадки для переработки; выбросы в атмосферу; невозможность организации непрерывной переработки; применение только к твердым отходам (загрязнённый грунт) с низким содержанием углеводородов.

3. Анализ взаимосвязи основных элементов КП НСО

Анализ разработанных классификаций, основных характеристик и параметров отходов и технологий их переработки позволяет рассматривать КП НСО в качестве единой системы, обладающей следующими системными свойствами: целостностью, делимостью, эмерджентностью, организованностью, функциональностью и структурностью.

Основу КП НСО составляют две подсистемы: подсистема размещения (ПР) и подсистема переработки (ПП), основными элементами которых являются хранилища отходов и технологии их переработки соответственно (рис. 4). Объектами анализа являются комбинации «хранилище НСО – технология переработки», которые соответствуют требованиям совместимости характеристик элементов подсистем, что подтверждает интегративные качества КП НСО.

Основная взаимосвязь между характеристиками элементов подсистем наблюдается в выборе метода переработки с требуемыми характеристиками перерабатываемого отхода технологией (установкой) в зависимости от характеристик накопленного в хранилище отхода. Дополнительными взаимосвязями элементов являются месторасположение, наличие требуемой инфраструктуры, производительность технологии по паспортным данным и её мобильность.

Результаты анализа связей между элементами рассматриваемого комплекса позволили разработать базы данных НСО [34] и технологий их переработки [35].

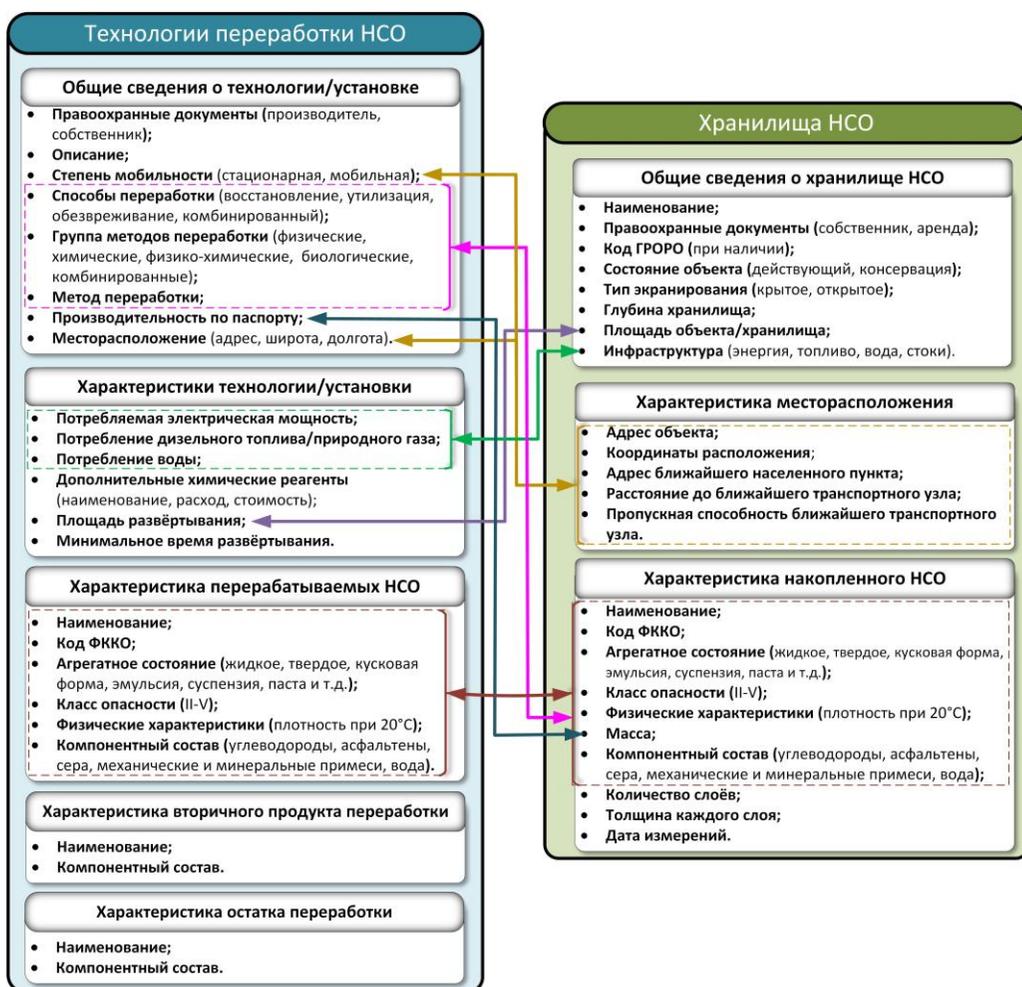


Рис. 4. Взаимосвязь основных характеристик элементов подсистем КП НСО

4. Разработка методики системного анализа КП НСО в нефтегазовой промышленности

На основе проведенного обоснования системных свойств и предложенных способов классификации отходов, методов и технологий их переработки разработана методика системного анализа и оптимизации КП НСО в нефтегазовой промышленности (рис. 5), которая заключается в реализации следующих этапов.

1. Анализ структур и общесистемных свойств ПР и ПП.
2. Анализ основных элементов подсистем, включая выявление основных характеристик элементов и системных проблем их функционирования.
3. Анализ характеристик элементов подсистем и связей между ними (см. рис. 4), включающий классификацию НСО по источникам образования (см. рис. 1, 2), классификацию методов и технологий переработки НСО (см. рис. 3).
4. Структуризация и систематизация информации о хранилищах НСО и технологиях переработки отходов, разработка баз данных, обеспечивающих наиболее рациональный способ обработки информации и её выборки по заданным критериям.

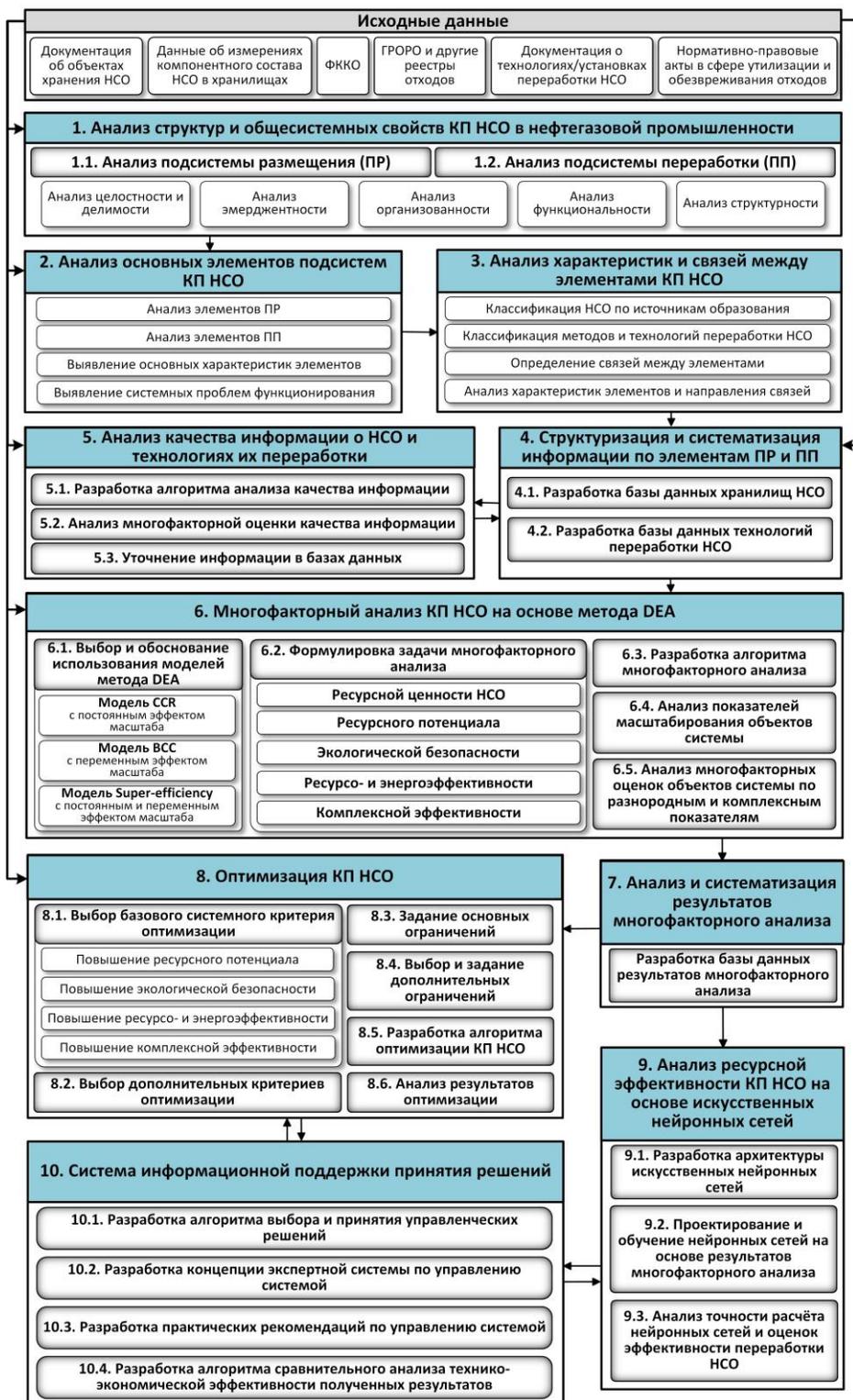


Рис. 5. Методика системного анализа и оптимизации КП НСО в нефтегазовой промышленности

5. Анализ качества информации о НСО и технологиях их переработки для получения многофакторной оценки полноты, достоверности, корректности, актуальности и непротиворечивости информации в базах данных. Этап основан на алгоритме, который описан и апробирован в [36].

6. Многофакторный анализ КП НСО на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) [37], включающий выбор и обоснование использования моделей метода DEA, формулировку задач и разработку алгоритма многофакторного анализа, анализ результатов решения задач в форме оценок эффективности и показателей масштабирования.

Выбор моделей CCR [38], BCC [39] и Super-Efficiency [40] метода DEA в качестве структурной основы для формулировки задач многофакторного анализа КП НСО нефтегазовой промышленности обосновывается:

- использованием характеристик НСО и технологий переработки в качестве входных и выходных параметров, соответствующих поставленным в работе задачам математического программирования (ЗМП);

- возможностью расчёта показателей масштабирования (эффекта масштаба и оценки эффективности масштабирования), анализ которых позволяет прогнозировать результаты переработки НСО при выборе эффективного управления на различных уровнях принятия решений (оперативном и стратегическом);

- возможностью теоретической интерпретации результатов решения ЗМП в виде оценок эффективности на каждом этапе анализа, соответствующих закономерностям и понятиям, используемым и принятым в области переработки НСО;

- возможностью определения наилучших объектов в системе переработки НСО и ранжировки объектов сравнения по величине относительных оценок эффективности на каждом этапе многофакторного анализа.

Решение задач многофакторного анализа позволяет сравнить комбинации «хранилище НСО – технология переработки» и определить относительные оценки ресурсной ценности, ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности и комплексной эффективности. Апробация предложенного подхода описана и представлена в [41–47].

7. Анализ и систематизация результатов многофакторного анализа, включающий разработку соответствующей базы данных [48].

8. Решение задач оптимизации КП НСО включает выбор одного из базовых критериев (повышение ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности или комплексной эффективности) и дополнительных критериев оптимизации, основных и дополнительных ограничений, а также анализ полученных результатов. Решение задач оптимизации в форме ЗМП осуществляется в соответствии с созданным алгоритмом с помощью разработанного специального программного обеспечения с использованием процедур целочисленной оптимизации и симплекс-метода [49].

Анализ полученных результатов оптимизации проводится по 11 основным локальным и общим характеристикам оптимального набора технологических установок в системе комплексной переработки НСО, используемых в задачах многофакторного анализа (длительность переработки НСО; масса реагентов; расход топлива (энергии); выбросы парниковых газов, сернистого ангидрида и сажи в атмосферу; масса образовавшейся золы и загрязненной воды; удельные энергетические затраты на доставку отходов или технологий; время доставки

отходов или технологий; масса полезных углеводов), и по пяти оценкам эффективности многофакторного анализа (ресурсной ценности НСО в хранилищах; ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности, комплексной эффективности комбинаций «хранилище НСО – технология переработки»). Результаты оптимизации после анализа передаются в систему информационной поддержки принятия управленческих решений. Описание и апробация этапа представлены в [50; 51].

9. Анализ ресурсной эффективности КП НСО на основе искусственных нейронных сетей позволяет упростить вычислительные процедуры оптимизации и анализа данных для принятия научно обоснованных управленческих решений. Предлагаемый подход может быть распространён для анализа ресурсного потенциала, экологической безопасности, ресурсо- и энергоэффективности, комплексной эффективности КП НСО. В результате выполнения этапа разрабатываются многослойные искусственные сети на основе перцептронов, обучение и тестирование которых проводится с использованием обучающих наборов данных в виде оценок ресурсной ценности НСО (см. этап 6). Предлагаемый подход описан и апробирован в [52].

10. Система информационной поддержки принятия управленческих решений основана на подходе, который описан и апробирован в [53]. Разработанная система позволяет использовать частные и обобщенные показатели эффективности функционирования КП НСО, полученные в результате оптимизационных процедур на 8 или 9 этапе, и сформировать локальные управляющие воздействия на систему или обосновать перспективные стратегии управления системой переработки отходов. В состав этапа входит разработка концепции экспертной системы (ЭС) для КП НСО, в рамках реализации которой предложена структура её информационной модели, включающая три основных программно-алгоритмических модуля: модуль многофакторного анализа эффективности и оптимизации комплекса переработки НСО, экспертная база знаний НСО и технологий их переработки, интерфейс пользователя ЭС. Для проведения анализа и сопоставления результатов оптимизации с текущими условиями переработки НСО в нефтегазовой промышленности разработан алгоритм сравнительного анализа технико-экономической эффективности полученных результатов, концепция которого описана и апробирована в [54].

Последовательная реализация отдельных этапов методики при необходимости повторяется.

5. Апробация методики системного анализа КП НСО

В рамках апробации разработанной методики решения были решены задачи оптимизации регионального КП НСО по базовому критерию максимальной комплексной эффективности с учётом постоянного и переменного эффекта масштаба (этап 8, рис. 5), при этом дополнительные критерии оптимизации и ограничения не использовались.

Рассматривается КП НСО, который включает $N = 90$ хранилищ, содержащих отходы различных агрегатных состояний (жидкие, эмульсии, пастообразные) и источников образования (буровые шламы и отработанные растворы, отходы добычи сырой нефти, очистки пластовой воды, нефтесодержащие грунты и др.). Общая масса НСО в хранилищах составляет 175,9 тыс. т, общая площадь всех хранилищ – 100,6 тыс. м² (табл. 1). В табл. 2 представлены основные характери-

стики $M = 14$ установок (технологий) переработки НСО, входящих в рассматриваемый комплекс.

Таблица 1

Основные статистические данные по компонентному составу и массе накопленных НСО в $N = 90$ хранилищах

Статистическая характеристика	Масса НСО, [т]	Компонентный состав НСО в N хранилищах, [% масс.]				
		Вода	Асфальтены и смолы	Механические и минеральные примеси	Сера	Светлые углеводороды
Минимальное значение	154	5,221	4,713	3,504	0,617	9,885
Максимальное значение	24452	72,884	21,864	27,207	2,809	85,694
Среднее значение	1955	32,969	10,773	14,229	1,651	41,906
Стандартное отклонение	2777,4	12,429	4,401	5,392	0,473	13,237

Анализ полученных результатов решения поставленных однокритериальных оптимизационных задач показал, что при постоянном эффекте масштаба (табл. 3) только шесть технологий ($m = 1,3,8,11-13$) задействованы в переработке НСО. При этом чаще других используется технология № 11 (УПБШ-10С/УПБШ-10СД, табл. 2), применение которой для переработки НСО в 51-м хранилище обеспечивает максимальную массу полезных продуктов рециклинга – 4404,8 т.

При переменном эффекте масштаба (табл. 4) восемь технологий ($m = 2,3,8,10-14$) задействованы в переработке НСО и наиболее часто используется технология № 13 (Eco-TechRecOil Oy, табл. 2), применение которой для переработки отходов в 34-х хранилищах обеспечивает получение максимальной массы полезных продуктов рециклинга 9560,3 т. Сравнительный анализ результатов расчёта по двум представленным наборам технологий (см. табл. 3, 4) показал, что наибольшую массу полезных продуктов можно получить, используя стратегический подход к управлению системой комплексной переработки НСО с переменным эффектом масштаба 20622,8 т против 15213,1 т в операционном подходе с постоянным эффектом масштаба. Однако по ряду других технологических параметров операционный подход лучше стратегического: длительность переработки меньше на 2581,49 ч, масса используемых реагентов меньше на 5110,26 т, выбросы сернистого ангидрида и сажи в атмосферу меньше на 773,78 т и 2102,66 т соответственно, и др. Таким образом, выбор подхода к управлению переработкой в КП НСО зависит от заданной цели. Если требуется учитывать сразу несколько результирующих характеристик переработки, то выбор оптимальной стратегии управления усложняется и может потребоваться использование системы информационной поддержки принятия решений с привлечением экспертного мнения.

Таблица 2

Характеристики технологий переработки НСО

<i>m</i>	Название установки (технологии)	Метод/Способ переработки НСО	Производительность (по паспорту)
1	МегаМакс	Физический метод/ отстаивание, фильтрация	7–15 м ³ /ч
2	Mineraloel	Комбинированный метод/ фильтрация, пиролиз	2 м ³ /ч
3	COMPEX НТР 2,2	Физико-химический метод/ пиролиз	0,2 т/ч
4	COMPEX НТР 20	Физико-химический метод/ пиролиз	2–2,3 т/ч
5	Holo-Scru 10	Физико-химический метод/ термодесорбционная система (косвенного нагрева)	0,1–20 м ³ /ч
6	Electric-Scru 10	Физико-химический метод/ термодесорбционная система (косвенного нагрева)	0,1–20 м ³ /ч
7	Фортан-4	Физико-химический метод/ пиролиз	0,1–0,5 т/ч
8	Фортан-20	Физико-химический метод/ пиролиз	0,5–2,5 т/ч
9	Фортан ТМ 200	Физико-химический метод/ пиролиз	5,2–36 м ³ /ч
10	ПУ-01	Химический метод/ реагентное капсулирование	2 м ³ /ч
11	УПБШ-10С/УПБШ-10СД	Физический метод/ смешивание, фильтрация	10–15 м ³ /ч
12	УОГ-15-В2ГЦ2-10	Физический метод/ смешивание, центрифугирование, фильтрация	15–20 м ³ /ч
13	Eco-TechRecOil Оу	Комбинированный метод/ сорбционная очистка, фильтрация, отжим	30–50 м ³ /ч
14	Innotech	Физико-химический метод/ сорбционная очистка, фильтрация	0,3–0,35 т/ч

Результаты решения задачи повышения комплексной эффективности с учётом постоянного эффекта масштаба

Наименование групп характеристик		Параметры переработки											Оценки эффективности по критериям				
Наименование		Длительность переработки, [ч]	Масса реагентов, [т]	Расход топлива (энергии), [т]	Выбросы парниковых газов, [т]	Выбросы сернистого ангидрида, [т]	Выбросы в атмосферу сажи, [т]	Масса образовавшейся золы, [т]	Масса образовавшейся загрязненной воды, [т]	Удельные энергетические затраты на доставку, [руб./т]	Длительность доставки отходов или технологий, [ч]	Масса полезных продуктов рециклинга (углеводороды), [т]	Ресурсная ценность НСО	Ресурсный потенциал	Экологическая безопасность	Ресурсо- и энергоэффективность	Комплексная эффективность
<i>Статистические данные</i>																	
Минимальное значение		12,68	0	0,01	0,14	34,66	0	0	17,76	10,09	2,83	6,40	0,181	0,117	0,104	0,082	0,103
Максимальное значение		20363	584,83	30,29	1,34	4186,46	44,37	113,09	2571,09	7502,81	1508,13	1734,73	2,483	1,169	1	2,077	2,371
Среднее значение		457,30	44,68	1,29	0,50	684,23	5,42	8,76	265,38	1381,34	35,67	169,03	0,582	0,461	0,263	0,4	0,477
Стандартное отклонение		2205,33	77,39	4,06	0,21	604,25	9,84	20,94	336,02	1495,05	165,19	218,27	0,341	0,192	0,200	0,290	0,360
Суммарные данные		41157	4021,3	116,2	61580,4	488,2	788,2	23884,3	71585,9	1381,3	3210,4	15213,1	52,36	41,52	23,701	35,998	42,975
Номер технологии <i>m</i>		Количество хранилищ НСО															
<i>Суммарные данные по технологиям</i>																	
1	5	693	171,9	51,6	2842,4	1,5	26,2	991,5	8104,8	326,9	43,0	1771,0	4,666	0,744	2,6	1,446	3,511
3	1	5459,7	0	1,4	131,6	0	1,3	144,9	1196,9	14,8	71,1	281,3	0,791	0,420	0,916	1,312	2,371
8	3	22041,7	0	32,8	4377,3	0	0	2763,5	1378,3	28,3	2021,5	2069,3	3,386	0,986	2,776	2,600	3,725
11	51	10944,9	3829,3	8,2	33511,1	0,02	33,51	14214,7	50649,4	2176,7	712,4	4404,8	24,668	27,446	8,603	19,283	20,883
12	20	1666,1	18,4	17,7	14464,2	276,44	131,50	4003,49	8916,47	380,8	177,5	4141,2	12,376	5,249	4,937	6,543	7,657
13	10	351,6	1,7	4,5	6253,8	210,24	595,60	1766,23	1340,04	396	185	2545,6	6,477	6,675	3,859	4,815	4,827

Результаты решения задачи повышения комплексной эффективности с учётом переменного эффекта масштаба

Наименование групп характеристик		Параметры переработки										Оценки эффективности по критериям					
Наименование		Длительность переработки, [ч]	Масса реагентов, [т]	Расход топлива (энергии), [т]	Выбросы парниковых газов, [т]	Выбросы сернистого ангидрида, [т]	Выбросы в атмосферу сажи, [т]	Масса образовавшейся золы, [т]	Масса образовавшейся загрязненной воды, [т]	Удельные энергетические затраты на доставку, [руб./т]	Длительность доставки отходов или технологий, [ч]	Масса полезных продуктов рециклинга (углеводороды), [т]	Ресурсная ценность НСО	Ресурсный потенциал	Экологическая безопасность	Ресурсо- и энергоэффективность	Комплексная эффективность
<i>Статистические данные</i>																	
Минимальное значение		3,52	0	0,04	0,06	0	0	0	17,76	10,09	4,13	14,11	0,181	0,055	0,134	0,019	0,0233
Максимальное значение		16969,3	7636,20	19,00	4,44	4395,74	90,35	418,65	2571,09	7485,23	2445,07	1789,38	2,483	4,444	Макс.*	4,075	4,0754
Среднее значение		485,98	101,46	0,99	0,59	652,17	14,02	32,12	265,38	779,85	104,08	229,14	0,582	0,589	-	0,240	0,2637
Стандартное отклонение		2278,44	804,31	2,30	0,49	529,63	15,58	52,77	336,02	961,32	315,82	223,33	0,341	0,488	-	0,451	0,4676
<i>Суммарные данные</i>		43738,5	9131,5	89,0	58695,0	1262,0	2890,8	23884,3	63890,5	779,9	9367,5	20622,8	52,36	53,01	-	21,566	23,738
		<i>Суммарные данные по технологиям</i>															
Номер технологии <i>m</i>	Количество хранилищ НСО	188,3	0	8,2	2543,6	1,7	23,5	1492,9	8418,7	205,9	1659,6	1672,9	2,835	3,059	1,811	1,226	1,228
2	5	5459,7	0	1,4	131,6	0	1,3	144,9	1196,9	14,8	71,1	281,3	0,791	0,420	0,926	1,126	1,294
3	1	13732	0	20,4	1167,2	0	0,0	1902,8	1192,4	30,8	3991,7	551,8	1,268	0,835	2,514	0,853	1,325
8	3	16969,3	7636,2	11,1	0	0	0,0	2571,1	18027,4	477,0	60,9	864,9	0,328	0,109	Макс.	0,019	1,258
10	1	4194	1469,2	3,2	12463,8	0	12,5	5720,3	19247,3	1503,6	195,3	1656,6	10,918	14,048	3,720	6,564	6,682
11	19	1626,2	17,9	17,2	13738,0	271,7	124,9	3898,8	8813,8	380,2	177,4	3933,2	11,992	5,910	5,875	3,650	3,767
12	20	1352,2	6,7	18,0	23487,4	836,7	2236,9	6575,0	5977,5	900,1	1082,3	9560,3	19,060	23,857	15,045	7,165	7,206
13	34	216,8	1,4	9,5	5163,3	151,8	491,7	1578,5	1016,5	256,9	2129,2	2101,8	5,172	4,776	3,706	0,964	0,979
14	7																

* «Макс.» означает, что объект сравнения останется эффективным при любом изменении входных параметров в соответствующей ЗМП.

Заключение

В работе предложена и описана новая методика системного анализа КП НСО на основе метода ДЕА. Описаны и представлены классификации НСО по источникам образования в нефтегазовой промышленности и методам переработки НСО. Приводится анализ основных системных проблем, присущих различным технологиям переработки отходов. Рассмотрены взаимосвязи элементов комплекса переработки, выявлены общесистемные свойства и закономерности, подтверждающие обоснованность подхода к исследованию КП НСО с позиций теории системного анализа.

Полученные результаты апробации методики для системы переработки НСО одного региона на примере решения двух задач оптимизации по критерию комплексной эффективности переработки отходов подтверждают возможность использования предлагаемого подхода на основе метода ДЕА и позволяют выбрать наилучшее решение по управлению процессом переработки в нефтегазовой промышленности.

Предложенная методика системного анализа на основе метода ДЕА может быть применена для широкого круга задач в других отраслях промышленности. Направлением будущих исследований может стать расширение количества используемых моделей метода ДЕА для проведения многофакторного анализа с целью увеличения точности анализа и обеспечения большей вариативности результирующих управленческих решений в системе информационной поддержки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 15-2021 «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)». М.: Бюро НДТ, 2021.
2. Окружающая среда: официальная статистика. Отходы производства и потребления // Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 08.03.2024).
3. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ.
4. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.
5. ГОСТ Р 56828.43-2018. Наилучшие доступные технологии. Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов. Показатели для идентификации (2018) // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ.
6. Characterization and treatment of oily sludge: A systematic review / H. Chen, X. Wang, H. Liang, B. Chen, Y. Liu, Z. Ma, Z. Wang // *Environmental Pollution*, 2024. Vol. 344. Characterization and treatment of oily sludge. P. 123245.
7. Characterization of oil component and solid particle of oily sludge treated by surfactant-assisted ultrasonication / Z. Lin, F. Xu, L. Wang, L. Hu, L. Zhu, J. Tan, Z. Li, T. Zhang // *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021. Т. 34. С. 53–60.
8. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // *Journal of Cleaner Production*, 2016. Vol. 114. A review on circular economy. Pp. 11–32.
9. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy / S. Jerez, M. Ventura, R. Molina, M.I. Pariente, F. Martínez, J.A. Melero // *Journal of Environmental Management*, 2021. Vol. 285. P. 112124.
10. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review / A.H. Jagaba, S.R.M. Kutty, I.M. Lawal, A.H. Birniwa, A.C. Affam, N.S.A. Yaro, A.K. Usman, I. Umaru, S. Abubakar, A. Noor, U.B. Soja, A.S. Yakubu // *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2022. Vol. 3. P. 100029.

11. *Vlachokostas Ch., Michailidou A.V., Achilles Ch.* Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. Vol. 138. P. 110563.
12. *Ягафарова Г.Г., Сафаров А.Х., Московец А.В.* [и др.] Отходы нефтегазового комплекса в дорожном строительстве // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2014. № 8. С. 9–11. EDN SJMXVV.
13. Rheological modeling and microstructural evaluation of oily sludge modified bitumen / *A.M. Memon, M.H. Sutanto, N.I.M. Yusoff, R.A. Memon, M.I. Khan, A.M. Al-Sabaei* // *Case Studies in Construction Materials*, 2023. Vol. 18. P. 02039.
14. *Тимрот С.Д., Гурьева Н.Л., Яманина Н.С.* Использование нефтесодержащих отходов в производстве керамзита // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2010. Т. 53. № 5. С. 117–118.
15. *Department of Civil and Environmental Engineering, Universiti Teknologi Petronas, Seri Iskandar, Malaysia, Et Al. K.* Review of petroleum sludge thermal treatment and utilization of ash as a construction material, a way to environmental sustainability // *International Journal of advanced and applied sciences*, 2020. Т. 7. N 12. С. 68–81.
16. *Яковлев С.И.* Создание экотехнопарка по безотходной утилизации нефтесодержащих отходов с получением технического грунта и котельных (печных) топлив // *Экологический вестник России*. 2020. № 4. С. 18–20.
17. *Ефимова С.Б., Калинина Е.В.* Оценка возможности использования остатков после пиролиза нефтесодержащих отходов в производстве керамических изделий // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 1. С. 83–87.
18. *Цокур О.С.* Повышение ресурсосбережения утилизацией нефтесодержащих отходов ре-агентным способом с получением экологически безопасных продуктов: специальность 03.02.08 «Экология (по отраслям)»: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2015. 22 с.
19. *Васильев А.В., Быков Д.Е., Пименов А.А.* Анализ особенностей и практические результаты экологического мониторинга загрязнения почвы нефтесодержащими отходами // *Изв. Самар. науч. центра РАН. Самара*. 2014. Т. 16. № 1(6). С. 1705–1708.
20. *Пименов А.А., Быков Д.Е., Васильев А.В.* О подходах к классификации отходов нефтегазовой отрасли и побочных продуктов нефтепереработки // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2014. № 4(44). С. 183–190.
21. *Гладышев Н.Г.* Научные основы рециклинга в техноприродных кластерах обращения с отходами: дис. ... д-ра техн. наук: 03.02.08 / ГОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет». Иваново, 2013.
22. *Десяткин А.А.* Разработка технологии утилизации нефтяных шламов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. Уфа, 2004. 24 с.
23. *Наркевич И.П.* Классификация промышленных отходов // *Химическая промышленность*. 1987. № 4. С. 51–54.
24. *Кративский Е.И.* Нефтешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация. М.: Вологда: Инфра Инженерия, 2021. 432 с.
25. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 02.11.2018) «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» (с изм. и доп., вступ. в силу с 04.10.2021).
26. *Мазлова Е.А., Мецержков С.В.* Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. М.: Ноосфера, 2001. 56 с.
27. Research progress of processing technology and characteristics of oily sludge / *D.Y. Kang, H. Lin, D.P. Niu, G. Tian, R. Xu, Z.Y. Zhang, Y.J. Luo, Z.Z. Zhang* // *China Environ.* 2023. Sci. 43, 4106–4120. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2023.0132>.
28. *Mazlova E.A., Merisidi I.A.* Oil and Petroleum Spill Waste Management Problems // *Ecology and Industry of Russia*, 2020. Т. 24. № 12. С. 66–71.
29. Oily sludge reduction in oil and gas gathering process / *J. Zhang, Y. Jia, B. Liu, Z.J. Zhang, J. An, X.M. Cai* // *Chem. Ind. Eng. Prog.*, 2020, 39, 372–378. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1317>.
30. Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions / *W. Feng, Y. Yin, M.De Lourdes Mendoza, L. Wang, X. Chen, Y. Liu, L. Cai, L. Zhang* // *Journal of Cleaner Production*, 2017. Vol. 148. Pp. 84–89.
31. *Cao R., Han D., Cao Z.* Study on the solidification and forming mechanism of oily sludge // *J. Petrochem. Univ.* 2022. 35. 9. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-396X.2022.02.002>.

32. The fate of total petroleum hydrocarbons during oily sludge composting: a critical review / *A. Aguelmouss, L. El Fels, S. Souabi, M. Zamama, M. Hafidi* // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 473–493.
33. Development in the biological treatment of oily sludge in oil and gas field / *Q.H. Bao, L.X. Huang, J.L. Xiu, L. Yu, Q.F. Cui, Y.D. Ma, L.N. Yi* // *Chem. Ind. Eng. Prog.* 2021. 40. 2762–2773. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1299>.
34. Свидетельство № 2019621436 Российская Федерация. База данных по отходам нефтегазового комплекса: свидетельство о государственной регистрации базы данных: / *Ю.Э. Пleshivцева, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра*; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», № 2019621312; заявл. 29.07.2019; зарегистр. 08.08.2019. 1 с.
35. Свидетельство № 2019621435 Российская Федерация. База данных по технологиям утилизации отходов нефтегазового комплекса: свидетельство о государственной регистрации базы данных: / *Ю.Э. Пleshivцева, М.Ю. Деревянов, А.Г. Мандра*; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», № 2019621313; заявл. 29.07.2019; зарегистр. 08.08.2019. 1 с.
36. *Деревянов М.Ю., Каширских Д.В.* Алгоритм контроля качества данных об отходах нефтегазового комплекса // *Инновации и «зеленые» технологии: Региональная научно-практическая конференция: сборник материалов и докладов, Самара, 29 ноября 2017 года.* Самара: Вектор, 2018. С. 116–122.
37. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. *Data Envelopment Analysis*. New York, NY: Springer US, 2007.
38. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision making units // *European Journal of Operational Research*. 1978. Vol. 2. No. 6. Pp. 429–444.
39. *Banker R.D., Charnes A., & Cooper W.W.* Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis // *Management Science*, 1984. 30(9). 1078–1092. <http://www.jstor.org/stable/2631725>.
40. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // *Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science*. Ed by J. Zhu. Boston, MA: Springer US, 2015. V. 221. Pp. 381–414.
41. Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method / *Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, D.V. Kashirskikh, A.A. Pimenov, A.V. Kerov, V.K. Tyan* // *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2018. No. 11. Pp. 139–144.
42. Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil And Gas Industry / *M. Derevyanov, Y. Pleshivtseva, A. Afinogentov, A. Mandra, A. Pimenov* // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, Russia: IEEE. 2019. Pp. 429–434.
43. *Деревянов М.Ю., Пleshivцева Ю.Э.* Анализ ресурсной ценности и ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе DEA-метода // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки*. 2022. № 4. С. 27–34.
44. *Деревянов М.Ю.* Анализ ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов с учетом переменного эффекта масштаба // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2023. № 3. С. 65–75.
45. *Деревянов М.Ю.* Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA // *Системы анализа и обработки данных*, 2023. № 3(91). С. 47–68.
46. *Derevyanov M., Pleshivtseva Yu., Afinogentov A.* Multi-factorial Analysis of Environmental Safety and Optimization of Oily Waste Recycling System // *Advances in Automation IV: Lecture Notes in Electrical Engineering* / Eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer International Publishing, 2023. Vol. 986. Pp. 186–193.
47. *Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A.* Simulation and Evaluation of the Efficiency of Oil-contaminated Wastes Recycling System // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. Vol. 459. No. 4. P. 042058.
48. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622779 Российская Федерация. База данных для оптимизации сложноструктурированной системы комплексной переработки техногенных отходов нефтегазового комплекса: № 2021621717; заявл. 20.08.2021; опубл. 03.12.2021: / *Ю.Э. Пleshivцева и др.*; заявитель и правообладатель

- тель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет».
49. Свидетельство № 2021664227 Российская Федерация. Оптимизация сложноструктурированной системы комплексной переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса: / Ю.Э. Пleshivtseva и др.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». № 2021663386; заявл. 24.08.2021; зарегистр. 01.09.2021. 1 с.
 50. Многокритериальная оптимизация комплексной переработки нефтесодержащих отходов по системным критериям качества / М.Ю. Деревянов, Ю.Э. Пleshivtseva, А.А. Афиногентов, А.Г. Мандра, А.А. Пименов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. № 30(3). С. 15–30.
 51. Multi-criteria optimization of the system for processing of technogenic waste of oil and gas enterprises / A. Afinogentov, M. Derevyanov, Yu. Pleshivtseva, A. Mandra // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2910 (1). P. 020118.
 52. Application of Neural Networks to Assess the Resource Value of Oil-Contaminated Waste Storage Facilities / A.A. Afinogentov, Y.A. Bagdasarova, M.Y. Derevyanov, Y.E. Pleshivtseva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. No. 2. P. 022073.
 53. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A. Development Approach to an Expert System for Efficiency Assessment of Waste Recycling in the Oil Industry Based on DEA Models // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, Russian Federation: IEEE, 2021. Pp. 817–822.
 54. Afinogentov A.A., Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E. Evaluation of the Technical and Economic Efficiency of Oil-Contaminated Wastes Recycling System Based on DEA-Method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. Vol. 666. No. 3. P. 032032.

Статья поступила в редакцию 09 февраля 2024 г.

SYSTEM ANALYSIS OF STRUCTURED COMPLEX FOR OIL WASTES RECYCLING SYSTEM

*M.Yu. Derevyanov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

Abstract. A new approach to the system analysis of a structured complex of recycling (CR) of oil waste (OW) is proposed based on the Data Envelopment Analysis method, which allows solving the problem of choosing optimal processing technologies according to heterogeneous criteria of resource potential, environmental safety, resource and energy saving, and integrated efficiency. New classifications are presented: OW by sources of formation in the oil and gas industry and methods of recycling OW. An analysis of the systemic problems accompanying the technological processes of processing non-carbon dioxide has been carried out, which confirm the need to consider non-carbon dioxide storage facilities and technologies for their processing within a single system, consisting of two subsystems of disposal and processing. The system-wide properties of the OW CR and the interrelations of its main elements are analyzed, the presence of stable connections between the elements of the system and integrative qualities are revealed.

A methodology for system analysis and optimization of the OW CR has been developed, consisting of 10 consecutive stages and including the development of databases and special software, multifactor analysis and optimization, the use of artificial neural networks to increase the speed of calculations, and the development of an information support system for making scientifically based management decisions.

The results of testing the methodology for analyzing the CR, consisting of 90 OW storage facilities and 14 processing technologies located within one region, are shown. The results of solving two problems of optimizing the non-carbon dioxide processing system according to the criterion of maximum comprehensive efficiency, taking into account constant and variable scale effects, were obtained.

The proposed approach can be extended to other regions of the Russian Federation with a developed oil and gas industry, where there is a need to take urgent measures to eliminate waste storage facilities and improve the environmental situation.

Keywords: system analysis, recycling complex, oily waste, technology, classification, methodology, Data Envelopment Analysis, oil and gas industry

REFERENCES

1. Informacionno-tehnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 15-2021 «Utilizaciya i obezvrezhivanie othodov (krome termicheskikh sposobov)» [Information and technical guide to the best available technologies ITS 15-2021 “Waste disposal and disposal (except thermal methods)”]. M.: Byuro NDT, 2021. (In Russian).
2. Okruzhayushchaya sreda: oficial'naya statistika. Othody proizvodstva i potrebleniya [Environment: official statistics. Industrial and consumption waste] // Federal State Statistics Service of the Russian Federation. <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed March 08,2024) (In Russian).
3. Federal'nyj zakon «Ob othodah proizvodstva i potrebleniya» ot 24.06.1998 N 89-FZ. [Federal Law “On Production and Consumption Waste” dated June 24, 1998 N 89-FZ] (In Russian).
4. O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2022 godu. Gosudarstvennyj doklad. [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report.]. M.: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2023. 686 p. (In Russian).



© The Author(s), 2024

* *Maksim Yu. Derevyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor*

5. GOST R 56828.43-2018. Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Utilizatsiya i obezvrezhivanie neftesoderzhashchih othodov. Pokazateli dlya identifikatsii [GOST R 56828.43-2018. Best available technology. Recycling and neutralization of oil-containing waste. Indicators for identification] (2018) // Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. M.: Standardinform. (In Russian).
6. Characterization and treatment of oily sludge: A systematic review / *H. Chen, X. Wang, H. Liang, B. Chen, Y. Liu, Z. Ma, Z. Wang* // *Environmental Pollution*. 2024. Vol. 344. Characterization and treatment of oily sludge. P. 123245.
7. Characterization of oil component and solid particle of oily sludge treated by surfactant-assisted ultrasonication / *Z. Lin, F. Xu, L. Wang, L. Hu, L. Zhu, J. Tan, Z. Li, T. Zhang* // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2021. T. 34. C. 53–60.
8. *Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S.* A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 114, A review on circular economy. Pp. 11–32.
9. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy / *S. Jerez, M. Ventura, R. Molina, M.I. Pariente, F. Martínez, J.A. Melero* // *Journal of Environmental Management*, 2021. Vol. 285. P. 112124.
10. Circular economy potential and contributions of petroleum industry sludge utilization to environmental sustainability through engineered processes – A review / *A.H. Jagaba, S.R.M. Kutty, I.M. Lawal, A.H. Birniwa, A.C. Affam, N.S.A. Yaro, A.K. Usman, I. Umaru, S. Abubakar, A. Noor, U.B. Soja, A.S. Yakubu* // *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2022. Vol. 3. P. 100029.
11. *Vlachokostas Ch., Michailidou A.V., Achilles Ch.* Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. Vol. 138. P. 110563.
12. *Yagafarova G.G., Safarov A.Kh., Moskovets A.V.* [etc.] Othody neftegazovogo kompleksa v dorozhnom stroitel'stve [Waste from the oil and gas complex in road construction] // *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2014. No. 8. Pp. 9–11. (In Russian).
13. Rheological modeling and microstructural evaluation of oily sludge modified bitumen / *A.M. Memon, M.H. Sutanto, N.I.M. Yusoff, R.A. Memon, M.I. Khan, A.M. Al-Sabaeei* // *Case Studies in Construction Materials*, 2023. Vol. 18. P. e02039.
14. *Timrot S.D., Guryleva N.L., Yamanina N.S.* Ispol'zovanie neftesoderzhashchih othodov v proizvodstve keramzita [Use of oil-containing waste in the production of expanded clay] // *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. 2010. T. 53. No. 5. Pp. 117–118. (In Russian).
15. *Department of Civil and Environmental Engineering, Universiti Teknologi Petronas, Seri Iskandar, Malaysia, et al.*, a way to environmental sustainability // *International Journal of advanced and applied sciences*, 2020. T. 7. N 12. C. 68–81.
16. *Yakovlev S.I.* Sozdanie ekotekhnoparka po bezothodnoj utilizatsii neftesoderzhashchih othodov s polucheniem tekhnicheskogo grunta i kotel'nyh (pechnykh) topliv [Creation of an ecotechnopark for waste-free disposal of oil-containing waste with the production of technical soil and boiler (furnace) fuels] // *Ecological Bulletin of Russia*. 2020. No. 4. Pp. 18–20. (In Russian).
17. *Efimova S.B., Kalinina E.V.* Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya ostatkov posle piroлиза neftesoderzhashchih othodov v proizvodstve keramicheskikh izdelij [Assessment of the possibility of using residues after pyrolysis of oil-containing waste in the production of ceramic products] // *Chemistry. Ecology. Urbanism*. 2020. T. 1. Pp. 83–87. (In Russian).
18. *Tsokur O.S.* Povyshenie resursosberezheniya utilizatsiej neftesoderzhashchih othodov reagentnym sposobom s polucheniem ekologicheski bezopasnykh produktov [Increasing resource conservation by recycling oil-containing waste using a reagent method to obtain environmentally friendly products]: specialty 03.02.08 “Ecology (by industry)”: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Krasnodar, 2015. 22 p. (In Russian).
19. *Vasiliev A.V., Bykov D.E., Pimenov A.A.* Analiz osobennostej i prakticheskie rezul'taty ekologicheskogo monitoringa zagryazneniya pochvy neftesoderzhashchimi othodami [Analysis of features and practical results of environmental monitoring of soil pollution with oily waste] // *Izv. Samar. scientific center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. Vol. 16. No. 1(6). Pp. 1705–1708. (In Russian).

20. *Pimenov A.A., Bykov D.E., Vasiliev A.V.* O podhodah k klassifikacii othodov neftegazovoj otrasli i pobochnyh produktov neftepererabotki [On approaches to the classification of waste from the oil and gas industry and by-products of oil refining] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences, 2014, N 4(44). Pp. 183–190. (In Russian).
21. *Gladyshev N.G.* Nauchnye osnovy reciklinga v tekhnoprirodnyh klasterah obrashcheniya s othodami [Scientific basis of recycling in techno-natural waste management clusters]. dis. ... Doctor of Technical Sciences: 02/03/08 / State Educational Institution of Higher Professional Education "Ivanovo State Chemical Technology University". Ivanovo, 2013. (In Russian).
22. *Desyatkin A.A.* Razrabotka tekhnologii utilizacii neftyanyh shlamov [Development of technology for utilization of oil sludge: author's abstract]: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.17.07. Ufa, 2004. 24 p. (In Russian).
23. *Narkevich I.P.* Klassifikaciya promyshlennyh othodov [Classification of industrial waste] // Chemical industry. 1987. No. 4. Pp. 51–54 (In Russian).
24. *Krapivskij E.I.* Nefteshlamy: unichtozhenie, utilizaciya, dezaktivaciya [Oil sludge: destruction, recycling, decontamination.]. M.: Vologda: Infra Engineering, 2021. 432 p. (In Russian).
25. Prikaz Rosprirodnadzora ot 22.05.2017 № 242 (red. ot 02.11.2018) «Ob utverzhdenii Federal'nogo klassifikacionnogo kataloga othodov» (s izm. i dop., vstup. v silu s 04.10.2021) [Order of Rosprirodnadzor dated May 22. 2017. No. 242 (as amended on November 2, 2018) "On approval of the Federal Classification Catalog of Wastes" (with amendments and additions, entered into force on October 4, 2021)] (In Russian).
26. *Mazlova E.A., Meshcheryakov S.V.* Problemy utilizacii nefteshlamov i sposoby ih pererabotki [Problems of oil sludge disposal and methods of their processing]. M.: Noosphere, 2001. 56 p. (In Russian).
27. Research progress of processing technology and characteristics of oily sludge / *D.Y. Kang, H. Lin, D.P. Niu, G. Tian, R. Xu, Z.Y. Zhang, Y.J. Luo, Z.Z. Zhang* // China Environ. 2023. Sci. 43. 4106–4120. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2023.0132>.
28. *Mazlova E.A., Merisidi I.A.* Oil and Petroleum Spill Waste Management Problems // Ecology and Industry of Russia. 2020. T. 24. № 12. C. 66–71.
29. Oily sludge reduction in oil and gas gathering process / *J. Zhang, Y. Jia, B. Liu, Z.J. Zhang, J. An, X.M. Cai* // Chem. Ind. Eng. Prog. 2020. 39. 372–378. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1317>.
30. *Feng W., Yin Y., De Lourdes Mendoza M., Wang L., Chen X., Liu Y., Cai L., Zhang L.* Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions // Journal of Cleaner Production, 2017. Vol. 148. Pp. 84–89.
31. *Cao R., Han D., Cao, Z.* Study on the solidification and forming mechanism of oily sludge // J. Petrochem. Univ. 2022. 35. 9. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-396X.2022.02.002>.
32. The fate of total petroleum hydrocarbons during oily sludge composting: a critical review / *A. Aguelmous, L. El Fels, S. Souabi, M. Zamama, M. Hafidi* // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2019. Vol. 18. No. 3. Pp. 473–493.
33. Development in the biological treatment of oily sludge in oil and gas field / *Q.H. Bao, L.X. Huang, J.L. Xiu, L. Yu, Q.F. Cui, Y.D. Ma, L.N. Yi* // Chem. Ind. Eng. Prog. 2021. 40. Pp. 2762–2773. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1299>.
34. Svidetel'stvo № 2019621436 Rossijskaya Federaciya. Baza dannyh po othodam neftegazovogo kompleksa: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh [Certificate No. 2019621436 Russian Federation. Database on waste from the oil and gas complex: certificate of state registration of the database] / *Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, A.G. Mandra*; applicant and copyright holder FSBEI HE Samara State. tech. univers. No. 2019621312; application 07/29/2019; registered 08.08.2019. P. 1 (In Russian).
35. Svidetel'stvo № 2019621435 Rossijskaya Federaciya. Baza dannyh po tekhnologiyam utilizacii othodov neftegazovogo kompleksa: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh [Certificate No. 2019621435 Russian Federation. Database on waste disposal technologies of the oil and gas complex: certificate of state registration of the database]: / *Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, A.G. Mandra*; applicant and copyright holder FSBEI HE Samara State. tech. univers. No. 2019621313; application 07/29/2019; registered 08.08.2019. P.1 (In Russian).
36. *Derevyanov M.Y., Kashirskih D.V.* Algoritm kontrolya kachestva dannyh ob othodah neftegazovogo kompleksa // Innovacii i «zelenye» tekhnologii [Algorithm for quality control of data on waste from the oil and gas complex]: nnovations and “green” technologies: Regional scientific and practical conference: collection of materials and reports, Samara, November 29, 2017. Samara: Vector. 2018. Pp. 116–122. (In Russian).

37. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. Data Envelopment Analysis. New York, NY: Springer US. 2007.
38. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision making units // *European Journal of Operational Research*, 1978. Vol. 2. No. 6. Pp. 429–444.
39. *Banker R.D., Charnes A., & Cooper W.W.* Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis // *Management Science*, 1984. 30(9). 1078–1092. <http://www.jstor.org/stable/2631725>.
40. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // *Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science*. Ed by J. Zhu. Boston, MA: Springer US. 2015. V. 221. Pp. 381–414.
41. Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method / *Yu.E. Pleshivtseva, M.Yu. Derevyanov, D.V. Kashirskikh, A.A. Pimenov, A.V. Kerov, V.K. Tyan* // *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2018. No. 11. Pp. 139–144.
42. Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil And Gas Industry / *M. Derevyanov, Y. Pleshivtseva, A. Afinogentov, A. Mandra, A. Pimenov* // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, Russia: IEEE. 2019. Pp. 429–434.
43. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E.* Analiz resursnoy cennosti i resursnogo potenciala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov na osnove DEA-metoda [Analysis of the resource value and resource potential of oily waste processing system facilities based on the DEA method] // *Izv. universities North Caucasus region. Tech. Sciences*. 2022. N 4. Pp. 27–34. (In Russian).
44. *Derevyanov M.YU.* Analiz resursnogo potenciala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov s uchedom peremennogo effekta masshtaba [Analysis of the resource potential of oil-containing waste processing system facilities taking into account variable economies of scale] // *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer technology and information science*. 2023. N 3. Pp. 65–75 (In Russian).
45. *Derevyanov M.YU.* Analiz pokazatelej masshtabirovaniya pri ocenke resursnogo potenciala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov na osnove metoda DEA [Analysis of scaling indicators when assessing the resource potential of oily waste processing system facilities based on the DEA method] // *Data Analysis and Processing Systems*. 2023. N 3(91). Pp. 47–68. (In Russian).
46. *Derevyanov M., Pleshivtseva Yu., Afinogentov A.* Multi-factorial Analysis of Environmental Safety and Optimization of Oily Waste Recycling System // *Advances in Automation IV: Lecture Notes in Electrical Engineering* / Eds. A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov. Cham: Springer International Publishing. 2023. Vol. 986. Pp. 186–193.
47. *Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A.* Simulation and Evaluation of the Efficiency of Oil-contaminated Wastes Recycling System // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. No. 4. P. 042058.
48. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2021622779 Rossijskaya Federaciya. Baza dannyh dlya optimizacii slozhno-strukturirovannoj sistemy kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov neftegazovogo kompleksa [Certificate of state registration of the database No. 2021622779 Russian Federation. Database for optimizing a complex structured system for the integrated processing of industrial waste from the oil and gas complex]: No. 2021621717: application. 08/20/2021: publ. 12/03/2021: / *Yu.E. Pleshivtseva and others*; applicant and copyright holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Technical University". (In Russian).
49. Svidetel'stvo № 2021664227 Rossijskaya Federaciya. Optimizaciya slozhno-strukturirovannoj sistemy kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh othodov predpriyatij neftegazovogo kompleksa [Certificate No. 2021664227 Russian Federation. Optimization of a complex structured system for complex processing of industrial waste from oil and gas enterprises] / *Yu.E. Pleshivtseva and others*; applicant and copyright holder FSBEI HE Samara State. tech. univers. No. 2021663386; application 08/24/2021; registered 09/01/2021. P. 1. (In Russian).
50. *Derevyanov M.YU., Pleshivtseva YU.E., Afinogentov A.A., Mandra A.G., Pimenov A.A.* Mnogokriterial'naya optimizaciya kompleksnoj pererabotki neftesoderzhashchih othodov po sistemnym kriteriyam kachestva [Multi-criteria optimization of complex processing of oil-containing waste according to system quality criteria] // *Vestnik Samarskogo*

- gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2022. № 30(3). C. 15–30.
51. Multi-criteria optimization of the system for processing of technogenic waste of oil and gas enterprises / A. Afinogentov, M. Derevyanov, Yu. Pleshivtseva, A. Mandra // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2910 (1). P. 020118.
 52. Application of Neural Networks to Assess the Resource Value of Oil-Contaminated Waste Storage Facilities / A.A. Afinogentov, Y.A. Bagdasarova, M.Y. Derevyanov, Y.E. Pleshivtseva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 988. No. 2. P. 022073.
 53. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A. Development Approach to an Expert System for Efficiency Assessment of Waste Recycling in the Oil Industry Based on DEA Models // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, Russian Federation: IEEE. 2021. Pp. 817–822.
 54. Afinogentov A.A., Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E. Evaluation of the Technical and Economic Efficiency of Oil-Contaminated Wastes Recycling System Based on DEA-Method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. No. 3. P. 032032.

Original article submitted 09.02.2024

УДК 004.8:519.68

КОМПЛЕКСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ СВАРЩИКОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ЭВОЛЮЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ***Е.В. Заровчатская¹, А.Е. Мисник¹, О.Е. Аверченков²**

¹Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет»
Республика Беларусь, 212000, г. Могилев, проспект Мира, 43

²Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске
214013, РФ, г. Смоленск, Энергетический проезд, дом 1

E-mail: 2415719@gmail.com, anton@misnik.by, aver22@rambler.ru

Аннотация. Рассматриваются методы комплексного повышения эффективности управления обучением сварщиков с использованием алгоритмов роевого интеллекта и эволюционного моделирования. Описывается информационно-измерительная и управляющая система, которая автоматизирует оценку опыта и качества работы сварщиков, позволяя объективно распределять задания и улучшать процессы обучения. Ключевую роль в системе играют алгоритмы роевого интеллекта (алгоритмы пчел, муравьиной колонии и светлячков), которые обеспечивают оптимальный выбор учебных курсов и траекторий обучения сварщиков. Эти алгоритмы помогают рационализировать образовательные пути и выбирать наиболее подходящие курсы для каждого сварщика, что способствует минимизации времени обучения и повышению качества подготовки.

Алгоритмы эволюционного моделирования помогают эффективно распределять сварочные работы среди специалистов, основываясь на их производительности и качестве выполненных работ. Описаны этапы идентификации и измерения дефектов сварочных швов, оценки качества сварочных работ, прогнозирования дефектов и повышения эффективности управления обучением. Рассмотрены вопросы применения нейронных сетей для анализа дефектов сварных швов для улучшения точности оценки и автоматизации процессов контроля качества.

Практическая апробация была проведена в ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» и ООО «ИНВЕСТАП-МАИНД», что показало сокращение времени обучения на 20–30 % и аналогичное уменьшение количества дефектов сварных соединений. Эти результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и возможность его применения в промышленности для повышения качества сварочных работ и подготовки сварщиков.

Ключевые слова: обучение сварщиков, дефект сварного соединения, информационно-измерительная и управляющая система, нейронные сети



© Автор(ы), 2024

*Елена Владимировна Заровчатская, старший преподаватель кафедры «Программное обеспечение информационных технологий».

Антон Евгеньевич Мисник, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение информационных технологий».

Олег Егорович Аверченков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»

Введение

Сварочное производство представляет неотъемлемую часть машиностроительного комплекса, обеспечивая соединение металлических компонентов с высокой прочностью и надежностью. Сварка является одним из основных процессов при строительстве теплотрасс, нефте- и газопроводов. Большинство неразъемных соединений выполняются с помощью сварки. Качество сварочных работ зависит от опыта работы и квалификации сварщиков, распределения сварочных работ между исполнителями. Эффективность сварочного производства зависит от применения современных технологий сварки, обучения сварщиков новым технологиям и видам сварочных работ, соответствия квалификации сварщиков выполняемым видам работ, рационального распределения работ между исполнителями.

Организация процессов обучения сварщиков, оценка их опыта и качества выполнения работ, назначение сварщиков на работы непосредственно связаны с принятием управленческих решений [1–5]. Перечисленные задачи могут решаться различными способами. Однако большинство способов, основанных на применении опыта руководителей сварочных производств, связаны с субъективными оценками работ и не позволяют объективно оценить весь опыт работы и квалификацию сварщика из-за необходимости обработки большого количества данных обо всех работах и обучении сварщиков. Одним из наиболее перспективных подходов к решению задач повышения эффективности процессов обучения сварщиков, объективной и непредвзятой оценки их опыта и качества выполнения работ, распределения работ между сварщиками является создание информационно-измерительной и управляющей системы сварочного производства. Информационно-измерительный уровень системы на основе методов и средств визуально-измерительного (ВИК), рентгенографического (РК) и ультразвукового контроля (УЗК) с автоматизацией анализа каждого сварного шва обеспечит возможность объективной непредвзятой оценки опыта работы и результатов обучения каждого сварщика на основе автоматического анализа большого объема данных. Управляющий уровень системы предназначен для повышения эффективности процессов обучения сварщиков на основе алгоритмов речевого интеллекта и распределения работ между исполнителями на основе эволюционного моделирования [6–8].

Методика комплексного повышения эффективности информационно-измерительных и управляющих систем обучения сварщиков

Повышение эффективности обучения сварщиков и распределение заданий между ними предлагается реализовывать на основе разработанной авторами методики. Структурная схема работы информационно-измерительной и управляющей системы (ИИиУС) повышения эффективности управления обучением сварщиков представлена на рис. 1.

Предварительно в ИИиУС вносятся все необходимые сведения о сварщиках и результатах выполненных ими ранее работ. Для реализации повышения эффективности сварочного производства при выполнении новых заданий следует проходить по следующим этапам.

ЭТАП 1. Идентификация и измерение размеров дефектов сварочных швов каждого сварщика с занесением в ИИиУС.

Шаг 1.1. Идентификация и измерение дефектов сварочных швов в процессе ВИК.

Шаг 1.2. Проведение и анализ результатов РК с использованием сверточных нейронных сетей.

Шаг 1.3. Измерение и идентификация дефектов сварочных швов в процессе УЗК.

ЭТАП 2. Оценка качества сварочных швов каждого сварщика на основе результатов измерений.

Шаг 2.1. Анализ результатов ВИК на основании методик, представленных в нормативно-технической документации [9].

Шаг 2.2. Анализ результатов РК на основании методик, представленных в нормативно-технической документации [10].

Шаг 2.3. Анализ результатов УЗК на основании методик, представленных в нормативно-технической документации [11].

Шаг 2.4. Комплексная оценка качества сварочных швов.

ЭТАП 3. Оценка качества распределения сварочных работ руководителем на основе прогноза появления дефектов сварочных швов.

Шаг 3.1. Оценка количества и размеров дефектов сварочных швов, выполненных каждым сварщиком, в разрезе сварочных работ.

Шаг 3.2. Прогнозирование появления дефектов сварочных швов для каждого сварщика в разрезе запланированных работ.

Шаг 3.3. Оценка качества распределения сварочных работ на основании суммарного количества дефектов сварочных швов.

ЭТАП 4. Повышение эффективности управления распределением сварочных работ на основе эволюционного моделирования.

Шаг 4.1. Определение технологий сварки в соответствии с требованием заказчика.

Шаг 4.2. Определение оборудования и инструментов для сварки в соответствии с заданием заказчика.

Шаг 4.3. Отбор (селекция) сварщиков на основании эволюционного моделирования с учетом количества дефектов сварочных швов в предыдущих работах и требований, предъявляемых заказчиком.

Шаг 4.4. Сварщики, прошедшие отбор, могут приступать к выполнению поставленной задачи; не прошедшие отбор сварщики должны пройти обучение и повторную аттестацию.

ЭТАП 5. Повышение эффективности управления обучением сварщиков на основе алгоритмов роевого интеллекта.

Шаг 5.1. Оценка количества и размеров дефектов сварочных швов, выполненных каждым сварщиком, в соответствии с востребованными технологиями и видами работ.

Шаг 5.2. Ранжирование сварщиков по критерию минимизации количества дефектов сварочных соединений в ИИиУС.

Шаг 5.3. Выбор перспективной технологии сварочного производства, востребованной у заказчика.

Шаг 5.4.1. Составление списка всех обучающих курсов по востребованным технологиям на данный момент времени.

Шаг 5.4.2. Выборка из списка сварщиков, выступающих в роли «пчел-фуражистов», в алгоритме роевания пчел и прохождения обучения на всех курсах в ИИиУС.

Шаг 5.4.3. Ранжирование курсов на основании работы алгоритма роения пчел по критерию минимизации затраченного времени и наивысшим результатам обучения в ИИиУС.

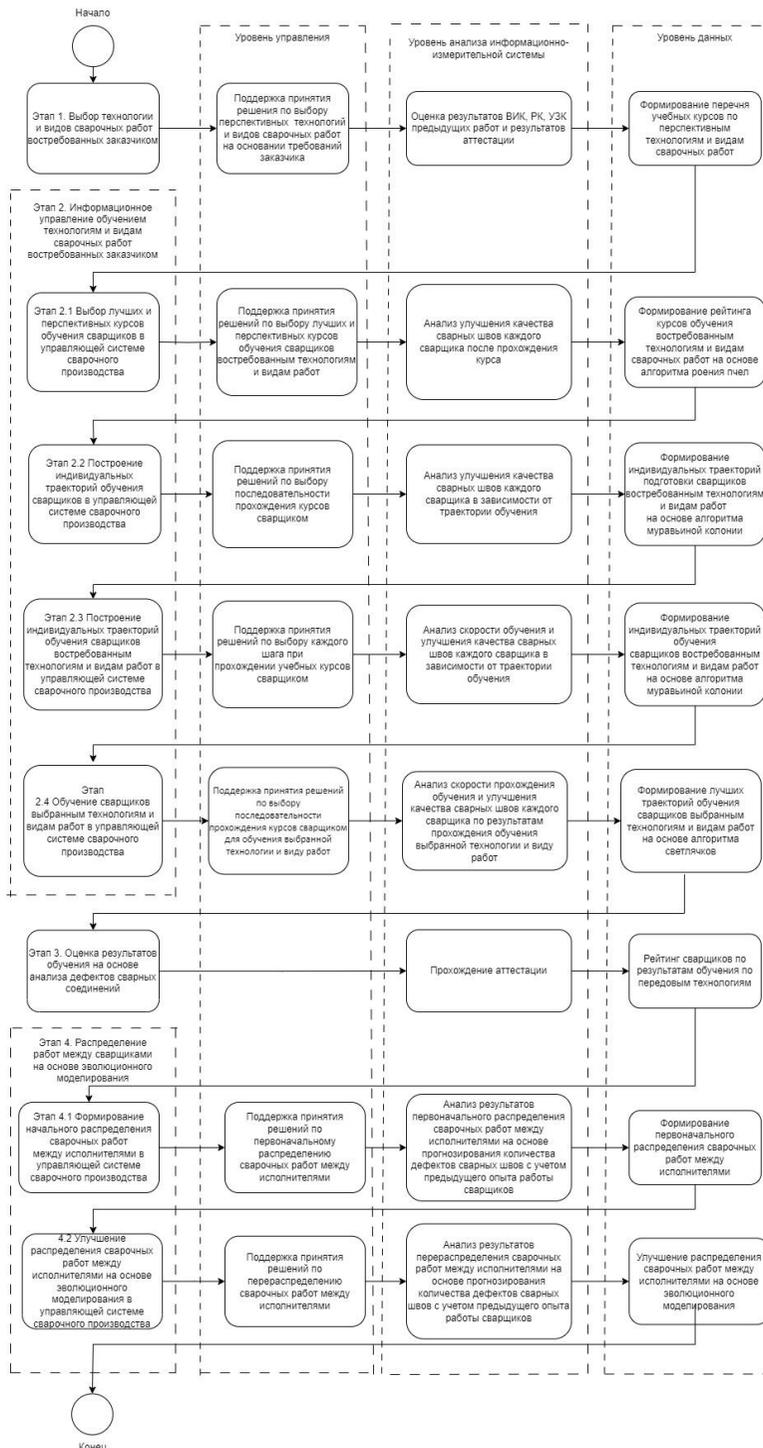


Рис. 1. Структурная схема методики повышения эффективности управления обучением сварщиков

Шаг 5.4.4. Выбор лучших и перспективных курсов.

Шаг 5.5. Построение траектории подготовки большого числа сварщиков по выбранным заказчиком технологиям на основе алгоритма муравьиной колонии.

Шаг 5.5.1. Последовательное прохождение сварщиками курсов с наивысшими рейтингами.

Шаг 5.5.2. Проведение аттестации сварщиков по результатам обучения с занесением данных в ИИиУС.

Шаг 5.5.3. Ранжирование сварщиков, прошедших обучение, для минимизации затраченного времени и снижения количества дефектов по сравнению с периодом до обучения.

Шаг 5.5.4. Формирование в ИИиУС на основе алгоритма муравьиной колонии рациональной последовательности прохождения курсов, позволяющей добиться нужного качества обучения сварщиков по запросу заказчика за минимально короткий срок.

Шаг 5.5.5. Распределение работ между сварщиками с более высоким рейтингом.

Шаг 5.6. Построение траектории подготовки сварщиков, ориентированных на обучение конкретным технологиям и видам сварочных работ на основе применения алгоритма светлячков.

Шаг 5.6.1. Формирование потребностей в видах сварочных работ.

Шаг 5.6.2. Выбор лучших и перспективных курсов по конкретной технологии.

Шаг 5.6.3. Обучение сварщика на курсах.

Шаг 5.6.4. Проведение аттестации сварщика по результатам обучения с занесением данных в ИИиУС.

Шаг 5.6.5. Ранжирование сварщиков после обучения в ИИиУС.

Шаг 5.6.6. Распределение на работу сварщика с более высоким рейтингом по конкретной технологии.

ЭТАП 6. Уточнение распределения сварочных работ после обучения сварщиков на основе эволюционного моделирования

Возврат на ЭТАП 4 с новыми исходными данными для ранжирования сварщиков.

Способ повышения эффективности управления обучением сварщиков на основе роевого интеллекта и эволюционного моделирования

При управлении компонентами ИИиУС перспективным является применение методов и технологий искусственного интеллекта [12, 13]. В частности, алгоритмы роевого интеллекта, которые описывают коллективное поведение множества, состоящего из отдельных самостоятельных элементов, взаимодействующих между собой и окружающей средой, могут эффективно применяться при обучении сварщиков [14–16]. На основе алгоритмов роевого интеллекта возможен рациональный выбор параметров процессов обучения, поиск лучших и наиболее перспективных курсов, построение индивидуальных траекторий обучения. Для рационального распределения работ между сварщиками перспективным является применение эволюционного моделирования.

Разработанный способ повышения эффективности управления сварочными производствами включает четыре этапа:

Этап 1. Выбор технологий и видов сварочных работ, которым необходимо обучить сварщиков.

Этап 2. Управление процессами обучения сварщиков с использованием алгоритмов роевого интеллекта в информационно-измерительной системе сварочного производства.

Этап 3. Анализ результатов работы сварщиков в информационно-измерительной системе сварочного производства.

Этап 4. Управление процессом распределения работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования.

Каждый этап содержит процессы на уровне анализа информационно-измерительных показателей, на уровне управления, на уровне оценки результатов.

Этап 1. Выбор технологии и видов сварочных работ, которым необходимо обучить сварщиков.

Цель обучения сварщиков востребованным технологиям сварочного производства – подготовка специалистов, владеющих современными технологиями сварки, которые необходимы предприятию.

Принятие решения по выбору технологии сварки исполнителями и руководителями сварочных работ осуществляется на основании следующей информации:

$$Tech = \langle VW_{Tech}, IW_{Tech}, QW_{Tech}, SW_{Tech}, DW_{Tech} \rangle, \quad (1)$$

где VW_{Tech} – вакансии сварщиков по технологии или виду сварочных работ на рынке труда, ед.; IW_{Tech} – внутренний спрос на сварщиков по технологии или виду сварочных работ на предприятии, ед.; QW_{Tech} – количество сварщиков, обучающихся в данный момент времени технологии сварки или виду сварочных работ, ед.; SW_{Tech} – траектория обучения сварщиков, изучающих технологию сварки или вид работ; DW_{Tech} – допустимые дефекты для технологии сварки или вида сварочных работ, ед.

В зависимости от выбранных технологий и видов сварочных работ осуществляется выбор множества сварщиков ($WELDER_x$), которых следует обучать новым технологиям и видам сварочных работ.

Оценка качества сварочных работ каждого конкретного i -го сварщика происходит в информационно-измерительной системе контроля сварочных работ на основании результатов ВИК, РК, УЗК выполненных ранее работ, которые сравниваются с востребованными технологиями и видами работ. Качество сварочных работ считается удовлетворительным, если выполняются следующие условия:

$$dw_{Gi} \leq dw_{Xi}, pww_{Gi} \leq pww_{Xi}, \quad (2)$$

где dw_{Gi} – множество дефектов сварных швов, допускаемых заказчиком, ед.; dw_{Xi} – множество дефектов сварных швов после обучения, ед.; pww_{Gi} – множество выполняемых сварочных работ, требуемых заказчиком, ед.; pww_{Xi} – множество выполняемых сварочных работ до обучения, ед.

Сварщики, для которых условия (2) выполняются, могут приступать к выполнению работ без обучения. Сварщики, для которых эти условия не выполняются, должны пройти обучение востребованным технологиям и видам работ. Анализ результатов ВИК, РК, УЗК выполняется средствами информационно-измерительной системы сварочного производства, компонентом которой является программный комплекс WELDINGTRAINING [17], обеспечивающий объективную непредвзятую оценку качества сварных швов в процессе обучения сварщиков.

Функция качества обучения каждого сварщика, позволяющая максимально удовлетворить требования заказчика, принимает вид

$$\left(1 - \sum_i \delta_i \cdot \left(\frac{pww_{Gi}}{\max(pww_{Gi})} - \frac{pww_{Yi}}{\max(pww_{Yi})} \right) + \sum_j \delta_j \cdot \left(\frac{dw_{Gj}}{\max(dw_{Gj})} - \frac{dw_{Yj}}{\max(dw_{Yj})} \right) \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $\delta_{i(j)}$ – значимость для заказчика i -й (j -й) характеристики сварщика; pww_{Yi} – множество выполняемых сварочных работ после обучения, ед.; dw_{Yi} – множество дефектов сварных швов после обучения, ед.

Целевая функция, минимизирующая число необученных сварщиков, может быть представлена в следующем виде:

$$|WELDER_X| - |WELDER_Y^f(P_{ASI})| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $WELDER_X$ – множество сварщиков до начала обучения; $WELDER_Y^f(P_{ASI})$ – множество сварщиков, успешно прошедших подготовку.

Этап 2. Управление процессами обучения сварщиков с использованием алгоритмов роевого интеллекта в информационно-измерительной системе.

На основании требований заказчика выбираются перспективные технологии, которым следует обучить все множество сварщиков. Функция качества выбора технологий и видов работ, которым необходимо обучить сварщика с учетом его предыдущего опыта работы:

$$\sum_i \delta_i \cdot (pww_{Gi} - pww_{Xi}) \rightarrow \min, \forall i: pww_{Xi} \leq pww_{Gi}. \quad (5)$$

Целевая функция для поддержки принятия решения по выбору технологий и видов сварочных работ, по которым следует проходить обучение:

$$T_i(pww_{Xi} - pww_{Gi}) \rightarrow \min, \forall i: pww_{Xi} \leq pww_{Gi}, \quad (6)$$

где T_i – время прохождения обучения на i -м курсе.

Для этого ограниченная по числу участников группа сварщиков проходит подготовку на всех имеющихся курсах. Функция качества процесса управления обучением сварщиков в зависимости от потребностей производства:

$$\sum_i \delta_i \cdot (pww_{Gi} - pww_{Yi}(P_{ASI})) \rightarrow \min, \forall i: pww_{Yi} \leq pww_{Gi}, \quad (7)$$

где P_{ASI} – множество параметров алгоритма роевого интеллекта.

Целевая функция в процессе управления обучением сварщиков:

$$T_i(pww_{Yi}(P_{ASI}) - pww_{Gi}) \rightarrow \min, \forall i: pww_{Yi} \leq pww_{Gi}. \quad (8)$$

На основании работы алгоритма роения пчел в системе обучения сварщиков происходит отбор лучших и перспективных курсов по технологиям и видам сварочных работ, востребованных производством, что обеспечивает повышение эффективности управления за счет сокращения времени на обучение сварщиков (рис. 2).

По результатам анализа проводится ранжирование существующих курсов обучения сварщиков. Курсы, на которые сварщики затратили наименьшее количество времени и получили наилучший результат, становятся приоритетными.

Пусть $\|kurs_{Yij}\|$ – матрица курсов для обучения i -му виду сварочных работ сварщика, востребованному заказчиком кадров. Тогда функция качества для отбора лучших и перспективных курсов $\|kurs_{Yij}f\|$ на основе алгоритма роения пчел:

$$\sum_i \delta_i \cdot \left(dw_{Gi} - dw_{Yi} \left(\|kurs_{Yij}\|, P_{BSA} \right) \right) \rightarrow \min, \forall i : dw_{Yi} \leq dw_{Gi}, \quad (9)$$

где P_{BSA} – множество параметров алгоритма роения пчел.

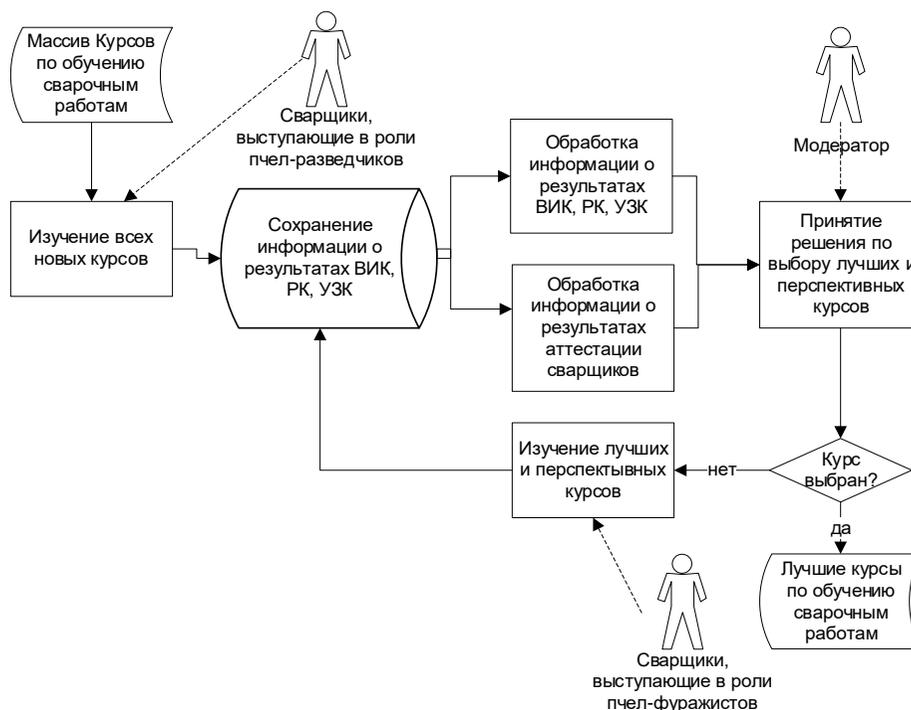


Рис. 2. Схема модифицированного алгоритма роения пчел для выбора учебных курсов

Целевая функция обеспечивает сокращение времени на обучение сварщиков за счет отбора лучших и перспективных курсов на основе алгоритма роения пчел:

$$T_i \left(dw_{Yi} \left(\|kurs_{Yij}^f\|, P_{BSA} \right) - dw_{Gi} \right) \rightarrow \min, \forall i : dw_{Yi} \leq dw_{Gi}. \quad (10)$$

С целью отбора курсов сварщики, выступающие в представленном алгоритме в роли «пчел-разведчиков», проходят все имеющиеся по данному виду сварочных работ курсы. После обработки информации о результатах работы сварщиков, прошедших все курсы, в информационно-измерительной системе выполняется анализ дефектов сварных швов, выполненных каждым сварщиком, на основании ВИК, РК, УЗК. Результаты анализа используются для поддержки принятия решений о выборе лучших и перспективных курсов. С целью построения рейтинга отобранных на первом этапе курсов к их изучению приступают сварщики, выполняющие в представленном алгоритме роль «пчел-фуражистов». Принятие решения о выборе лучшего и перспективного курса происходит на основании построенного рейтинга курсов, прохождения которых позволит всем оставшимся сварщикам за минимальное время освоить востребованные технологии и виды сварочных работ и снизить количество дефектов в своей работе.

Для построения траекторий подготовки максимального количества специалистов по запросу заказчика за минимально короткие сроки используется алгоритм муравьиной колонии [19–22] (рис. 3).

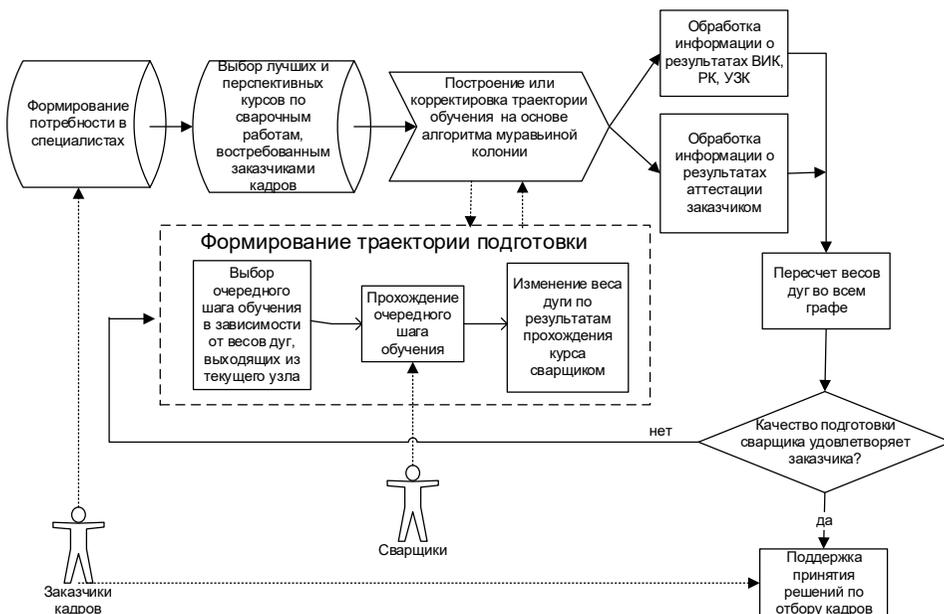


Рис. 3. Схема модифицированного алгоритма муравьиной колонии по формированию траекторий подготовки сварщика

Пусть $\|Tr_{Y_{jk}}\|_i$ – матрица переходов между курсами для обучения сварщика i -му виду работ, востребованному заказчиком кадрами. Тогда функция качества для построения рациональной траектории подготовки сварщиков $\|Tr_{Y_{jk}}^f\|_i$ на основе алгоритма муравьиной колонии примет вид

$$\sum_i \delta_i \cdot (dw_{Gi} - dw_{Yi}(\|Tr_{Y_{jk}}\|, P_{ACA})) \rightarrow \min, \forall i: dw_{Yi} \leq dw_{Gi}, \quad (11)$$

где P_{ACA} – множество параметров алгоритма колонии муравьев.

Целевая функция, обеспечивающая сокращение времени на обучение сварщика за счет отбора лучших траекторий подготовки на основе алгоритма муравьиной колонии, может быть записана как

$$T_i(dw_{Yi}(\|Tr_{Y_{jk}}^f\|, P_{ACA}) \rightarrow dw_{Gi}) \rightarrow \min, \forall i: dw_{Yi} \leq dw_{Gi}. \quad (12)$$

Сварщики последовательно выбирают курсы из предложенного перечня. По итогам изучения курса сварщики проходят аттестацию, результаты которой отражаются в информационно-измерительной системе сварочного производства средствами программного комплекса WELDINGTRAINING [14]. Последовательность прохождения курсов сварщиками запоминается и сохраняется. Чем меньше количество дефектов сварных швов, зафиксированных в ИИУС с использованием ВИК, РК, УЗК после изучения курса, тем сильнее стремление сварщиков, не прошедших обучение, повысить свою квалификацию для максимального соответствия требованиям заказчика. Траектории обучения сварщиков, закончивших изучение всех курсов по выбранной технологии или виду работ за наименьшее

время, быстро становятся самыми заметными, привлекая внимание наибольшего числа сварщиков. Менее используемые траектории обучения постепенно пропадают.

Результатом работы алгоритма муравьиной колонии является определение рациональной последовательности прохождения курсов, позволяющей добиться нужного качества обучения сварщиков по запросу заказчика за минимально короткий срок.

Для построения траектории подготовки сварщиков, ориентированных на обучение конкретным технологиям и видам сварочных работ, используется алгоритм светлячков [18] (рис. 4).



Рис. 4. Схема модифицированного алгоритма светлячков по формированию траекторий подготовки

Пусть $\|Tr_{Y_{jk}}^f\|_i$ – матрица переходов между курсами для обучения, выбранного в алгоритме в качестве «светлячка», i -й работе. Функция качества подготовки сварщиков путем построения траектории на основе алгоритма светлячков имеет вид

$$\sum_i \left| pww_{Y_i} \left(\|Tr_{Y_{jk}}\|_i, P_{FFA} \right) - pww_{Y_i} \left(\|Tr_{Y_{jk}}^f\|_i \right) \right| \rightarrow \min, \quad (13)$$

где P_{FFA} – множество параметров алгоритма светлячков.

Целевая функция, обеспечивающая сокращение времени на обучение сварщика работам, соответствующим требованиям заказчика, может быть записана на основе алгоритма светлячков в следующем виде:

$$T_i \left(pww_{Y_i} \left(\|Tr_{Y_{jk}}\|_i, P_{FFA} \right) \rightarrow pww_{Y_i} \left(\|Tr_{Y_{jk}}^f\|_i \right) \right) \rightarrow \min. \quad (14)$$

Этап 3. Анализ результатов работы сварщиков в информационно-измерительной системе.

В процессе работы сварщиков осуществляется постоянный контроль качества сварных швов с помощью методов визуального, рентгенографического и ультразвукового контроля (ВИК, РК, УЗК), при этом контролю подлежит каждое сварное соединение по всей его длине (периметру). Результаты всех видов контроля сохраняются в программном комплексе EfficientWelders, являющемся

компонентом информационно-измерительной системы сварочного производства. ВИК проводят для выявления внешних дефектов сварных швов. Визуальный контроль выполняется с двух сторон невооруженным глазом или с применением лупы, измерительный контроль проводят не менее чем в четырех местах, расположенных равномерно по длине сварного шва. Согласно инструкции по визуальному и измерительному контролю [23], ВИК проводят с целью обнаружения выходящих на поверхность трещин, вогнутостей, непроваров, прожогов, наплывов, расслоений, закатов, забоин (вмятин), раковин, шлаковых включений и других дефектов.

После удовлетворительного прохождения ВИК приступают к РК и УЗК для выявления внутренних дефектов. При проведении РК получают рентгеновский снимок на пленке или фотобумаге, где отображено внутреннее состояние сварного соединения. Этим методом определяют поры, шлаковые включения, металлические включения, подрезы, прожоги, картеры. Снимки, полученные в результате РК, распознаются сверточной нейросетью, что позволяет определить вид дефекта и его размеры. Для распознавания дефектов на рентгеновских снимках сварных соединений нейросеть обучается различными методами, в том числе новым методом «переключения задач» в условиях ограниченной доступности данных. Подход к обучению нейронной сети на основе «переключения задач» объединяет небольшое рецептивное поле модели yolov5-s с аугментацией и transfer learning, преодолевая недостаток данных за счет легкой архитектуры и уменьшения дисбаланса данных. Переход к обнаружению дефектов, объединяющий тщательную аугментацию набора данных и настроенную на предварительную обработку, значительно повысил точность модели.

Данные о результатах работы каждого сварщика заносятся в ИИиУС с помощью программного комплекса EfficientWelders. По результатам контроля в реальном времени осуществляется анализ результатов работы каждого сварщика и обновляется рейтинг сварщиков. По результатам анализа результатов работы формируются списки сварщиков, которых необходимо направить на аттестацию или обучение. Результаты анализа работы сварщиков являются исходными данными для распределения сварочных работ между исполнителями.

Этап 4. Управление процессом распределения работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования.

Управление процессом распределения работ между сварщиками в управляющей подсистеме сварочного производства осуществляется на основе анализа результатов обучения и постоянного контроля качества работы сварщиков в информационно-измерительной подсистеме, времени перемещений сварщиков между объектами работ. При распределении работ между сварщиками с использованием алгоритмов эволюционного моделирования [24] применяются методы и средства визуального, рентгенографического и ультразвукового контроля качества сварных швов.

Структурная схема процесса распределения работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования представлена на рис. 5. Для решения задач распределения работ между сварщиками разработаны алгоритмы повышения эффективности управления на основе эволюционного моделирования, обеспечивающие возможность реализации основных принципов и особенностей предложенной концепции.

Задача распределения работ между сварщиками характеризуется множеством работ, которые нужно выполнить (*Tasks*), множеством сварщиков

Welders. Каждая работа $Task = \langle Priority, Tech_{Task}, Complexity_{Task}, P_{DW} \rangle$ характеризуется приоритетом ($Priority$), используемыми технологиями и инструментами ($Tech_{Task}$), сложностью ($Complexity_{Task}$), вероятностью появления дефектов сварных швов (P_{DW}).

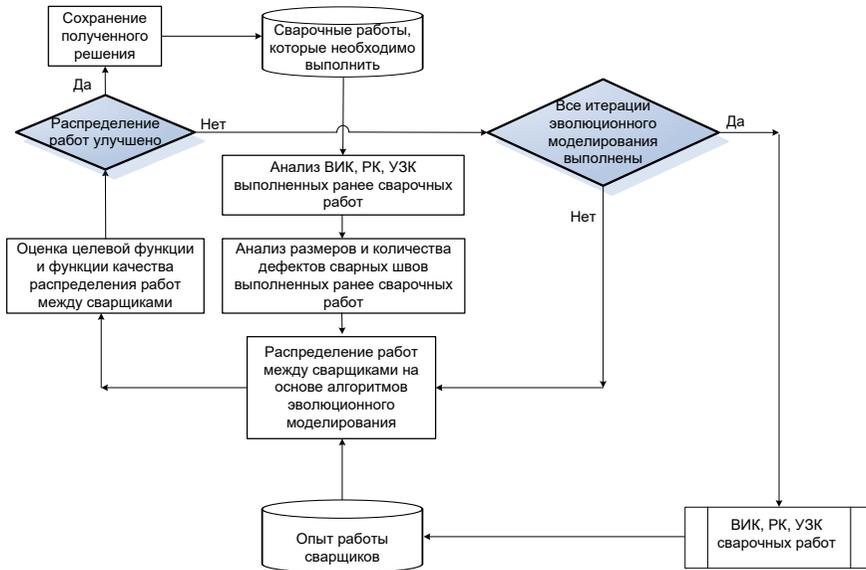


Рис. 5. Структурная схема процесса распределения работ между сварщиками

Функция качества решения проектных задач:

$$P_{DW} = \sum_i \sum_j P_{DW_{ij}} \rightarrow \min, \quad (15)$$

где $P_{DW_{ij}}$ – вероятность появления дефекта при выполнении i -й работы j -м сварщиком, рассчитывается на основании результатов предыдущих работ как отношение количества работ сварщика с недопустимыми дефектами к общему количеству работ сварщика.

Целевая функция задачи повышения эффективности управления распределением работ между сварщиками, используемая в алгоритме эволюционного моделирования:

$$T_{WW} = EvModel(Tasks, Welders) \rightarrow \min, \quad (16)$$

где T_{WW} – время выполнения сварочных работ, ч.,

Данная целевая функция позволяет подобрать значения параметров распределения сварочных работ, обеспечивающих снижение времени выполнения работ.

Апробация методики повышения эффективности управления обучением сварщиков

Для определения работоспособности и эффективности применения программного комплекса WELDINGTRAINING при управлении подготовкой сварщиков и программного комплекса EfficientWelders для управления работой сварщиков выполнены испытания на базе инженерно-технического центра ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ», г. Минск, Республика Беларусь.

В процессе проведения испытаний программного комплекса WELDINGTRAINING осуществлялось добавление заданий в программу для выполне-

ния сварщиками, после чего осуществлялось заполнение форм оценки результатов выполнения заданий каждым сварщиком с использованием Web-страниц. После заполнения данных автоматически генерировались протоколы в программном комплексе WELDINGTRAINING (рис. 6).

		Анализ результатов проведения сварочных работ																												
Номинация	Количество сварщиков	Количество выявленных дефектов при визуальном-измерительном контроле																RT	Радиографический контроль		ММ	Механические испытания (для арматуры)						количество модульных дефектов	количество модульных дефектов на сварной шов	количество модульных дефектов на 100мм сварного шва
		используемая проволока и расходная проволока	подварки	уплотнение	превышение провала	превышение значения ширины шва	превышение значения выкатки шва	превышение значения катодной защиты шва	использованы ли швы с основным металлом	швы, шпаны	соединения	швы заварены		швы заварены	швы заварены		швы заварены	швы заварены	швы заварены	швы заварены	швы заварены	швы заварены								
MIG/MAG (135)	7	5	7	5	3	3	3	4	0	2	3	2	3	6	6	0	5	X	X	X	X	X	X	X	40	5,714286	3,192308			
TIG (141)	7	2	0	2	1	1	5	3	1	3	4	0	3	3	1	2	1	X	X	X	X	X	X	25	3,571428	1,995211				
MMA (111) (Група)	7	0	0	3	1	1	4	1	1	0	2	3	5	7	7	0	1	X	X	X	X	X	X	21	3	1,679798				
MMA (111) (Арматура)	7	0	0	5	0	0	4	0	0	3	4	1	3	X	X	X	4	0	0	0	0	1	3	20	2,857143	1,596108				
Итого	28	7	7	15	5	5	16	8	2	5	9	6	14	16	14	2	7	4	0	0	0	1	3							

Рис. 6. Протокол итоговой оценки: общая статистика

Формируемые автоматически протоколы итоговых оценок позволили проанализировать количество и частоту появления дефектов сварных соединений у каждого сварщика. Далее при помощи алгоритмов речевого интеллекта осуществлялось управление процессом подготовки каждого сварщика в зависимости от требований заказчика и перспективности технологий сварочных работ. Полученная информация обеспечила сокращение времени обучения сварщиков за счет автоматизации объективной и непредвзятой оценки работы сварщиков членами аттестационных и конкурсных комиссий, автоматизированного анализа и определения ошибок сварщиков, приводящих к образованию дефектов сварных соединений.

Аналогичным образом проводились испытания программного комплекса EFFICIENTWELDERS. В программу добавлялись сварщики и задания, необходимые для выполнения. По результатам выполнения заданий и проведения дефектоскопии заполнялись протоколы ВИК, РК, УЗК.

На основании полученных данных автоматически генерировались списки сварщиков, у которых процент брака в выполненных по заданию сварных соединениях, превышает 10 % или находится в диапазонах 5–10 % или 1–5 %. Данные списки предназначены для эффективного распределения заданий между сварщиками, определения лиц для прохождения переаттестации или обучения с использованием методов эволюционного моделирования.

Выводы

1. Способ и методика комплексного повышения эффективности обучения сварщиков и распределения работ между ними обеспечивают возможность создания автоматизированных информационно-измерительных и управляющих систем сварочных производств. Повышение эффективности управления сварочными производствами достигается за счет улучшения качества и сокращения времени обучения сварщиков перспективным технологиям и видам работ путем использования алгоритмов речевого интеллекта, сокращения количества дефектов

сварных швов в результате улучшения распределения сварочных работ между исполнителями с применением эволюционного моделирования.

2. Создание программного комплекса WELDINGTRAINING для обучения сварщиков и программного комплекса EfficientWelders для повышения эффективности управления работой сварщиков позволило автоматизировать основные этапы разработанного способа. Испытание программного комплекса WELDINGTRAINING и программного комплекса EfficientWelders в ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» дало возможность обосновать эффективность применения и автоматизации разработанного способа в производственных условиях, что подтверждается актом производственных испытаний.

3. На основании результатов экспериментальных исследований установлено сокращение времени подготовки сварщиков при использовании программного комплекса WELDINGTRAINING за счет автоматизации обработки информации о результатах ВИК, РК, УЗК, объективной и непредвзятой оценки работы сварщиков в информационно-измерительных системах сварочных производств. Применение программного комплекса WELDINGTRAINING позволяет уменьшить время обучения сварщиков на 20–30 %, что подтверждено актом внедрения в ООО «ИНВЕСТАП-МАИНД».

4. На основании результатов экспериментальных исследований установлено сокращение количества дефектов сварных соединений при использовании программного комплекса EfficientWelders за счет автоматизации обработки и анализа информации о результатах ВИК, РК, УЗК для каждого сварщика в информационно-измерительных системах сварочных производств. Применение программного комплекса EfficientWelders позволяет уменьшить количество дефектов сварных соединений на 20–30 %, что подтверждено актом внедрения в ООО «ИНВЕСТАП-МАИНД».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Марьина И.С., Файрушин А.М., Мардаганиев М.Р.* Повышение эффективности системы мотивации персонала сварочного производства // Сварка и контроль. Сборник статей. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2022. С. 125–128.
2. *Федоров В.К.* Управление трудовыми ресурсами в инновационных процессах. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2022. 208 с.
3. *Краснопевцева И.В., Краснопевцев А.Ю.* Применение информационных технологий в управлении производительностью труда рабочих промышленных предприятий // Вестник НГИЭИ. 2020. № 2(105). С. 90–99.
4. *Шумейко И.А., Жанбулатова Д.М.* Мероприятия по организации обучения сварочному производству // Наука и техника Казахстана. 2021. № 1. С. 39–48.
5. *Кривоносова Ю.В., Макаров Г.Н.* Управление рисками процесса организации и проведения работ по аттестации сварщиков в соответствии с требованиями ГОСТ р ИСО 9001 – 2015 // Новая наука: Современное состояние и пути развития. 2016. № 10–2. С. 191–194.
6. *Вахнин А.В., Сопов Е.А.* Исследование параметров эволюционного алгоритма для задач параметрической оптимизации функций большой размерности // Решетневские чтения. 2018. Т. 2. С. 252–254.
7. *Вайнилович Ю.В.* Повышение эффективности управления организационными процессами IT-проектов на основе эволюционного моделирования: специальность 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2022. 169 с.
8. *Янукович С.П., Борисов В.В., Захарченков К.В.* Концепция повышения эффективности управления образовательными системами на основе адаптивных алгоритмов роевого интеллекта // Информационные технологии. 2020. Т. 26. № 12. С. 706–716.
9. ГОСТ Р ИСО 1763-2014 Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением: национальный стандарт Российской Федерации: из-

- дание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 сентября 2014 г. № 1241-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 21 с.
10. ГОСТ Р ИСО 7512-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 декабря 1982 г. № 4923. М.: Стандартинформ, 2019. 27 с.
 11. ГОСТ Р 55724-2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 08 ноября 2013 г. № 1410-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 21 с.
 12. *Болотов С.В., Захарченков К.В., Фурманов В.А.* Концепция создания информационных систем автоматического контроля работы сварщиков // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022: Сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции. Коломна. 2022. С. 257–268.
 13. Технология повышения эффективности контроля сварочных процессов в интеллектуальной системе Weldingcontrol / *С.В. Болотов, К.В. Захарченков, Е.В. Макаров, В.А. Фурманов* // Энергетика, информатика, инновации – 2021: Сборник трудов XI Международной научно-технической конференции. Смоленск, 2021. С. 227–229.
 14. Метод управления процессом обучения промышленному программированию на основе алгоритмов роевого интеллекта / *В.В. Борисов, С.П. Янукович, К.В. Захарченков, Ю.В. Вайншлович* // Cloud of Science. 2020. Т. 7. № 1. С. 189–206.
 15. *Матренин П.В.* Разработка адаптивных алгоритмов роевого интеллекта в проектировании и управлении техническими системами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Новосибирск, 2018. 197 с.
 16. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005. 110 p.
 17. Программа управления подготовкой сварщиков WELDINGTRAINING: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023613932 / *М.А. Юденков, Р.А. Агаев, К.В. Захарченков, А.Д. Еремеев, А.В. Лупачев, А.Г. Кротова.* Заявка № 2022682667, дата поступления 23.11.2022, дата регистрации 21.02.2023.
 18. *Yang X.S.* Firefly algorithms for multimodal optimization // In proceedings of the 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications. 2009. Pp. 169–178.
 19. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.М.* Однородная распределительная задача на основе моделей адаптивного поведения муравьиной колонии // Программные продукты и системы. 2017. № 2. С. 217–226.
 20. *Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A.* The Ant System: Optimization by a colony of cooperating objects // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1996. Part B. N. 26(1). Pp. 29–41.
 21. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization / IEEE Computational Intelligence Magazine 2006 Vol. 1. Is 4. Pp. 28–39.
 22. Using Ant Colony Optimised Algorithms for Shortest Path Exploration by Robots / *A. Singh, S. Dhawan, J. Verma, G. Singh, A. Kaur* // IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI). 2024. Vol. 2. Pp. 1–4.
 23. Инструкция по визуальному и измерительному контролю: РД 03-606-03 / [Принимали участие: В.С. Котельников и др.]. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003 (Липецк: Тип. ГУП Липец. изд-во). 101 с.
 24. *Kita E. (ed.).* Evolutionary Algorithms. InTech. 2011. 596 p.

Статья поступила в редакцию 25 января 2024 г.

METHOD FOR COMPLEX INCREASE OF WELDING PRODUCTION CONTROL EFFICIENCY BASED ON SWARM INTELLIGENCE ALGORITHMS AND EVOLUTIONARY MODELING*

*E.V. Zarovchatskaya*¹, *A.E. Misnik*¹, *O.E. Averchenkov*²

¹Interstate educational institution of higher education
“Belarusian-Russian University”
43, Mira Avenue, Mogilev, 212000, Republic of Belarus

²Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education “National Research University “MPEI” in Smolensk
building 1, Energetichesky proezd, Smolensk, 214013, Russian Federation

E-mail: 2415719@gmail.com, anton@misnik.by, aver22@rambler.ru

Abstract. *The article presents comprehensive methods for enhancing the efficiency of welder training management through the implementation of swarm intelligence algorithms and evolutionary modeling. It introduces an information-measurement system that automates the evaluation of welders' experience and work quality, facilitating objective task allocation and the improvement of training processes. Central to this system are swarm intelligence algorithms – specifically, bee algorithms, ant colony algorithms, and firefly algorithms – which optimize the selection of training courses and learning trajectories for welders. These algorithms streamline educational pathways and identify the most suitable courses for each welder, thus reducing training time and enhancing the quality of training.*

Evolutionary modeling algorithms assist in the efficient allocation of welding tasks among specialists based on their performance and work quality. The article details the processes involved in identifying and measuring weld defects, assessing weld quality, predicting defects, and improving training management efficiency. It also discusses the application of neural networks for weld defect analysis, which enhances assessment accuracy and automates quality control processes.

Practical testing was conducted at OAO “BELGAZSTROY” and OOO “INVESTAP-MAIND,” demonstrating a 20–30 % reduction in training time and a corresponding decrease in the number of weld defects. These results validate the effectiveness of the proposed approach and highlight its potential for improving welding work quality and welder training in industrial settings.

Keywords: *welder training, weld joint defect, information and measurement system, neural networks*

REFERENCES

1. *Mar'ina I.S., Fajrushin A.M., Mardaganiev M.R. Povyshenie effektivnosti sistemy motivatsii personala svarochnogo proizvodstva [Increasing the efficiency of the welding personnel motivation system] // Svarka i kontrol': Sbornik statej. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj neftyanoj tehnikeskij universitet. 2022. Pp. 125–128. (In Russian).*
2. *Fedorov V.K. Upravlenie trudovymi resursami v innovacionnyh processah [Workforce management in innovative processes]. M.: RIOR : INFRA-M. 2022. 208 p. (In Russian).*
3. *Krasnopevceva I.V., Krasnopevcev A.Yu. Primenenie informacionnyh tekhnologij v upravlenii proizvoditel'nost'yu truda rabochih promyshlennyh predpriyatij [Application of information*



© The Author(s), 2024

* *Elena V. Zarovchatskaya, Senior Lecturer.*
Anton E. Misnik, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.
Oleg E. Averchenkov, (PhD. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

- technologies in the management of labor productivity of industrial workers] // Vestnik NGIEL. 2020. № 2(105). Pp. 90–99. (In Russian).
4. *Shumejko I.A., Zhanbulatova D.M.* Meropriyatiya po organizacii obucheniya svarochnomu proizvodstvu [Welding training arrangements] // Nauka i tehnika Kazahstana. 2021. № 1. Pp. 39–48. (In Russian).
 5. *Krivososova Yu.V., Makarov G.N.* Upravlenie riskami processa organizacii i provedeniya rabot po attestacii svarshchikov v sootvetstvii s trebovaniyami GOST r ISO 9001 – 2015 [Risk management of the process of organization and performance of works on certification of welders in accordance with the requirements of GOST R ISO 9001 – 2015] // Novaya nauka: Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya. 2016. № 10–2. Pp. 191–194. (In Russian).
 6. *Vahnin A. V., Sopov E. A.* Issledovanie parametrov evolyucionnogo algoritma dlya zadach parametricheskoy optimizacii funkcij bol'shoj razmernosti [Investigation of evolutionary algorithm parameters for parametric optimization problems of high-dimensional functions] // Reshetnevskie chteniya. 2018. Vol. 2. Pp. 252–254. (In Russian).
 7. *Vainilovich Yu. V.* Povyshenie effektivnosti upravleniya organizacionnymi processami IT-proektov na osnove evolyucionnogo modelirovaniya [Improving the efficiency of management of organizational processes of IT projects based on evolutionary modeling]: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": dissertation for the degree of candidate of technical sciences, 2022. 169 p. (In Russian).
 8. *Yanukovykh S.P., Borisov V.V., Zakharchenkov K.V.* Konceptiya povysheniya effektivnosti upravleniya obrazovatel'nymi sistemami na osnove adaptivnykh algoritmov roevogo intellekta [Concept of increasing the efficiency of management of educational systems based on adaptive algorithms of swarm intelligence] // Information technologies. 2020. Vol. 26. No 12. Pp. 706–716. (In Russian).
 9. GOST R ISO 1763-2014 Kontrol' nerazrushayushchij. Vizual'nyj kontrol' soedinenij, vypolnennykh svarkoj plavlaniem: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 30 sentyabrya 2014 g. № 1241-st. [Visual inspection of joints made by fusion welding: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1241-st dated September 30, 2014]. M.: Standartinform, 2015. 21 p. (In Russian).
 10. GOST R ISO 7512-82 Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Radiograficheskij metod: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe: utverzhden i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 20 dekabrya 1982 g. № 4923 [Radiographic method: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Decree of the USSR State Committee for Standards of December 20, 1982. No. 4923]. M.: Standartinform, 2019. 27 p. (In Russian).
 11. GOST R 55724-2013 Kontrol' nerazrushayushchij. Soedineniya svarnye. Metody ul'trazvukovye: nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficial'noe : utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 08 noyabrya 2013 g. № 1410-st [Ultrasonic methods: national standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1410-st dated November 08, 2013]. M.: Standartinform, 2015. 21 p. (In Russian).
 12. *Bolotov S.V., Zakharchenkov K.V., Furmanov V.A.* [etc.] Konceptiya sozdaniya informacionnykh sistem avtomaticheskogo kontrolya raboty svarshchikov [The concept of creating information systems for automatic control of welders work] // Integrirovannyye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte IMM-2022, Kolomna, 2022. Pp. 257–268. (In Russian).
 13. Tekhnologiya povysheniya effektivnosti kontrolya svarochnykh processov v intellektual'noj sisteme weldingcontrol [Technology for increasing the efficiency of control of welding processes in the intelligent system weldingcontrol] / *S.V. Bolotov, K.V. Zakharchenkov, E.V. Makarov, V.A. Furmanov* // Energetika, informatika, innovacii – 2021. Smolensk, 2021. Pp. 227–229. (In Russian)
 14. Metod upravleniya processom obucheniya promyshlennomu programirovaniyu na osnove algoritmov roevogo intellekta [A method for managing the process of teaching industrial programming based on swarm intelligence algorithms] / *V.V. Borisov, S.P. Yanukovykh, K.V. Zakharchenkov, Yu.V. Vainilovich* // Cloud of Science. 2020. Vol. 7. No 1. Pp. 189–206. (In Russian).

15. *Matrenin P.V.* Razrabotka adaptivnyh algoritmov roevogo intellekta v proektirovanii I upravlenii tehnikeskimi sistemami [Development of adaptive algorithms for swarm intelligence in the design and management of technical systems]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.01: Novosibirsk Publ 2018. 197 p. (In Russian).
16. *Karaboga D.* An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005. 110 p.
17. Programma upravleniya podgotovkoj svarshchikov WELDINGTRAINING: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM №2023613932 [WELDINGTRAINING welder training management program: certificate of state registration of the computer program №2023613932] / *Yudenkov M.A., Agaev R.A., Zaharchenkov K.V., Eremeev A.D., Lupachev A.V., Krotova A.G.* Application No. 2022682667, date of receipt 11/23/2022, registration date 02/21/2023. (In Russian).
18. *Yang X.S.* Firefly algorithms for multimodal optimization // In proceedings of the 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications. 2009. Pp. 169–178.
19. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.M.* Odnorodnaya raspredelitel'naya zadacha na osnove modelej adaptivnogo povedeniya murav'inoj kolonii [Homogeneous distribution problem based on models of adaptive behavior of an ant colony] // Software products and systems 2017. № 2. Pp. 217–226. (In Russian).
20. *Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A.* The Ant System: Optimization by a colony of cooperating objects // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. 1996. Part B. N. 26(1). Pp. 29–41.
21. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization / IEEE Computational Intelligence Magazine 2006 Vol. 1. Is 4. Pp. 28–39.
22. Using Ant Colony Optimised Algorithms for Shortest Path Exploration by Robots / *A. Singh, S. Dhawan, J. Verma, G. Singh, A. Kaur* // IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI). 2024. Vol. 2. Pp. 1–4.
23. Instrukciya po vizual'nomu i izmeritel'nomu kontrolyu: RD 03-606-03 [Instructions for visual and measuring control: RD 03-606-03] // [Participated in: V.S. Kotelnikov and others]. M.: Scientific and technical. Center for Industrial Safety of Gosgortekhnadzor of Russia, 2003 (Lipetsk: Type. State Unitary Enterprise Lipetsk Publishing House). 101 p. (In Russian).
24. *Kita E. (ed.)* Evolutionary Algorithms. InTech. 2011. 596 p.

Original article submitted 25.01.2024

УДК 005.94

**INTERSUBJECTIVE MANAGEMENT THEORY:
DECISION SUPPORT SYSTEM CREATION******T.V. Moiseeva***

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute for the Control of Complex Systems RAS
Sadovaya, 61, Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: mtv-2002@yandex.ru

Abstract. *A lot of problem situations arise in our everyday life, that worsen quality of life, reduce labor productivity. Modern science does not have decision-making technologies in problem situations under conditions of uncertainty, when the subjects themselves need to decide what to do, and not how to do it. The only theory that proposes actors a new approach to managing the problem situations solving is the theory of intersubjective management, proposed at the beginning of the XXI century. The fundamental difference between intersubjective management and classical one is that management functions are assigned to people themselves, immersed in a problem situation and actively acting (actors). In the process of decision making in a problem situation actors need methodological and informational support. For this purpose, a decision support system is developed that uses methods and tools of slightly formalized subject areas. When choosing models, methods and tools that support actors in the process of problem situation solving, the features of the group decision-making process in intersubjective management are taken into account. The choice of methods for application by actors is also influenced by the subjective component, i. e. their personal characteristics and preferences, knowledge, and skills. Decision support system design is based on the Nonaka-Takeuchi knowledge management model.*

Keywords: *problem situation, intersubjective management, decision making, decision support system*

Introduction

Among modern tools that can assist in solving semi-structured problems and provide support to decision-makers in weakly formalized subject areas, a special place is occupied by interactive computer systems and decision support systems (DSS). Functioning of the DSS is aimed as "helping decision-makers by providing access to communication technologies, data, documents, knowledge and / or models in order to identify, solve problems and make decisions" [1]. The use of DSS for solving semi-structured problems, providing data, knowledge, objective and subjective models for their analysis and solution has particular importance [2, 3]. The problem situations, in which the actors in the socio-technical object find themselves, belong precisely to this category. In the process of solving a problem situation with uncertainty, heterogeneous



© The Author(s), 2024

* *Tatyana V. Moiseeva, Dr. Techn., Leading Researcher at the Laboratory of Analysis and Modeling of Complex Systems.*

actors really must solve many incompletely defined problems, which are problems in an open form, with incompleteness, redundancy and ambiguity.

Therefore, for informational support of actors who jointly solve problem situations in conditions of uncertainty and incompleteness of the initial data it is proposed to develop a DSS because of the absence of an analytical model of the problem being solved, and the use of information of a qualitative, declarative nature.

1. The process of problem situation solving

A group of actors with various visions of the problem and different personal and value characteristics usually participates in making a decision on solving a problem situation.

The basic concept which is proposed to use in problem situations for solving them is the theory of intersubjective management [4-7]. As it was mentioned by the author of the theory V. Vittikh, "the stake is made on non-violent means of decision-making oriented towards attainment of mutual understanding and consensus of heterogeneous actors who are in a problem situation and aimed to settle it." [4] The Vittikh's theory is applicable when:

- there is a group of active people (actors) bound by a common problem situation;
- they find themselves in problem situation, which couldn't be solved individually by each actor;
- they realize the situation differently;
- they recognize simultaneously the necessity to control the situation by means of coordinated actions;
- they are ready to discuss the situation, demonstrate their point of views, accept each other opinions;
- the way of making a decision as consensus is accepted [8].

An agreement how the problem situation could be solved may be achieved in the group of heterogeneous actors [9]. This group possesses certain subjective knowledge which is true for a restricted circle of actors. So, actors' intersubjective mind and intersubjective knowledge gave the name to the theory.

The problem situation model is revealed in [10].

To describe the intersubjective decision-making process by actors, which should be supported by the DSS, and to study the parameters and characteristics of the decision support systems of solving the problem situations by actors, we will make decomposition of the process of solving a problem situation in a socio-technical object (Fig. 1). It can be used to describe the decision-making processes by actors in the socio-technical objects. Structured presentation of system functions and analysis of system requirements, as well as formalization of processes is required.

The details of the problem situation settlement process and its formalized description are presented in Fig. 1. The top-level process in the problem being solved is the resolution of the problem situation. The decomposition considers such second-level processes as:

- "Awareness of problem situation",
- "Search for like-minded people",
- "Self-organization into the community",
- "Discourse management",
- "Building an ontological model of problem situation",
- "Decision-making".

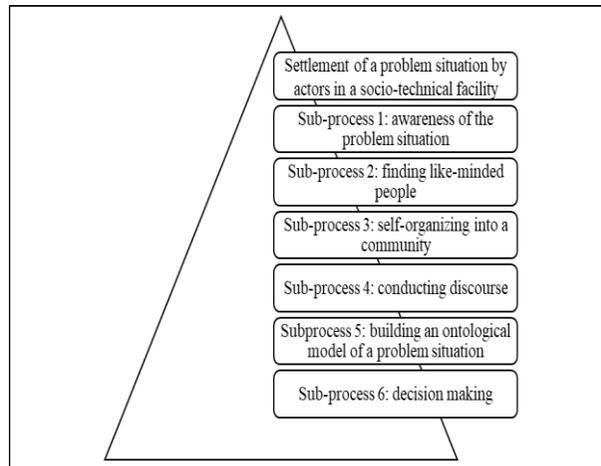


Fig. 1. Decomposition of the process of solving a problem situation in a socio-technical object

2. Creating a decision support system based on ontologies

One of the modern approaches to DSS creating is to use ontologies as their basic element [11–13]. The key element that determines the ideology of the decision support system created for the regulation of problem situation is ontology. Therefore, the developed decision support system for intersubjective management of problem situations solving is built on the basis of ontologies (Fig. 2). Ontologies can be defined as “knowledge bases of a special type that can be read, understood and alienated from the developer and / or physically shared by their users” [14] according to T.R. Gruber.

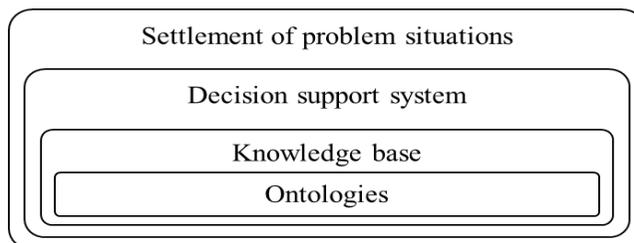


Fig. 2. Ideology of decision support system for solving problem situations based on ontologies

Ontologies in the decision support system knowledge base for solving problem situations are represented by ontologies of two types:

- method-oriented;
- subject-oriented.

A general scientific approach to the process of regulating problem situations on the basis of theory of intersubjective management is presented in a method-oriented ontology. Using the formalism of descriptive logic, the ontology of the subject area of the regulation of problem situations by actors can be represented as a tuple:

$$O = \langle C, R, F \rangle,$$

where C is a finite set of concepts of the subject area; R is a finite set of relationships between concepts; F is a finite set of interpretation functions given on concepts and / or relationships.

The main elements of the tuple were revealed by author in [15].

When constructing an ontological model of a problem situation in accordance with the five types of intersubjectivity [16], actors in the course of the decision-making process build semantic, logical, operational, empirical and normative ontologies aimed at achieving mutual understanding of heterogeneous actors in joint decision-making processes (Fig. 3).

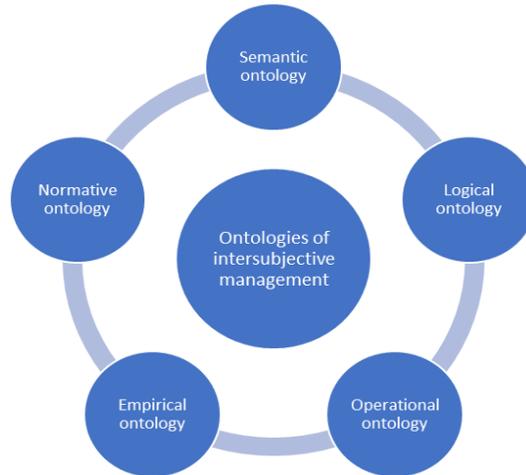


Fig. 3. Ontologies built by actors in joint decision-making process

These ontologies depend on a variety of subjective factors (a set of individual characteristics of actors, environmental factors, features of the socio-technical object, etc.) and differ in each problem situation.

Semantic ontology. Semantic intersubjectivity presupposes a general understanding and agreement of actors on issues related to the mission of the socio-technical object, the rules of behavior formed within this formally limited community, the value priorities of the community, etc. and conduct a dialogue “in one language”. A common corporate culture and trust are the basis for the negotiability of actors. It determines the importance of semantic intersubjectivity, which is reflected in the semantic ontology.

Logical ontology. Consensus between actors can be achieved by relying on logical intersubjectivity. Note that the decision-making logic of actors does not imply the use of classical logic, which is based on the sequence “concept – judgment – inference”. This refers to the logic that is shared by all actors involved in solving a problem situation (they can use, for example, democratic principles, or opposite type of principles, as autocratic one. It depends only on the group’s preferences). The concepts and relationships of this intersubjectivity represent the logical ontology of decision making.

Operational ontology. It includes concepts that relate to the concept of deliberate action and are related to the reproducibility of patterns of action. According to Alfred Schütz, the behavior of an actor is based on a pre-thought out project [17]. It is assumed that acceptable technologies of activity are accepted and approved by consensus. The combination of these technologies is an operational ontology of

activity, which includes a description of technologies with an indication of the responsibility for their implementation.

Empirical ontology. Empirical intersubjectivity implies the need to support the actors' conclusions with facts that must be recognized by all, otherwise mutual understanding may not be achieved. Such an ontology does not necessarily contain only objective facts (scientifically substantiated), it includes those facts that are trusted by actors who have a subjective color in a given community.

Normative-legal ontology. The normative-legal ontology includes a set of normative documents that ensure the regulation of the relationship of actors. Depending on the situation, these can be different agreements, standards, orders, as well as laws. If, at a given level of uncertainty, these agreements are not enough, then new rules for the interaction of actors can be adopted. The normative and legal ontology can be supplemented and adjusted in the decision-making process.

4. Using transformation of knowledge in a decision support system

When constructing an algorithm for finding an exit from the problem situation, we will take into account the transformation of the knowledge of actors, relying on the Nonaka – Takeuchi model (named after Ikujiro Nonaka and Hirotaka Takeuchi). The model includes such processes of transformation and transmission of explicit and implicit knowledge as socialization (transformation of implicit knowledge into implicit), externalization (transformation of implicit knowledge into explicit), combination (transformation of explicit knowledge into explicit) and internalization (transformation of explicit knowledge into implicit) [18]. Transformation of the knowledge of actors was described by author in [19].

In the process of making a decision on the problem situation regulation, actors need methodological and informational support. We'll try to propose such support corresponding it to various stages of knowledge transformation.

Let's consider these stages sequentially, specifying the names of methods, means and tools in relation to the processes of each stage.

1. The stage of knowledge socialization.

1.1. Awareness of problem situation. The actor has implicit knowledge, a pre-understanding of problem situation is formed in his consciousness. The explicit image of the problem situation has not yet been formed. The actor thinks about the presence of some intellectual difficulty about an unmet need and realizes that something needs to be done. At this stage, the actor needs information from the environment. Information is needed on the means that can provide support in solving problem situation in general (for example, decision-making theory – in particular, the theory of intersubjective management, the presence of a decision support system for solving problem situations of actors, etc.).

1.2. Search for like-minded people. To search for actors who find themselves in the same problem situation, the subject turns to the means of infocommunication support (social networks, instant messaging (IM) technologies, etc.) to build communications with them. The transformation of implicit knowledge into implicit knowledge occurs at the verbal level.

1.3. Revealing the meaning of problem situation. Formation of a situational association. Actors form a community to solve a specific problem situation. They need the means to unite, to formally designate their community within the framework of this problem situation. One of the possible means of uniting actors on one site is a website or web portal that is part of the decision support system structure for solving problem

situations of actors. At this stage, it is necessary to have access to the decision support system for the actors – potential users, providing "easy" entry and further friendly human-computer interaction, as well as information about the concept of intersubjective management.

2. Externalization of knowledge. The transformation of implicit knowledge of actors into explicit one during their externalization requires the use of various formalization tools for the transmission and presentation of information.

2.1. General principles for making group decisions in a given situational association formulation.

2.2. The choice of an actor – leader who will further act as moderator of the process of discussion of the problem situation and decision-making.

To present his view, the actor needs the following means and tools:

- for verbal presentation of one's point of view (means of infocommunications);
- for presenting information in the form of texts (text-graphic editors),
- for a quick and vivid presentation of information – the use of pictures and images (tools for visualizing information in the form of pictures, graphs, etc.), tools for the formation and presentation of ontologies),
 - to display connections between objects (information visualization tools, tools for the formation and presentation of ontologies (ontology constructor), tools for depicting dependencies, tools for representing hierarchies (mind maps, trees, etc.),
 - for operational communication – means of infocommunication support (social networks, IM technologies, etc.);
 - for time scheduling (network modeling);
 - to make choice from alternative variants (multi-criteria analysis, methods of expert assessments, etc.);
 - to compare problem situation with already solved problems (methods of reasoning based on precedents).

2.3. Discourse management (discussion of problem situation, presentation of different points of view, formation of personal ontologies of actors). All of the above tools are required, to which three more methods are added (they are the last in the list below):

- for verbal presentation of one's point of view (means of infocommunications);
- for presenting information in the form of texts (text-graphic editors),
- for a quick and vivid presentation of information – the use of pictures and images (tools for visualizing information in the form of pictures, graphs, etc.), tools for the formation and presentation of ontologies),
 - to display connections between objects (information visualization tools, tools for the formation and presentation of ontologies (ontology constructor), tools for depicting dependencies, tools for representing hierarchies (mind maps, trees, etc.),
 - for operational communication – means of infocommunication support (social networks, IM technologies, etc.);
 - for time scheduling (network modeling);
 - to make choice from alternative variants (multi-criteria analysis, methods of expert assessments, etc.);
 - to compare problem situation with already settled (methods of reasoning based on precedents).
 - methods of organizing negotiations (Delphi, brainstorming, etc.);
 - methods of organizing consensus – mediation, facilitation, moderation;

- means of displaying, aligning and combining ontologies.

3. Combination of knowledge.

3.1. Building an ontological model of the situation and reaching consensus.

The transformation of the explicit knowledge of individual actors into the explicit knowledge of all actors that form a situational association, when combined, requires the addition of the above methods and means with tools for the group use of shared resources. The general list of methods, means and tools is as follows:

- for verbal presentation of one's point of view (means of infocommunications);
- for presenting information in the form of texts (text-graphic editors),
- for a quick and vivid presentation of information – the use of pictures and images (tools for visualizing information in the form of pictures, graphs, etc.), tools for the formation and presentation of ontologies),
 - to display connections between objects (information visualization tools, tools for the formation and presentation of ontologies (ontology constructor), tools for depicting dependencies, tools for representing hierarchies (mind maps, trees, etc.),
 - for operational communication – means of infocommunication support (social networks, IM technologies, etc.);
 - for time scheduling (network modeling);
 - to make choice from alternative variants (multi-criteria analysis, methods of expert assessments, etc.);
 - to compare problem situation with already settled (methods of reasoning based on precedents).
 - methods of organizing negotiations of actors (Delphi, brainstorming, etc.);
 - methods of organizing consensus – mediation, facilitation, moderation;
 - means for displaying, aligning and combining ontologies;
 - sharing tools for shared resources.

4. Knowledge internalization. Converting explicit knowledge of actors to implicit knowledge.

The solution of the problem situation has been found. After the problem situation is solved, the result of its resolution should be placed in the library of precedents by the actor-moderator.

To visualize the methods and tools necessary for making decisions by actors, we will use a mind mapping tool that allows us to graphically interpret semantics for its visual presentation. The mind map presents the main groups of methods and tools that can support decision-making by actors in the socio-technical object when settling the problem situation (Fig. 4).

When choosing models, methods and tools that support actors in the process of problem situations regulation, it is necessary to take into account the peculiarities of the process of making a group decision in intersubjective management theory. The choice of methods to be applied by actors is also influenced by the subjective component, that is, their personal characteristics and preferences, knowledge and skills. The determining factors in the formation of a library of models, methods and support tools are:

- the importance of subjective assessments;
- non-professionalism of users;
- the fundamental role of communications;

the absence of a clearly expressed goal in the search for a way out of the problem situation (i.e., the search for an answer to the question of what to do, and not how to do it).

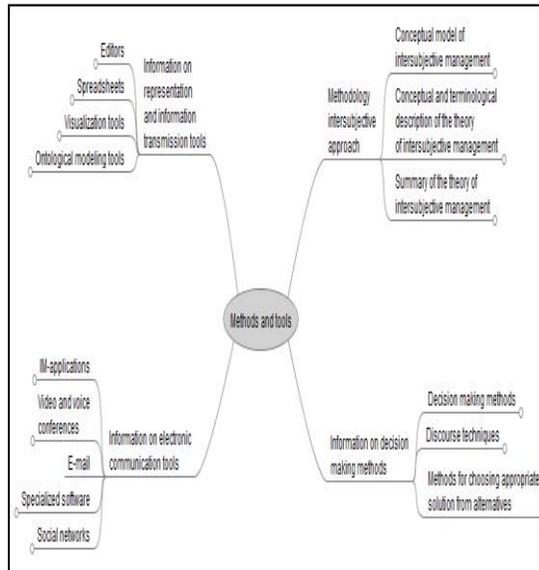


Fig. 4. Methods and tools required to resolve problem situations of actors

The following groups of methods are proposed for inclusion in the decision support system:

- methods of discourse and consensus;
- methods which help to make choice when alternatives are available.

Most of the proposed methods should be used in combination with each other, thus enhancing the effect of applying each of them separately.

When building a general ontological model of a situation, the actors jointly make decisions about the way of solving the problem situation. The convergence of the decision-making process depends on which way of presenting and formalizing semi-structured subjective knowledge they chose, and how well they were able to use it to present their point of view to the community.

Among the modern information means for the presentation and transmission of information available for understanding and use by actors in the problem situation, one can single out the means of visualization. The use of the same set of visualization tools will allow actors to use uniform tools that make it possible to more or less the same interpretation of the drawings.

The use of modern visualization tools will allow actors to present the personal ontology of the physical picture of the world seen by them in a form convenient for visual perception, transforming verbal-symbolic information into spatial-visual information. Visualization tools are designed to complement the communication of heterogeneous actors with means that support the communication of subjects within a situational association and perform the function of "social glue" [20].

Conclusion

The work is devoted to the further development of the main provisions of the theory of intersubjective management. Information support of actors in problem situations is discussed.

An approach to the construction of decision support systems in socio-technical objects is described. This approach is based on the construction of ontological models.

The transformation of actors' knowledge is taken into account. The processes of realizing the situation by actors, discussing it and making a decision on getting out of situation are considered.

The following tasks were solved and their results were presented:

- decomposition of the process of solving a problem situation in a socio-technical object;
- ideology of decision support system for solving problem situations based on ontologies is developed;
- five types of ontologies (semantic, logical, operational, empirical and normative ontologies) built by actors in joint decision-making process are described;
- transformation of the knowledge of actors in joint decision-making process in accordance with the Nonaka – Takeuchi model is described.

In the future, we plan to expand these ideas, build decision support systems in socio-technical objects of different nature and test them.

REFERENCES

1. Power D.M.J. "A Brief history of decision support systems," WWW, 2003.
2. Zagorulko Yu.A. Modern means of formalizing the semantics of knowledge domains based on ontologies // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. Vol. 3. No 11. 2018. Pp. 27–36.
3. Chernyakhovskaya L.R., Gvozdev V.E., Galiullina A.F. Decision-making support for assessing the quality of public services provision using ontological analysis // Ontology of design. 2016. Vol. 6. No. 2 (20). Pp. 193–204.
4. Vittikh V.A. Introduction to the theory of intersubjective management // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24. No. 1. Pp. 67–95.
5. Vittikh V.A. Heterogeneous actor and everyday life as key concepts of evergetics // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24, No. 6. Pp. 949–956.
6. Vittikh V.A. Evergetics: Science of intersubjective management processes in everyday life // Int. Journal Management Concepts and Philosophy. 2016. Vol. 9. No. 2. Pp. 63–72.
7. Vittikh V.A. Evolution of ideas on management processes in the society: from cybernetics to evergetics // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24. No. 5. Pp. 825–832.
8. Dong Y. et. al. Consensus reaching in social network group decision making: Research Paradigms and Challenges // Knowledge-Based Systems. 2018. Vol. 162. Pp. 3–13. DOI: 10.1016/j.knosys.2018.06.036.
9. Moiseeva T., Myatishkin Yu. Managing the commons: application of the intersubjective approach // Ekonomické trendy. 2019. No. 3–4. Pp. 28–29.
10. Moiseeva T. Intersubjective management: Model of the problem situation // In: S.A. Nikitov, D.E. Bykov, S.Yu. Borovik, Yu.E. Pleshivtseva (Eds.). Proc. XXI Int. Conf. "Complex Systems: Control and Modeling Problems" CSCMP 2019. IEEE Xplore. Pp. 765–768. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976828
11. Zagorulko Y.A., Borovikova O.I., Zagorulko G.B. Application of ontology design patterns in the development of the ontologies of scientific subject domains // CEUR Workshop Proceedings. 2022. Pp. 258–265.
12. Zagorulko Y., Zagorulko G., Borovikova O. Pattern-based methodology for building the ontologies of scientific subject domains // Proceedings of the 17th International Conference "New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques", SoMeT. 2018. Vol. 303. Pp. 529–542. DOI:10.3233/978-1-61499-900-3-529.
13. Zagorulko G.B. Development of an ontology for Internet resources of decision support in weakly formalized areas // Ontology of design. Vol. 6. No. 4 (22). 2016. Pp. 485–500.
14. Gruber T.R. The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases // Reusable Knowledge Bases Proceedings of the Second International Conference "Principles of Knowledge Representation and Reasoning". 1991. Pp. 601–602.
15. Moiseeva T., Polyayeva N. Intersubjective management theory: Conceptualization of the subject area // Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for

- Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020). Vol. 483. Ufa-Stavropol, Russia, October 06-09, 2020. Pp. 19–23. DOI: 10.2991/assehr.k.201029.004
16. *Kurt H.* Die wahrheit des mythos. Verlag C.H. Beck, München. 1985. 343 p.
 17. *Schutz A.* Common-sense and scientific interpretation of human action // Collected Papers. 1962. Vol. 1. Pp. 3–47.
 18. *Nonaka I., Takeuchi H.* The knowledge-creating company: how Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford, Oxford University Press, 1995. 284 p.
 19. *Moiseeva T.* Knowledge management in intersubjective management of innovative development of socio-technical objects // Vestnik SamSTU, Series "Engineering Sciences". 2018. No. 3(59). Pp. 41–55.
 20. *Henderson K.* Flexible sketches and inflexible data bases: Visual communication, conscription devices, and boundary objects in design engineering // Science, Technology & Human Values. 1991. Vol. 16. No. 4. Pp. 448–473.

Original article submitted 13.03.2024

ТЕОРИЯ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ*

Т.В. Моисеева

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

Аннотация. В нашей повседневной жизни возникает множество проблемных ситуаций, которые ухудшают качество жизни, снижают производительность труда. Современная наука не имеет технологий принятия решений в проблемных ситуациях в условиях неопределенности, когда субъектам самим необходимо принять решение, что нужно делать, а не как это сделать. Единственной теорией, которая предлагает акторам новый подход к управлению разрешением проблемных ситуаций, является теория интересубъективного управления, предложенная в начале XXI века. Принципиальное отличие интересубъективного управления от классического заключается в том, что функции управления возлагаются на самих людей, погруженных в проблемную ситуацию и активно действующих (акторов). В процессе принятия решений в проблемной ситуации субъекты нуждаются в методической и информационной поддержке. Для этого в статье разрабатывается система поддержки принятия решений (СППР), использующая методы и инструменты слабоформализованных предметных областей. При выборе моделей, методов и инструментов, поддерживающих акторов в процессе решения проблемной ситуации, учитываются особенности группового процесса принятия решений в междисциплинарном управлении. На выбор методов, применяемых акторами, также влияет субъективная составляющая, т. е. их личностные характеристики и предпочтения, знания и навыки. Проектирование СППР базируется на модели управления знаниями Нонака – Такеучи.

Ключевые слова: проблемная ситуация, интересубъективное управление, принятие решений, система поддержки принятия решений

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Power D.M.J. "A Brief history of decision support systems," WWW, 2003.
2. Zagorulko Yu.A. Modern means of formalizing the semantics of knowledge domains based on ontologies // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. Vol. 3. No 11. 2018. Pp. 27–36.
3. Chernyakhovskaya L.R., Gvozdev V.E., Galiullina A.F. Decision-making support for assessing the quality of public services provision using ontological analysis // Ontology of design. 2016. Vol. 6.No. 2 (20). Pp. 193–204.
4. Vittikh V.A. Introduction to the theory of intersubjective management // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24. No.1. Pp. 67–95.
5. Vittikh V.A. Heterogeneous actor and everyday life as key concepts of evergetics // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24. No.6. Pp. 949–956.
6. Vittikh V.A. Evergetics: Science of intersubjective management processes in everyday life // Int. Journal Management Concepts and Philosophy. 2016. Vol. 9. No. 2. Pp. 63–72.
7. Vittikh V.A. Evolution of ideas on management processes in the society: from cybernetics to evergetics // Group Decision and Negotiation. 2015. Vol. 24. No. 5. Pp. 825–832.
8. Dong Y. et. al. Consensus reaching in social network group decision making: Research



© Автор(ы), 2024

*Татьяна Владимировна Моисеева, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории анализа и моделирования сложных систем.

- Paradigms and Challenges // Knowledge-Based Systems, 2018. Vol. 162. Pp. 3–13. DOI: 10.1016/j.knosys.2018.06.036.
9. *Moiseeva T., Myatishkin Yu.* Managing the commons: application of the intersubjective approach // *Ekonomické trendy*. 2019. No. 3–4. Pp. 28–29.
 10. *Moiseeva T.* Intersubjective management: Model of the problem situation // In: S.A. Nikitov, D.E. Bykov, S.Yu. Borovik, Yu.E. Pleshivtseva (Eds.). Proc. XXI Int. Conf. "Complex Systems: Control and Modeling Problems" CSCMP 2019. IEEE Xplore. Pp. 765–768. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976828
 11. *Zagorulko Y.A., Borovikova O.I., Zagorulko G.B.* Application of ontology design patterns in the development of the ontologies of scientific subject domains // *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Pp. 258–265.
 12. *Zagorulko Y., Zagorulko G., Borovikova O.* Pattern-based methodology for building the ontologies of scientific subject domains // *Proceedings of the 17th International Conference "New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques", SoMeT*. 2018. Vol. 303. Pp. 529–542. DOI:10.3233/978-1-61499-900-3-529.
 13. *Zagorulko G.B.* Development of an ontology for Internet resources of decision support in weakly formalized areas // *Ontology of design*. Vol. 6. No. 4 (22). 2016. Pp. 485–500.
 14. *Gruber T.R.* The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases // *Reusable Knowledge Bases Proceedings of the Second International Conference "Principles of Knowledge Representation and Reasoning"*. 1991. Pp. 601–602.
 15. *Moiseeva T., Polyayeva N.* Intersubjective management theory: Conceptualization of the subject area // *Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020)*. Vol. 483. Ufa-Stavropol, Russia, October 06–09, 2020. Pp. 19–23. DOI: 10.2991/assehr.k.201029.004
 16. *Kurt H.* Die wahrheit des mythos. Verlag C. H. Beck, München. 1985. 343 p.
 17. *Schutz A.* Common-sense and scientific interpretation of human action // *Collected Papers*. 1962. Vol. 1. Pp. 3–47.
 18. *Nonaka I., Takeuchi H.* The knowledge-creating company: how Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford, Oxford University Press, 1995. 284 p.
 19. *Moiseeva T.* Knowledge management in intersubjective management of innovative development of socio-technical objects // *Vestnik SamSTU, Series "Engineering Sciences"*. 2018. No. 3(59). Pp. 41–55.
 20. *Henderson K.* Flexible sketches and inflexible data bases: Visual communication, conscription devices, and boundary objects in design engineering // *Science, Technology & Human Values*, 1991. Vol. 16. No. 4. Pp. 448–473.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2024 г.

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК681.518.5

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСЕВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВАЛА В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАДИАЛЬНО-УПОРНОГО ПОДШИПНИКА ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НК-33 НА ОСНОВЕ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

С.Ю. Боровик¹, В.П. Данильченко^{1,2}, М.М. Кутейникова¹, Ю.Н. Секисов¹

¹ Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН
(ИПУСС РАН – СамНЦ РАН)
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

² ПАО «ОДК-Кузнецов»
443009, г. Самара, Заводское ш., 29

E-mail: borovik@iccs.ru, vdan26@mail.ru, kuteynikova@iccs.ru, sekisov@iccs.ru

Аннотация. *Статья продолжает серию публикаций, посвященных задачам ранней диагностики состояния радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата жидкостного реактивного двигателя НК-33, который является критическим узлом в составе энергосиловой установки. В основе предлагаемого подхода лежит идея замены используемых в агрегате штатных индукционных датчиков частоты вращения ротора турбонасоса распределенным кластером из двух одновитковых вихретоковых датчиков специальной конструкции со смещенными чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Преобразователи размещаются в те же монтажные отверстия, что и штатные датчики частоты вращения, а их чувствительные элементы ориентируются относительно зуба измерительного диска, установленного на контролируемом валу таким образом, чтобы при всех возмож-*



© Автор(ы), 2024

Сергей Юрьевич Боровик, ведущий научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, доктор технических наук.

Валерий Павлович Данильченко, ведущий конструктор лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, главный конструктор ПАО «ОДК-Кузнецов», доктор технических наук, профессор.

Марина Михайловна Кутейникова, старший научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, кандидат технических наук.

Юрий Николаевич Секисов, главный научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, доктор технических наук, доцент.

ных перемещениях вала торец зуба находился в зоне чувствительности обоих датчиков. Совокупная обработка выходных сигналов вихретоковых преобразователей при прохождении зуба под чувствительными элементами позволяет определить изменение осевого положения диска, вызванного смещением вала ротора при разрушении радиально-упорного подшипника, а фиксация моментов прохождения торцом зуба измерительного диска геометрических центров чувствительных элементов соответственно первого и второго датчика в составе кластера обеспечивает реализацию штатных функций измерения частоты вращения ротора по основному и дублирующему каналу. Оценке погрешностей измерения осевых перемещений вала в каналах системы контроля состояния радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя НК-33, реализующей данный способ, посвящена настоящая статья. В частности, рассматриваются случайные и систематические составляющие основной погрешности, обусловленные воздействием помех, конечной частотой дискретизации и выбранным методом вычисления искомым перемещений вала в контролируемом узле.

Ключевые слова: жидкостный реактивный двигатель, турбонасосный агрегат, радиально-упорный подшипник, контроль изнашивания, одновитковый вихретоковый датчик, мониторинг осевых перемещений, кластерные методы, погрешности измерения

Введение

Известно, что жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) являются основным типом силовых установок, используемых в современной ракетно-космической технике. Двигатель представляет собой сложную совокупность разнообразных систем и агрегатов, многие из которых отличаются друг от друга по принципу действия и относятся к разным классам машин [1].

Обычно в ЖРД источником энергии и рабочим телом для получения тяги является двухкомпонентное химическое топливо, которое подается в камеру с помощью турбонасосного агрегата (ТНА). ТНА также осуществляет смешение горючего и окислителя. Критически важным элементом ТНА, испытывающим значительные механические нагрузки, является радиально-упорный подшипник (РУП), который обеспечивает положение ротора турбонасоса относительно статора, воспринимает осевое давление ротора и не допускает его перемещений в направлении собственной оси [2]. Очевидно, что с учетом непосредственной близости в ТНА топлива и окислителя выход из строя и разрушение элементов его конструкции и, в частности, РУП может привести к катастрофическим последствиям как для силовой установки, так и для ракеты-носителя в целом [3].

Одним из представителей ЖРД большой тяги, работающих на двухкомпонентном топливе, является разработанный в конце 60-х годов прошлого столетия для лунной программы Н1-Л3 однокамерный ракетный двигатель многократного применения НК-33 с тягой более 100 тс [4]. Выполненный по замкнутой схеме на компонентах кислород – керосин, НК-33 имеет многократный запуск и считается одним из наиболее надежных ракетных двигателей в мире [4, 5]. В то же время, судя по [3], аварийные ситуации все равно остаются возможными, в том числе и по причине разрушения РУП. В современных модификациях НК-33 для уменьшения изнашивания РУП ТНА применяется автомат его разгрузки от осевых сил, однако какие-либо средства контроля состояния подшипника отсутствуют.

С учетом невозможности внесения каких-либо конструктивных изменений в готовую конструкцию ТНАНК-33 в работе [6] было предложено оригинальное

решение задачи контроля износа РУП на основе замены штатных индукционных датчиков частоты вращения (ДЧВ) ротора ТНА, используемых в основном и дублирующем каналах измерения частоты вращения вала в системе управления силовой установкой, на идентичные по габаритам одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) специальной конструкции со смещенными чувствительными элементами в виде отрезка проводника [7], образующими распределенный кластер ОВТД, размещаемыми в те же монтажные отверстия, что и штатные ДЧВ, и обеспечивающими помимо измерения частоты вращения ротора ТНА определение осевого перемещения вала в РУП, вызванного износом подшипника. В последнем случае реализуется один из вариантов известного метода измерения x, y -координат смещений элементов конструкций энергосиловых установок с помощью распределенного кластера ОВТД [8]. Однако в отличие от традиционного применения метода для решения задач измерения y -координаты (например, радиальных зазоров между статорной оболочкой и торцами лопаток компрессора или турбины авиационного двигателя) в условиях мешающего воздействия осевых перемещений ротора (x -координаты) в рассматриваемом случае решается обратная задача, где в качестве полезной информации выступает осевое перемещение (x -координата) измерительного диска, установленного на валу ротора ТНА, а изменения радиального зазора между чувствительным элементом ОВТД и торцевой поверхностью диска (y -координаты), обусловленные температурными и упругими деформациями контролируемого объекта в рабочем режиме, – наоборот, являются мешающими факторами, затрудняющими получение искомой информации [9].

В работах [2, 6, 10] приводятся описания технических средств, алгоритмического и программного обеспечения прототипа системы контроля состояния РУП ТНА НК-33, реализующей указанный выше подход. Общая работоспособность системы была подтверждена в лабораторных условиях. В то же время работы, посвященные исследованиям метрологических характеристик измерительных каналов системы, в настоящее время отсутствуют. Предлагаемая публикация призвана устранить указанный пробел. В статье приводятся оценки погрешностей измерения осевых перемещений вала в каналах системы контроля состояния РУП ТНА НК-33 и, в частности, рассматриваются случайные и систематические составляющие основной погрешности, обусловленные воздействием помех, конечной частотой дискретизации и выбранным методом вычисления искомого перемещения вала в контролируемом узле. Собственно анализу результатов оценки указанных составляющих основной погрешности предшествует описание лабораторного оборудования, использованного для указанных целей.

Лабораторное оборудование

В качестве основного оборудования для проведения метрологических экспериментов использовался специально разработанный лабораторный стенд, внешний вид которого представлен на рис 1, *а* [2]. Детальное изображение блока, содержащего измерительный диск и имитатор статора с установленными на нем ОВТД, а также устройство контроля осевых перемещений диска приведены на рис. 1, *б*, *в* соответственно.

В состав стенда входит электродвигатель (1) с регулируемой скоростью вращения вала. На валу электродвигателя жестко закреплен измерительный диск (2) с двумя диаметрально расположенными выступами, идентичный применяемому в существующей конструкции ТНА для контроля частоты вращения ротора тур-

бонасоса. Кластер ОВТД (3) вмонтирован в имитатор корпуса ТНА (4), который, в свою очередь, установлен на координатно-подвижной каретке (5), обеспечивающей перемещение имитатора статора относительно измерительного диска в вертикальном (радиальном) и горизонтальном (осевом) направлениях. Указанные перемещения осуществляются с помощью маховиков (6, 7) и имитируют, по сути, искомое осевое смещения вала, вызванное разрушением РУП, а также изменение взаимного положения выступов измерительного диска и чувствительных элементов ОВТД в составе кластера, обусловленные наличием упругих и температурных деформаций элементов конструкции ТНА, возникающих в рабочем процессе эксплуатации агрегата в составе ЖРД. Контроль перемещений имитатора статора относительно измерительного диска осуществляется с помощью механических индикаторов часового типа (8, 9) с разрешающей способностью 10 мкм.

ОВТД подключены к блоку преобразования, усиления и нормализации сигналов (10), который работает в паре с 14-разрядным выносным модулем АЦП E14-440 (11) фирмы L-Card, используемым для ввода измерительной информации в ПЭВМ [11]. Внутреннее программное обеспечение (ПО) ПЭВМ в соответствии с алгоритмами [10] реализует функции настройки измерительных каналов системы, выбора режима работы (служебный или рабочий), управление сбором, преобразованиями и отображением информации, а также обеспечивает человеко-машинный интерфейс взаимодействия с пользователем.

В статическом режиме при заблокированном положении выступа измерительного диска под одним из ОВТД лабораторный стенд может использоваться как градуировочное устройство для получения градуировочных характеристик измерительных каналов с последующим проведением метрологических экспериментов с целью оценки погрешностей измерительных каналов системы. В динамике, при вращении измерительного диска от электродвигателя, стенд применяется для проверки работоспособности и подтверждения характеристик системы на рабочих режимах.

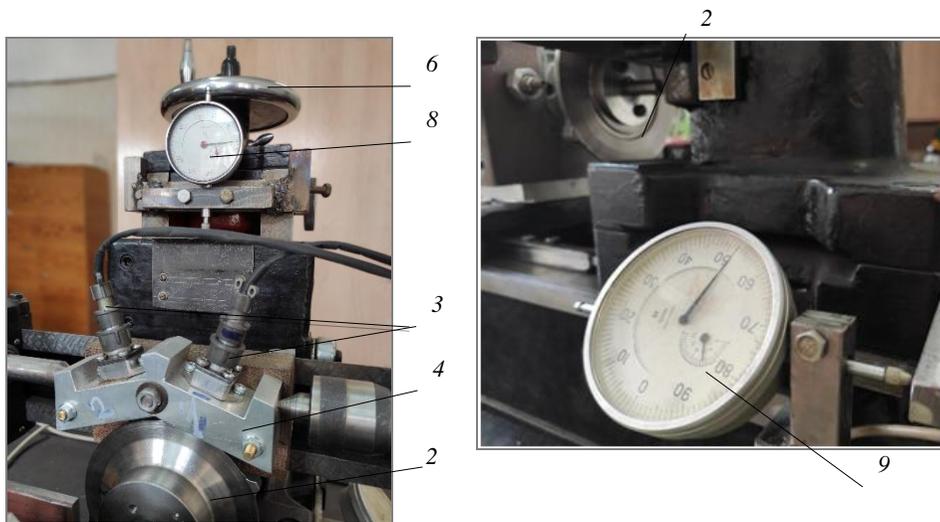
Оценка случайной составляющей погрешности измерения

Эксперименты по оценке случайной составляющей погрешности проводились в статике при фиксированном положении измерительного диска относительно ОВТД, когда выступы на диске находились вне зоны чувствительности обоих датчиков в составе кластера. Объем выборки определялся объемом буферной памяти, используемой в ПО. Коды АЦП регистрировались в режиме непрерывного импульсного питания измерительной цепи (ИЦ) с включенными в нее ОВТД и оценивался их разброс (отклонение кодов от средних значений).

На рис. 2 представлен фрагмент выборки кодов (C_i) объемом 150 отсчетов, полученный при опросе измерительного канала с ОВТД₁. Анализ показал, что большая часть кодов не выходит за пределы разброса в ± 4 единицы. СКО составило 3,09 единицы. Его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов (1332 единицы кода), составило 0,23 %. Аналогичные результаты были получены и для измерительного канала с ОВТД₂.



a



б

в

Рис. 1. Лабораторный стенд для экспериментальных исследований прототипа системы контроля состояния РУП ТНА:

внешний вид (*a*), имитатор корпуса ТНА с установленными ОВД (*б*), устройство контроля осевых перемещений вала (*в*): 1 – электродвигатель с регулируемой частотой вращения; 2 – измерительный диск; 3 – кластер из двух ОВД; 4 – имитатор статора; 5 – координатно-подвижная каретка; 6–7 – маховики, обеспечивающие перемещение имитатора статора в вертикальном (6) и горизонтальном (7) направлениях; 8–9 – индикаторы часового типа для контроля перемещений имитатора статора в вертикальном (8) и горизонтальном (9) направлениях, 10 – блок преобразования, усиления и нормализации сигналов ОВД, 11 – выносной модуль АЦП



Рис. 2. Фрагмент выборки кодов C_i , полученный экспериментально

Традиционным способом уменьшения случайной составляющей погрешности является усреднение результатов многократных измерений. В частности, как показано на рис. 2 (темная линия), при использовании усреднения всего по 10 отсчетам максимальный разброс кодов уменьшился до $\pm 2,5$ единицы и СКО составило 1,1 единицы. В относительных единицах приведенная к диапазону изменений выходных кодов случайная погрешность уменьшилась почти втрое и составила 0,08 %.

Составляющие систематической погрешности

Как отмечалось во введении, в системе контроля состояния РУП ТНА НК-33 реализуется один из вариантов кластерного метода измерения x, y -координат смещений торцов лопаток и лопастей [8], в котором в качестве полезной информации выступает осевое перемещение зуба измерительного диска (x -координата) в условиях мешающих изменений радиального зазора между чувствительным элементом ОВТД и торцевой поверхностью диска, возникающих на рабочих режимах работы ТНА и обусловленных воздействием на элементы конструкции ротора центробежных сил и температуры [9]. Суть метода сводится к фиксации напряжения на выходе ИЦ с обоими ОВТД при прохождении торцом зуба измерительного диска зон чувствительности датчиков, аналого-цифрового преобразования напряжения в цифровой код с последующим выделением экстремумов кодов и вычислением искомого осевого перемещения диска и, соответственно, вала ротора ТНА путем решения системы уравнений на основе предварительно снятых градуировочных характеристик (ГХ) вида

$$\begin{cases} C_1 = f(x, y); \\ C_2 = f(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

где C_1, C_2 – цифровой код, соответствующий экстремальному значению амплитуды напряжения на выходе ИЦ с ОВТД₁, ОВТД₂ при прохождении зуба на измерительном диске под чувствительными элементами датчиков, x – искомое осевое перемещение вала в РУП, y – перемещения торца зуба в радиальном направлении, обусловленные упругими и температурными деформациями элементов конструкции ротора.

Очевидно, что в реальных условиях с учетом конечной частоты аналого-цифрового преобразования вполне ожидаемо появление погрешности дискретизации и дополнительный её рост при увеличении скорости вращения измерительного диска. В работах [12, 13] приводятся оценки указанной составляющей

погрешности применительно к задачам измерения радиальных зазоров в компрессорах и турбинах ГТД. В то же время конструкция измерительного диска и режим работы ТНА существенно отличаются от лопаточного колеса и условий функционирования ГТД, что требует проведения отдельных исследований для данного класса силовых установок. Оценки погрешности дискретизации применительно к задаче измерения осевых перемещений вала в РУП с учетом используемых средств аналого-цифрового преобразования и рабочей частоты вращения ротора ТНА приведены ниже.

На рис. 3 схематично представлен процесс дискретизации сигнала на выходе ИЦ с ОВТД для минимальной (рис. 3, а) и номинальной (рабочей) (рис. 3, б) скоростей вращения ротора ТНА с учетом постоянной конечной частоты аналого-цифрового преобразования (период следования импульсов $T_{АЦП}$).

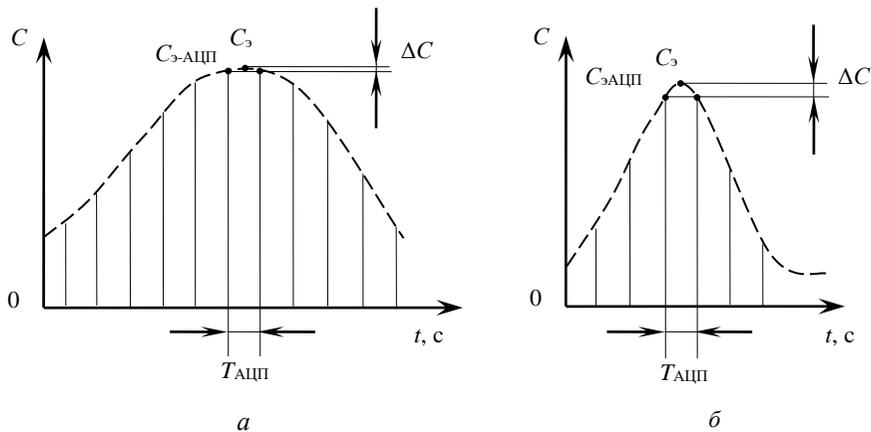


Рис. 3. Погрешность, связанная с изменением скорости вращения ротора ТНА от минимальной (а) до номинальной (б) при постоянной частоте аналого-цифрового преобразования сигнала на выходе ИЦ с ОВТД

Идеализированные функции изменения кодов АЦП во времени $C(t)$ показаны пунктиром, а их экстремальные значения обозначены C_3 . На тех же рис. 3, а, б показаны дискретные значения функции $C(t)$, полученные в результате аналого-цифрового преобразования выходного сигнала ИЦ. Ближайшие по значению к C_3 отсчеты обозначены $C_{3-АЦП}$. Наибольшая разность между реальным экстремумом $C_{3-АЦП}$ и идеальным C_3 будет в случае, когда соседние дискретные отсчеты в окрестности C_3 будут равноудалены от C_3 по времени. Эта разность рассматривается далее как погрешность дискретизации, связанная с изменениями скорости вращения ротора ТНА:

$$\Delta C = C_{3-АЦП} - C_3. \quad (2)$$

На рис. 4 приведен чертеж используемого в ТНА измерительного диска¹ с двумя выступами и указанием основных размеров. Внутренний диаметр диска равен 125 мм, высота измерительного выступа – 7 мм, ширина торцевой части выступа – 5 мм. Как уже отмечалось, в качестве АЦП в прототипе системы контроля РУП используется 14-разрядный выносной модуль Е14-440 фирмы L-Card

¹ Внешний вид диска, установленного на валу имитатора ротора ТНА, представлен на рис. 1, а, б, поз. 2.

[11], который работает с максимальной частотой преобразования, равной 400 кГц. Предполагалось, что минимальная частота вращения ротора ТНА была равной 8000 об/мин, а номинальная – 20000 об/мин.

Количество цифровых отсчетов АЦП, приходящихся на зуб измерительного диска в процессе его вращения, можно определить в соответствии с выражением

$$N = \frac{l_{\text{зуб}}}{l_{\text{отсч}}}, \quad (3)$$

где $l_{\text{зуб}}$ – ширина торцевой части зуба, $l_{\text{отсч}}$ – расстояние, которое проходит измерительный диск при вращении с заданной скоростью за период времени между двумя соседними отсчетами АЦП:

$$l_{\text{отсч}} = \frac{\pi d_{\text{max}} V_{\text{д}}}{60 \cdot f_{\text{АЦП}}}, \quad (4)$$

где d_{max} – внешний диаметр измерительного диска, равный расстоянию между торцами двух расположенных диаметрально противоположно зубьев, $V_{\text{д}}$ – скорость вращения измерительного диска в об/мин, $f_{\text{АЦП}}$ – частота аналого-цифрового преобразования напряжения на выходе ИЦ с ОВТД в Гц.

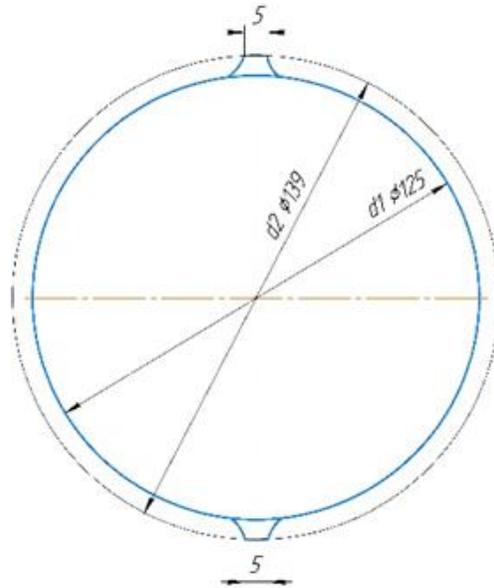


Рис. 4. Измерительный диск с выступами

Тогда для рассматриваемого диска с максимальным диаметром $d_{\text{max}} = 139$ мм и шириной зуба $l_{\text{зуб}} = 5$ мм (см. рис. 3) с учетом частоты преобразования АЦП, равной 400 кГц, в процессе опроса измерительного канала с ОВТД при прохождении зуба зоны чувствительности датчика будет получено 34 цифровых отсчетов кода, если диск вращается с частотой 8000 об/мин, и, соответственно, 13 – при вращении диска с частотой 20000 об/мин.

В качестве идеализированной функции изменения кодов $C(t)$ использовалась аппроксимационная математическая модель, пересчитанная к виду $C(z)$, где z – координата перемещения торца зуба в зоне чувствительности ОВТД в направлении вращения измерительного диска в системе координат $OXYZ$, центр которой привязан к геометрическому центру чувствительного элемента ОВТД. В основе

модели лежат реальные результаты опроса измерительных каналов прототипа системы контроля состояния РУП, полученные на лабораторном стенде рис. 1. Для ее построения с помощью координатно-подвижной каретки имитатор статора с закрепленными на нем ОВТД (рис. 1, а, б, поз. 4, 3) устанавливался над измерительным диском (рис. 1, а, б, поз. 2) таким образом, чтобы зуб находился на равном расстоянии относительно геометрических центров чувствительных элементов обоих ОВТД (осевое смещение диска в этом случае принимается равным «0»), а величина радиального зазора между чувствительными элементами датчиков и зубом была равной 0,75 мм. С помощью электродвигателя (рис. 1, а, поз. 1) диск приводился во вращение с минимально возможной для него частотой. В указанных условиях опрос измерительных каналов с ОВТД осуществлялся с минимально возможным шагом по z (эквивалентно минимальному шагу по t). Результаты опроса для ОВТД₁ в виде зависимости $C(z)$ при прохождении торцом зуба зоны чувствительности датчика аппроксимировались степенным полиномом вида

$$C(z) = -75993708.74 + 14010849.38z - 1072967.246z^2 + 43696.16509z^3 - 998.2002507z^4 + 12.12894824z^5 - 0.061244362z^6. \quad (5)$$

Далее с помощью одного из численных метода поиска экстремума функции одной переменной (в рассматриваемом случае использовался метод золотого сечения) определялось значение координаты z_3 , соответствующей «идеальному» экстремуму C_3 . Затем для заданной частоты вращения ротора ТНА по формуле (4) вычислялось расстояние между двумя соседними импульсами опроса ($l_{оч}$) и в соответствии с (5) определялись значения $C_{3-АЦП}$ для $z = z_3 \pm \frac{l_{оч}}{2}$.

Тогда с учетом (2) для заданных исходных данных относительная погрешность дискретизации $\left(\delta = \frac{\Delta C}{C_3} \cdot 100\% \right)$ составит 0,57 % для скорости вращения 20 000 об/мин и 0,011 % для скорости вращения 8 000 об/мин соответственно. В случае необходимости указанная погрешность может быть уменьшена за счет дополнительной обработки сигнала $C_{АЦП}(t)$. В [12] предлагается способ снижения погрешности дискретизации за счет дополнительной аппроксимации кодов в зоне $C_{3-АЦП}$ на основе полиномов Чебышева I рода или квадратичной параболы с нахождением экстремума аппроксимированной функции численными или аналитическими методами соответственно. В частности, использование алгоритма, предусматривающего в качестве аппроксимирующей функции квадратичную параболу с последующим аналитическим определением координат её вершины (экстремального значения), позволяет уменьшить рассматриваемую погрешность дискретизации до 0,23 % при вращении ротора ТНА с частотой 20000 об/мин и до 0,003 % для частоты вращения ротора 8000 об/мин.

Еще одной составляющей систематической погрешности является погрешность вычисления осевого перемещения вала ротора ТНА в РУП. Как уже отмечалось, реализация кластерных методов измерения x, y -координат смещений элементов конструкций энергосиловых установок подразумевает совокупные измерения с помощью нескольких ОВТД (по числу искомым координат, в рассматриваемом случае – 2) с последующим нахождением искомым параметров путем решения системы уравнения, полученной на основе экспериментально снятых градуировочных характеристик вида (1).

Для снятия градуировочных характеристик измерительных каналов прототипа системы контроля состояния РУП использовался тот же стенд (см. рис. 1), что и в предыдущих экспериментах. Измерительный диск на валу электродвигателя был заблокирован в ситуации, когда один из зубьев находился в верхнем вертикальном положении. С помощью координатно-подвижной каретки имитатор статора с закрепленными на нем ОВТД устанавливался над измерительным диском в положении, соответствующим минимальному зазору между зубом и чувствительными элементами датчика и нулевому осевому смещению диска. Далее для каждого ОВТД путем последовательного перемещения каретки в радиальном и осевом направлениях устанавливались заданные положения датчика относительно зуба и фиксировался соответствующий цифровой код. Результаты градуировки для каждого ОВТД в виде двумерных таблиц или коэффициентов многопараметровых (в рассматриваемом случае – двухпараметровых) аппроксимирующих полиномов заносятся в память системы. На рабочих режимах функционирования системы по кодам $C_{1,э-АЦП}$ и $C_{2,э-АЦП}$ с помощью специальных алгоритмов [8, 14, 15] вычисляются искомые координаты x (осевые смещения) или y (радиальные зазоры).

Очевидно, что процесс экспериментальной градуировки каналов системы является длительным и трудоемким даже для измерения двухкоординатных перемещений. Поэтому зачастую приходится сокращать объем метрологических экспериментов, что, безусловно, приводит к увеличению соответствующих вычислительных погрешностей.

На рис. 5 в графическом виде представлены градуировочные характеристики измерительных каналов системы контроля состояния РУП для ОВТД₁ ($C_1(x,y)$, рис. 5, а) и ОВТД₂ ($C_2(x,y)$, рис. 5, б), полученные в диапазонах изменения радиальных зазоров от 0,5 до 1,5 мм с шагом 0,5 мм и осевых перемещений измерительного диска от $-1,0$ до $+1,0$ мм и шагом 0,2 мм.

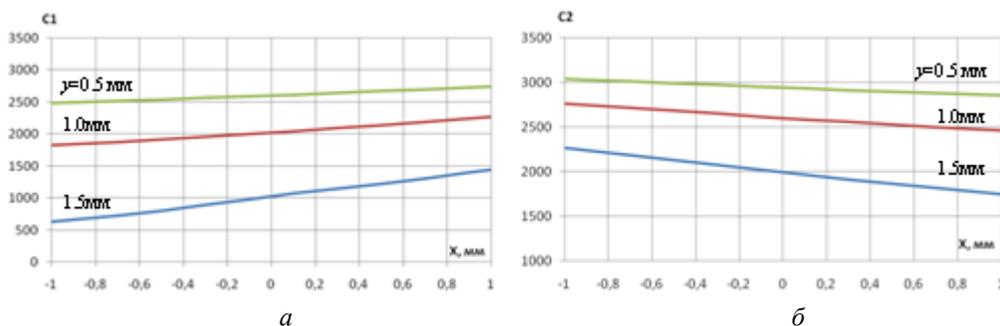


Рис. 5. Экспериментальные семейства ГХ для ОВТД₁ $C_1(x,y)$ (а) и ОВТД₂ $C_2(x,y)$ (б)

Для оценки вычислительной погрешности использовались те же технические средства (стенд на рис. 1) и та же методика, что и при снятии градуировочных характеристик. Однако в отличие от градуировочных экспериментов метрологический эксперимент проводился для промежуточных (не «узловых») значений по радиальному зазору, равных 0,75 и 1,25 мм. Контрольные точки по осевому перемещению оставались теми же, что и при градуировке ($[-1.0, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]$). Вычислительная погрешность рассчитывалась в соответствии с выражением

$$\delta_{\epsilon} = \frac{x_p - x_{\epsilon}}{x_2 - x_1} \cdot 100\% , \quad (6)$$

где x_p – реальное значение осевого смещения, выставляемое с помощью координатно-подвижной каретки, x_{ϵ} – вычисленное на основе результатов измерения с помощью соответствующих алгоритмов значение осевого смещения, x_1, x_2 – границы диапазона измерения осевых перемещений вала ($x_1 = -1.0$ мм, $x_2 = +1.0$ мм).

Результаты расчета вычислительной погрешности для двух значений радиальных зазоров при изменяющихся осевых перемещениях вала в РУП ТНА (измерительного диска) представлены в графическом виде на рис. 6.

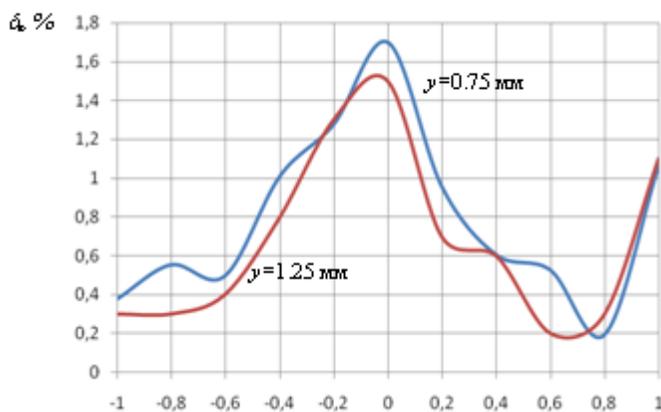


Рис. 6. Приведенная погрешность вычисления осевых смещений вала в РУП

Как видно из представленных данных, погрешность вычисления осевых смещений (x -координаты) для обоих случаев не превышает 1,8 %. При этом максимального значения погрешности достигает в случае, когда зуб на измерительном диске равноудален от чувствительных элементов ОВТД₁ и ОВТД₂ ($x = 0$), постепенно уменьшаясь к краям диапазона (максимальное осевое перемещение вала в том или ином направлении). В большинстве случаев для функций контроля состояния РУП указанной погрешности вполне достаточно, чтобы достоверно определить направление и величину перемещения вала в подшипнике. Однако при необходимости погрешность может быть уменьшена за счет более подробной градуировки измерительных каналов системы или использования для определения осевых перемещений функций преобразования, полученных расчетным путем [9]. В последнем случае необходима разработка адекватных моделей электромагнитного взаимодействия элементов конструкций силовых установок с чувствительными элементами ОВТД [16–18].

Погрешность может быть снижена за счет уменьшения шага по координатам x и y при формировании ГТ из-за особенностей работы алгоритма вычисления координат смещения. Подробная оценка такой погрешности приведена в работе [7].

Заключение

Применительно к задаче контроля состояния РУП ТНА приведены некоторые оценки случайной и систематической составляющих основной погрешности измерения осевых перемещений вала, увеличивающихся по мере разрушения подшипникового узла и характеризующих его износ. Показано, что для фрагмента выборки кодов объемом 150 отсчетов, полученной при опросе измерительного канала с ОВТД, большая часть кодов не выходит за пределы разброса в ± 4 единицы. При этом СКО составило 3,09 единицы, а его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов, составило 0,23 %. Усреднение рассматриваемой выборки всего по 10 отсчетам привело к уменьшению максимального разброса кодов до $\pm 2,5$ единицы, СКО при этом составило 1,1 единицы, т. е. в относительных единицах приведенная к диапазону изменений выходных кодов случайная погрешность уменьшилась почти втрое и составила 0,08 %.

Оценена погрешность дискретизации сигнала на выходе ИЦ с ОВТД применительно к задаче измерения осевых перемещений вала в РУП с учетом используемых средств аналого-цифрового преобразования и рабочей частоты вращения ротора ТНА. Показано, что указанная составляющая систематической погрешности составляет 0,57 % при скорости вращения ротора ТНА, равной 20 000 об/мин, и 0,011 % для скорости вращения 8 000 об/мин соответственно. При этом применение дополнительной цифровой обработки сигнала в области экстремальных значений кодов, соответствующих прохождению торцом зуба измерительного диска зоны чувствительности ОВТД, позволило уменьшить данную составляющую вдвое (до 0,23 %) при вращении ротора ТНА с частотой 20000 об/мин и почти на порядок (до 0,003 %) – для частоты вращения ротора 8000 об/мин.

На основе экспериментально снятых градуировочных характеристик исследована погрешность вычисления искомых перемещений вала ротора ТНА в осевом направлении в РУП, характеризующих процесс разрушения подшипника при двух значениях зазоров между чувствительным элементом ОВТД и зубом измерительного диска. Показано, что вычислительная погрешность для обоих случаев не превышает 1,8 %, достигая максимальных значений для положения измерительного диска, когда зуб равноудален от чувствительных элементов ОВТД₁ и ОВТД₂ ($x = 0$), постепенно уменьшаясь к краям диапазона (максимальное осевое перемещение вала в том или ином направлении). Отмечено, что для функций контроля состояния РУП указанной погрешности вполне достаточно для достоверного определения направления и величины перемещения вала в подшипнике. Уменьшения указанной составляющей погрешности требует более подробной градуировки измерительных каналов системы или использования функций преобразования измерительных каналов на основе моделей электромагнитного взаимодействия элементов конструкций силовых установок и ОВТД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевченко Г. Ю., Лукишин М. Г. Жидкостные ракетные двигатели: учеб. пособие. Красноярск: СибГУ. 2018. 98 с.
2. Лабораторный стенд для проверки работоспособности системы диагностики радиально-упорного подшипника ТНА НК-33 / В.А. Белослудцев, С.Ю. Боровик, В.П. Данильченко, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипов, Ю.Н. Секисов // Перспективы развития двигателе-

- строения: материалы докладов международной научно-технической конференции 21–23 июня 2023 г.: в 2 томах. Т. 2. Самара: Издательство Самарского университета. 2023. С. 151–153.
3. NASA Independent Review Team Orb-3 Accident Investigation Report. Executive Summary // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf
 4. *Тресвятский С.Н., Федорченко Д.Г., Данильченко В.П.* Космические двигатели СНТК имени Н.Д. Кузнецова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2006. № 2–1. С. 16–22.
 5. Antares Launch Vehicle. Antares Overview // <https://web.archive.org/web/20130922012950/http://www.orbital.com/NewsInfo/MissionUpdates/Orb-D1/files/9%20Antares%20Overview.pdf>
 6. Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors / *V. Belosludtsev, S. Borovik, V. Danilchenko, Y. Sekisov* // Sensors 2021. No. 21. P. 3463.
 7. Патент № 2778031 Российская Федерация, МПК G01B 7/14 (2006.01), G01N 27/9013 (2021.01) Вихретоковый датчик со смещенным чувствительным элементом: № 2021110157: заявл. 12.04.2021: опубл. 12.08.2022 / *Белослудцев В.А., Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов Ю.Н.*; заявитель СамНЦ РАН. 11 с.
 8. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. *О.П. Скобелева*. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.
 9. *Borovik S., Kuteynikova M., Sekisov Y.* Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. 2023. V. 23. P. 351.
 10. Структура и алгоритмы функционирования системы контроля осевых перемещений вала в радиально-упорном подшипнике турбонасосного агрегата жидкостного реактивного двигателя НК-33 / *В.А. Белослудцев, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов* // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 3. С. 98–110. doi: 10.14498/tech.2022.3.7
 11. *Гарманов А.В.* Преобразователи напряжения измерительные L-Card E20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-I, E20-10-D-1-I. Руководство пользователя. М.: ЗАО «Л-Кард», 2021. 79 с.
 12. Погрешности дискретизации в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины / *С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев* // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2016. № 2 (50). С. 83–90.
 13. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е.* Оценка погрешностей дискретизации при определении экстремальных значений кодов в системах измерения радиальных зазоров в компрессорах турбомашин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 1 (57). С. 47–54.
 14. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. *Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева*. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. 188 с.
 15. *Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н.* Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII междунар. конф. Самара: СамНЦ РАН. 2010. С. 323–327.
 16. *Боровик С.Ю., Маринина Ю.В., Секисов Ю.Н.* Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2007. № 1. С. 76–83.
 17. *Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.* Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XV международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН. 2013. С. 627–635.
 18. Modeling the process of measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips / *S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, P.E. Podlipnov, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev* // Optoelectron. Instrument. Proc. 51, 512–522 (2015). <https://doi.org/10.3103/S8756699015050118>

Статья поступила в редакцию 5 марта 2024 г.

THE ERRORS OF THE SHAFT'S AXIAL MOVEMENT MEASURING IN THE SINGLE-COIL-EDDY-CURRENT-SENSORS-BASED SYSTEM FOR THE MONITORING THE STATE OF RADIAL THRUST BEARING OF THE NK-33 LIQUID ROCKET ENGINE'S TURBOPUMP UNIT

S.Y. Borovik¹, V.P. Danilchenko^{1,2}, M.M. Kuteynikova¹, Y.N. Sekisov¹

¹Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute for the Control of Complex Systems RAS (ICCS RAS)
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

²PJSC "UEC-Kuznetsov"
29, Zavodskoe hw., Samara, 443009, Russian Federation

E-mail: borovik@iccs.ru, vdan26@mail.ru, kuteynikova@iccs.ru, sekisov@iccs.ru

Abstract. *This article continues a series of publications devoted to the problems of early state diagnosis of the combined journal-and-thrust bearing of the turbo-pump unit of the liquid-propellant rocket engine NK-33, which is a critical node of the power plant under consideration. The proposed approach is based on the idea of replacing the standard induction sensors of the turbo-pump rotational speed currently used in turbo-pump unit by specially designed single-coil eddy current sensors with sensitive elements in the form of a segment of a linear conductor. The transducers are placed in the same mounting holes as the standard rotor's speed sensors and their sensitive elements are oriented relative to the tooth of the measuring disc on the controlled shaft in such a way that the tip of the tooth remains in the sensitivity zone of both sensors during all possible movements of the shaft. The change in the axial position of the disk caused by the displacement of the rotor shaft in the radial thrust bearing during its destruction is determined on the basis of combined processing of the eddy current sensors' output signals during the passage of the tooth under the sensors' sensitive elements. The implementation of the standard rotor's speed measuring function in the main and backup channels is ensured by fixing the moments of the tooth passage through the geometric centers of the sensitive elements of the first and second sensors in the cluster. The article is devoted to estimation of errors of the shaft's axial movement measuring in the channels of the system for monitoring the state of radial thrust bearing of the NK-33 liquid rocket engine's turbopump unit. In particular, the random and systematic components of the basic error caused by the interference, the finite sampling frequency and the chosen method for calculating the desired shaft movements are given.*

Keywords: *liquid-propellant jet engine, turbo-pump unit, thrust bearing, wear diagnostics, single-coil eddy current sensor, axial movements' monitoring, cluster methods, measuring errors*

REFERENCES

1. Shevchenko G.Y., Lukishin M.G. Zhidkostnye raketnye dvigateli: ucheb. posobie [Liquid-propellant rocket engines: Teaching Manual]. Krasnoyarsk: SibGU. 2018. 98 p. (in Russian).



© The Author(s), 2024

Sergey Yu. Borovik, (Dr. Tech. Sci.), Leading Researcher.

Valeriy P. Danilchenko, (Dr. Tech. Sci.), Leading Project Engineer, Professor.

Marina M. Kuteynikova, (PhD. Sci. (Techn.)), Senior Researcher.

Yuriy N. Sekisov, (Dr. Tech. Sci.), Chief Researcher, Associate Professor.

2. Laboratornyj stend dlya proverki rabotosposobnosti sistemy diagnostiki radial'no-upornogo podshipnika TNA NK-33 [Laboratory bench for testing the performance of the system for TNA NK-33 radial thrust bearing diagnostic] / V.A. Belosludtsev, S.Y. Borovik, V.P. Danilchenko, M.M. Kuteynikova, P.E. Podlypnov, Y.N. Sekisov // Prospects of developments of the engines: Proceedings of the International Conference, June 21–23, 2023: in 2 vol. Vol. 2. Samara: Izdatelstvo Samarskogo Universiteta. 2023. 151–153. (In Russian).
3. NASA Independent Review Team Orb–3 Accident Investigation Report. Executive Summary // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf
4. *Tresvyatskiy S.N., Fedorchenko D.G., Danilchenko V.P.* Kosmicheskie dvigateli SNTK imeni N.D. Kuznecova [Space engines of SNTK named after N.D. Kuznetsov] // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2006. 10. 2–1. Pp. 16–22. (In Russian).
5. Antares Launch Vehicle. Antares Overview // <https://web.archive.org/web/20130922012950/http://www.orbital.com/NewsInfo/MissionUpdates/Orb-D1/files/9%20Antares%20Overview.pdf>
6. Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors / V. Belosludtsev, S. Borovik, V. Danilchenko, Y. Sekisov // Sensors 2021. No. 21. P. 3463.
7. Patent № 2778031 Rossijskaya Federaciya, MPK G01B 7/14 (2006.01), G01N 27/9013 (2021.01) Vihretokovyy datchik so smeshchennym chuvstvitel'nyim elementom: № 2021110157: zayavl. 12.04.2021: opubl. 12.08.2022 [Patent RF No. 2778031 Single-coil eddy current sensor with shifted sensitive element] / Belosludtsev V.A., Borovik S.Y., Korshikov I.G., Sekisov Y.N., 2022. (In Russian).
8. Klasternye metody i sredstva izmereniya deformacij statora i koordinat smeshchenij torcov lopatok i lopastej v gazoturbinnnyh dvigatelyah [Cluster methods and tools for measuring stator deformations and displacement coordinates of blade tips and blades in gas turbine engines] / Ed. Skobelev O.P. M.: Mashinostroenie, 2011. 298 p. (In Russian).
9. Borovik S., Kuteynikova M., Sekisov Y. Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. 2023. V. 23. P. 351.
10. Struktura i algoritmy funkcionirovaniya sistemy kontrolya osevyh peremeshchenij vala v radial'no-upornom podshipnike turbonasosnogo agregata zhidkostnogo reaktivnogo dvigatelya NK-33 [Structure and operating algorithms of the system for monitoring of the shaft's axial displacement in combined journal-and-thrust bearing of the turbo-pump unit of liquid-propellant rocket engine NK-33] / V.A. Belosludtsev, S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, Y.N. Sekisov // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2022. Vol. 30. No. 3. Pp. 98–110. (In Russian).
11. Garmanov A.V. Preobrazovateli napryazheniya izmeritel'nye L-CardE20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-I, E20-10-D-1-I. Rukovodstvo pol'zovatelya [Voltage measuring converters L-CardE20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-I, E20-10-D-1-I] User's Guideline. M.: ZAO L-Kard, 2021. 79 p. (In Russian).
12. Pogreshnosti diskretizacii v sistemah izmereniya radial'nyh i osevyh smeshchenij torcov lopatok rabocheho kola turbiny [Discretization errors in the systems for measuring of turbine blades tips' radial and axial displacements] / S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, Y.N. Sekisov, O.P. Skobelev // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2016. No. 2(50). Pp. 83–90. (In Russian).
13. Belopukhov V.N., Borovik S.Y., Podlipnov P.E. Ocenka pogreshnostej diskretizacii pri opredelenii ekstremal'nyh znachenij kodov v sistemah izmereniya radial'nyh zazorov v kompressorah turbomashin [Sampling errors estimation in the determination of codes extreme values in systems for measurements of radial clearances in compressors of turbomachines] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2018. No. 1(57). Pp. 47–54. (in Russian).
14. Metody i sredstva izmereniya mnogomernyh peremeshchenij elementov konstrukcij si-lovyh ustanovok [Methods and Tools for Measuring Multidimensional Displacements of Structural Components of Power Plants] / Eds. Sekisov Y.N., Skobelev O.P. Samara: Izd. SamNTs RAN, 2001, 188 p. (In Russian).
15. Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N. Algoritm vychisleniya radial'nyh i osevyh smeshchenij torcov lopatok [Blade Tips Radial Clearances and Axial Displacements Calculation Algorithm] // Proceedings of the XII International Conference “Complex Systems: Control and Modelling Problems”, Samara, Russia, 2010. Pp. 323–327. (In Russian).
16. Borovik S.Yu., Marinina Yu.V., Sekisov Yu.N. Model' klasternogo odnovitkovogo vihetokovogo datchika na osnove metoda konechnykh elementov [Model of a cluster single-

- coil eddy current sensor based on the finite element method] //Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2007. No. 19(1). Pp. 76–83. (In Russian).
17. *Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N., Skobelev O.P.* Model' elektromagnitnogo vzaimodejstviya chuvstvitel'nogo elementa odnovitkovogo vihretkovogo datchika s torcom lopatki slozhnoj formy [Model of electro-magnetic interaction between sensitive element of single-coil eddy current sensor and a tip of complex-shaped blade] // Proceedings of the XV International Conference “Complex Systems: Control and Modelling Problems”, Samara, Russia, 2013. Pp. 627–635. (In Russian).
 18. Modeling the process of measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips / *S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, P.E. Podlipnov, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev* // *Optoelectron. Instrument. Proc.* 51, 512–522 (2015). <https://doi.org/10.3103/S8756699015050118>

Original article submitted 05.03.2024

УДК 004.75

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ МЕЖМОДУЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ВЫБОР СРЕДСТВ ЕГО ОРГАНИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ВИБРОМОНИТОРИНГА ТУРБООАГРЕГАТОВ*

Д.А. Плотников, В.И. Лачин, А.С. Муженко

Южно-Российский государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И. Платова
346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

E-mail: dpl68@mail.ru, lachinv@mail.ru, muzhenko97@mail.ru

Аннотация. В процессе эксплуатации турбоагрегатов (ТА) электрических станций необходим непрерывный контроль уровня вибрации основных элементов ТА, который обеспечивает безопасное функционирование оборудования и выполняется с помощью стационарных систем вибромониторинга (СВМ). Современные стационарные СВМ ТА имеют модульную структуру, где типы и количество используемых модулей определяются сложностью контролируемого агрегата. Выполнение ряда функций СВМ требует организации межмодульного взаимодействия, причём от своевременности и достоверности передачи информации зависит работоспособность системы в целом. Для обеспечения этих показателей в статье проведён анализ одного из наиболее сложных ТА, выполнена оценка числа измерительных каналов СВМ, необходимых для контроля его вибрационного состояния. Показано, что для мощных ТА общее количество каналов измерения вибрации и сопутствующих параметров может достигать до 140. Предложена структура цифровой СВМ и принципы сетевого взаимодействия её элементов, на основе полученных сведений о необходимом числе каналов определены типы и максимальное количество модулей среднего уровня в составе СВМ. Для модулей каждого типа описаны наборы передаваемых данных, их размеры и периодичность передачи, получено выражение для вычисления общей интенсивности потока данных в системной шине СВМ. Показано, что пропускной способности системной шины 300–500 кбит/с достаточно для нормального функционирования СВМ. Обосновано использование интерфейса CAN и протокола CANopen для организации межмодульного взаимодействия.

Ключевые слова: вибрация, вибромониторинг, межмодульное взаимодействие, скорость передачи данных, шинная топология, интерфейс CAN, протокол CANopen

Введение

Возникновение и развитие дефектов в различных частях роторной машины в большинстве случаев сопровождается изменением параметров вибрации её элементов [1]. Поэтому одной из наиболее универсальных и совершенных мето-



© Автор(ы), 2024

* Дмитрий Александрович Плотников, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика».

Вячеслав Иванович Лачин, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика».

Александр Сергеевич Муженко, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика».

дик диагностики роторных машин, к которым относятся турбоагрегаты (ТА) электрических станций, является вибродиагностика, то есть выявление дефектов на основе анализа характеристик вибрации элементов машины [2]. В ряде случаев вибрация является не только индикатором, но и причиной развития дефектов. Более того, в некоторых ситуациях вибрация нарастает лавинообразно и требует экстренной остановки ТА для предотвращения его разрушения. Наиболее масштабным событием такого рода является авария на Саяно-Шушенской ГЭС, произошедшая 17.08.2009 [3].

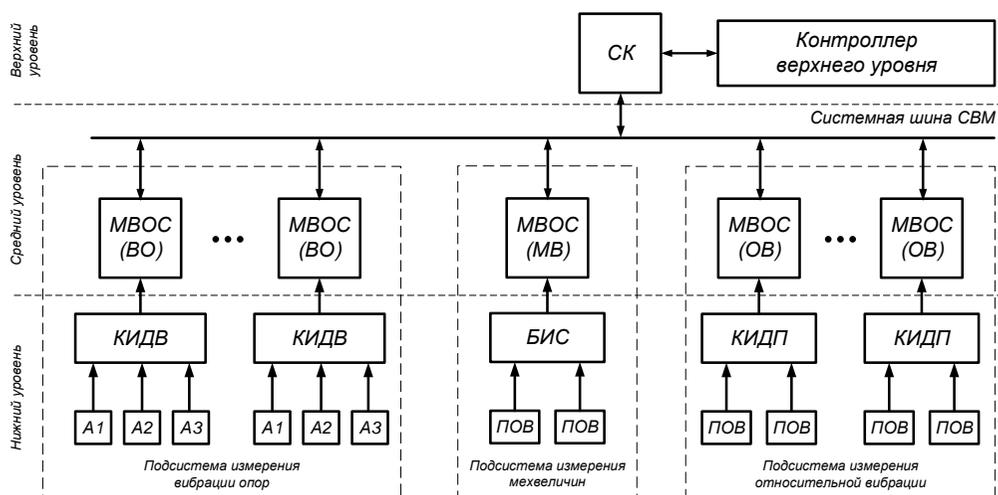
В связи с вышеизложенным в процессе эксплуатации ТА электростанций необходим непрерывный контроль уровней вибрации основных элементов машины [4, 5], осуществляемый с помощью стационарных систем вибромониторинга (СВМ). От показателей точности и надёжности СВМ зависит безопасность и экономическая эффективность функционирования агрегатов.

Современные стационарные СВМ ТА имеют иерархическую структуру [6–9]. На нижнем уровне находятся первичные и вторичные преобразователи измеряемых параметров: ортогональных составляющих вибрации опор и шеек роторов, осевого расширения и сдвига ротора и некоторые другие. Информация с них поступает на средний уровень, где в результате её комплексной обработки формируются управляющие воздействия, инициирующие при необходимости аварийный останов ТА или включение сигнализации. Наконец, на верхнем уровне на основе углублённого анализа текущих и ретроспективных данных с использованием прогнозных моделей формируются рекомендации по срокам профилактических работ, проведению технического обслуживания, замене элементов агрегата. Однако оставаясь в рамках описанной иерархической структуры, СВМ могут отличаться способами объединения измерительных каналов и организации взаимодействия элементов системы, что существенно влияет на характеристики СВМ.

С целью обеспечения отказоустойчивости, отказобезопасности и ремонтнопригодности системы, а также упрощения её масштабирования и конфигурирования авторами разработана структурная схема цифровой СВМ [10], приведённая на рисунке.

В соответствии со спецификой контролируемых параметров, регламентируемых документами [4, 5], все измерительные каналы СВМ делятся на ряд подсистем:

- подсистема измерения вибрации опор – контролирует параметры абсолютной вибрации опор валопровода, то есть совокупности роторов ТА;
- подсистема измерения относительной вибрации – контролирует виброперемещение роторов валопровода относительно подшипниковых опор;
- подсистема измерения мехвеличин – контролирует тепловые расширения, смещения и наклоны элементов ТА;
- подсистема измерения частоты и фазы – предоставляет информацию о частоте вращения и угловом положении ротора, необходимую для работы других подсистем;
- подсистема цифроаналогового ввода-вывода – служит для ввода дополнительных аналоговых и дискретных параметров, а также для формирования дополнительных выходных сигналов (две последние подсистемы на рисунке не показаны).



Структура модульной СВМ (Ап – акселерометр; БИС – блок измерения смещений; ВО – вибрация опор; КИДВ – контроллер интеллектуального датчика вибрации; КИДП – контроллер интеллектуального датчика перемещения; МВ – мехвеличины; МВОС – модуль ввода, отображения и сигнализации; ОВ – относительная вибрация; ПОВ – преобразователь относительной вибрации; СК – системный контроллер)

Каждая подсистема может включать несколько идентичных групп каналов, предназначенных для измерения функционально связанных однотипных параметров. Примерами таких параметров могут служить ортогональные составляющие вибрации одной опоры, одной шейки ротора и некоторые другие. Каждая группа обслуживается одним контроллером интеллектуального датчика (КИД) и одним модулем ввода, отображения и сигнализации (МВОС), общее количество которых определяется сложностью ТА. Такой подход упрощает масштабирование системы и улучшает её ремонтпригодность. Каждый МВОС может функционировать независимо от других модулей среднего уровня, но для реализации в полном объёме функций сигнализации и защиты ТА, обеспечения передачи данных на верхний уровень СВМ и взаимного контроля работоспособности МВОС взаимодействуют между собой с помощью системной шины (СШ).

Постановка задачи

В процессе адаптации СВМ к конкретному ТА количество измерительных каналов и, соответственно, МВОС может изменяться от единиц для простых агрегатов малой мощности до нескольких десятков для мощных и сложных ТА. При увеличении числа МВОС возрастает и интенсивность потоков данных по системной шине СВМ. Следовательно, возникает необходимость оценки этой интенсивности с целью обоснованного выбора интерфейса для реализации системной шины, обеспечивающего бесперебойную связь модулей в максимальной конфигурации системы.

Оценка количества измерительных каналов СВМ

Для формирования требований к интерфейсу межмодульного взаимодействия прежде всего необходимо оценить максимальное количество измеритель-

ных каналов системы. Выполним такую оценку на примере СВМ одного из наиболее сложных ТА с турбиной типа К-800-240 мощностью 800 МВт.

В соответствии с требованиями [4, 5] у ТА такой мощности необходимо контролировать уровни вибрации всех опор, а также вибрацию валопровода (относительные виброперемещения) по отношению ко всем опорам. Турбина К-800-240 [11, 12] имеет по одному ротору высокого и среднего давления и три ротора низкого давления. Кроме того, в состав рассматриваемого ТА входят роторы генератора и возбуждителя. Каждый из семи роторов валопровода установлен на паре опор; таким образом, общее число опор равно четырнадцать.

Вибрация опор измеряется в трёх взаимно перпендикулярных направлениях, следовательно, в состав СВМ было включено 42 канала измерения вибрации опор. Относительное виброперемещение измеряется в двух направлениях, поэтому число каналов измерения виброперемещения составило 28. Для указанной турбины необходимо контролировать относительное расширение всех роторов (пять каналов измерения), а также абсолютное перемещение цилиндров высокого и среднего давления (два канала измерения). По требованию заказчика в состав СВМ были введены каналы измерения угла поворота ригеля фундамента, а также несколько каналов измерения унифицированных аналоговых и дискретных сигналов. Общий список измерительных каналов СВМ приведён в табл. 1.

В некоторых случаях СВМ должна также контролировать вибрацию, скорости вращения и механические параметры питательных турбонасосов (ПТН) ТА, обеспечивающих подачу воды в котёл. Каждый ПТН имеет два ротора на четырёх опорах, контролируются обычно только вертикальные и поперечные составляющие вибрации опор, а также осевой сдвиг ротора. Таким образом, для организации вибромониторинга двух ПТН дополнительно к перечисленным измерительным каналам необходимо предусмотреть каналы, указанные в табл. 2.

Таблица 1

Список основных измерительных каналов СВМ ТА

Канал измерения	Кол-во
Вибрация	
Составляющие вибрации опор	42
Составляющие относительной вибрации ротора	28
Механические величины	
Абсолютное перемещение цилиндров	2
Относительное расширение ротора	5
Поворот ригеля	2
Тахометр, фаза	
Частота вращения ротора	1
Отметчик фазы	1
Дополнительные параметры (унифицированные сигналы)	
Активная мощность генератора (аналоговый сигнал)	1
Резерв (аналоговый сигнал)	3
Резерв (дискретный сигнал)	4

Список дополнительных измерительных каналов СВМ ТА

Канал измерения	Кол-во
Вибрация	
Составляющие вибрации опор	16
Механические величины	
Осевой сдвиг ротора	2
Тахометр, фаза	
Частота вращения ротора	2

С учётом сложности рассматриваемого ТА указанные количества каналов измерения вибрации можно считать близкими к максимально необходимому. С другой стороны, число каналов измерения мехвеличин и унифицированных сигналов существенно зависит от пожеланий заказчика, поэтому при проектировании СВМ следует предусмотреть возможность значительного увеличения количества этих каналов. Обобщённая информация о максимально необходимом числе измерительных каналов СВМ с учётом некоторого числа резервных каналов приведена в табл. 3. В последней колонке таблицы дана оценка вероятности того, что при адаптации СВМ к потребностям заказчика указанное число каналов придётся увеличить. Эта оценка потребуется далее при определении максимального количества модулей, используемых в системе.

Таблица 3

Общий список измерительных каналов СВМ

Канал измерения	Кол-во	Вероятность увеличения
Вибрация		
Составляющие вибрации опор	64	Низкая
Составляющие относительной вибрации вала	32	Низкая
Механические величины	16	Средняя
Тахометр, фаза		
Частота вращения ротора	3	Низкая
Отметчик фазы	3	Низкая
Дополнительные параметры (унифицированные сигналы)	16	Высокая
Общее число измерительных каналов	134	

Анализ информационного обмена модулей среднего уровня

При взаимодействии модулей среднего уровня (МВОС) друг с другом они обмениваются следующей информацией:

– СК, а при его отказе – другой сконфигурированный для этого модуль, периодически передаёт короткие синхронизирующие сообщения, обозначающие начало очередного цикла измерений и вычислений, для координации работы других модулей среднего уровня;

– МВОС в каждом цикле передают на СК текущие значения обобщённых параметров вибрации по каждому каналу (среднеквадратичные значения (СКЗ) виброскорости, виброускорения, размах виброперемещения, признаки превышения пороговых уровней), а также вспомогательных параметров (расширение роторов, смещение, температура, мощность и др.);

– МВОС в каждом цикле передают соседним модулям, контролирующим смежные опоры или шейки ротора, признаки превышения пороговых уровней и текущие значения СКЗ виброскорости (размаха виброперемещения) с целью реализации алгоритмов защиты и сигнализации;

– МВОС и СК периодически (один раз за несколько циклов) передают признаки своего состояния, позволяющие другим модулям среднего уровня диагностировать отказы и исключать неисправные модули из общего алгоритма функционирования системы;

– МВОС по запросу СК передают ему сохранённые графики изменения (осциллограммы) контролируемых параметров.

Из приведённого описания можно сделать следующие выводы.

1) В процессе взаимодействия модулей по СШ передаётся информация различной важности: некоторые данные требуют первоочередной доставки, другие могут доставляться по мере появления возможности. В связи с этим СШ должна поддерживать приоритизацию сообщений.

2) Информация, передаваемая каждым модулем среднего уровня, в общем случае потребляется несколькими модулями. Для эффективного использования пропускной способности СПД в этом случае целесообразно передавать данные в широкополосном режиме с указанием некоторого признака, позволяющего их идентифицировать. На основе анализа этого признака другие модули будут либо принимать информацию, либо игнорировать её. Используемая в структуре СВМ шинная топология сети передачи данных обеспечивает такой режим взаимодействия без каких-либо нежелательных побочных эффектов.

Оценка интенсивности межмодульного взаимодействия

Выполним предварительную оценку интенсивности потока данных по СШ СВМ. Пусть в системе имеется M типов модулей, причём количество модулей каждого типа задано величиной m_k ($k = \{1, 2, \dots, M\}$). Каждый модуль некоторого типа отправляет в сеть определённое количество $n_{q,k}$ значений параметра v_q , где Q – количество параметров, $q = \{1, 2, \dots, Q\}$, каждый параметр имеет разрядность b_q . Значения передаются модулями с периодичностью $t_{q,k}$, выраженной числом циклов синхронизации между передачами. Среднее количество значений параметра q -го типа, передаваемое всеми модулями в течение одного цикла синхронизации, можно вычислить как

$$n_q = \sum_{k=1}^M \frac{m_k n_{q,k}}{t_k}.$$

Если обозначить через T_{SYNC} длительность цикла синхронизации, то среднюю интенсивность потока данных по шине μ можно определить по формуле

$$\mu = \frac{1}{T_{SYNC}} \sum_{q=1}^Q n_q b_q. \quad (1)$$

Для предварительной оценки интенсивности потока данных по СШ СВМ в конфигурации, близкой к максимальной, составлена табл. 4, содержащая информацию о количестве, разрядности и частоте передачи параметров, формируемых каждым модулем среднего уровня. В качестве исходных данных для неё использованы сведения о максимальной конфигурации СВМ, приведённые в табл. 3.

Данные для передачи по системной шине СВМ

Тип параметра q	Разрядность параметра b	Название модуля	СК		МВО		МОВ		МЧФ		ММВ		МВВ	
		Тип модуля k	1		2		3		4		5		6	
		Число модулей m	1		22		16		3		4		2	
		Название параметра	Кол-во	Период										
1	16	СКЗ ВУ			3	1								
2	16	СКЗ ВС			3	1								
3	16	Размах ВП					2	1						
4	16	Средний зазор					2	1						
5	16	Признаки состояния			3	1	2	1	1	1	4	10	8	10
6	32	Частота							1	1				
7	16	Иной параметр									4	10	8	10
8	8	Синхронизация	1	1										
9	8	Диагностика	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1	10

При составлении табл. 4 было принято, что значения большинства аналоговых величин передаются в нормализованной форме в виде 16-разрядных двоичных чисел с фиксированной точкой. Это обеспечивает погрешность представления данных не более $\pm 0,001\%$, вполне достаточную для решаемых задач. Исключение сделано лишь для измеренного значения частоты вращения ротора: поскольку оно используется в СВМ множеством алгоритмов обработки данных и от его точности существенно зависят погрешности вычисления других параметров вибрации, оно представлено в виде 32-разрядного числа. Для обозначения МВОС, относящихся к разным подсистемам СВМ, в табл. 4 использованы следующие сокращения: МВО – модуль вибрации опор, МОВ – модуль относительной вибрации, МЧФ – модуль частоты и фазы, ММВ – модуль мехвеличин, МВВ – универсальный модуль ввода-вывода.

Длительность цикла синхронизации T_{SYNC} определим исходя из необходимости быстродействия СВМ. Специальные требования к скорости выполнения каких-либо функций в нормативных документах [4, 5, 13, 14] отсутствуют, однако в [4] отмечена необходимость выявления внезапных необратимых изменений СКЗ виброскорости более чем на 1 мм/с в течение 5 с на время более 10 с. Для измерения указанных временных интервалов с погрешностью 2...4% следует анализировать СКЗ с частотой 5–10 Гц, то есть T_{SYNC} можно принять равным 0,1 с. В таком случае среднее значение интенсивности потока данных по СШ СВМ, вычисленное по формуле (1) с использованием данных табл. 4, будет равно 49 968 бит/с.

Полученная оценка является весьма приблизительной, поскольку не учитывает такие факторы, как пиковые нагрузки, необходимость передачи служебной информации, информации по запросу. Тем не менее она позволяет выбрать интерфейс и протокол, пригодные для реализации СШ СВМ. Дальнейшие детальные исследования особенностей межмодульного взаимодействия с учётом реальной конфигурации системы и текущего вибрационного состояния ТА могут быть

выполнены с помощью аналитических и имитационных моделей, разработанных как авторами [15, 16, 17], так и другими исследователями [18, 19].

Выбор интерфейса и протокола межмодульного взаимодействия

К интерфейсу межмодульного взаимодействия в СВМ предъявляются следующие требования:

- шинная топология для упрощения масштабирования системы;
- скорость передачи данных (с учётом результатов предварительной оценки и с запасом на перечисленные выше факторы) – 300–500 кбит/с;
- длина шины – до нескольких метров (в пределах приборного шкафа);
- количество подключаемых модулей – до 50–60 (табл. 4);
- простота реализации, широкий выбор однокристалльных микроконтроллеров (ОМК) со встроенной поддержкой интерфейса;
- наличие стандартных протоколов, поддерживающих взаимодействие модулей в режиме реального времени;
- развитые средства выявления ошибок взаимодействия.

В настоящее время всем перечисленным требованиям, за исключением последнего, полностью удовлетворяют два интерфейса: *RS-485* [20, 21] и *CAN* [22, 23, 24]. Однако средства выявления и исправления ошибок взаимодействия, причём реализованные на аппаратном уровне в контроллере интерфейса, имеются только в *CAN*. По этой причине именно он был выбран для организации СШ среднего уровня системы.

Среди достоинств интерфейса *CAN* можно выделить следующие:

- ориентированность на создание распределённых информационно-измерительных и управляющих систем, работающих в режиме реального времени;
- высокая степень достоверности передаваемых данных и вероятность обнаружения ошибок, возможность автоматической повторной передачи сообщений;
- экономичная шинная архитектура, невысокая стоимость аппаратных средств;
- скорость передачи данных до 1 Мбита/с;
- наличие обновлённой версии интерфейса *CAN FD* [25], обеспечивающей при необходимости в несколько раз большую скорость передачи [26];
- широкая поддержка со стороны производителей ОМК.

В пользу этого интерфейса говорит и тот факт, что он в настоящее время является стандартным для бортовой сети автомобилей [23, 24], где в условиях воздействия самых разнообразных помех требуется высокая надёжность работы и достоверность передаваемых данных.

Несмотря на все свои преимущества, интерфейс *CAN* обеспечивает лишь два низших уровня модели *OSI* [27]: физический и канальный. Для решения несложных коммуникационных задач этого может быть достаточно, однако в СВМ, состоящей из десятков модулей, обменивающихся значениями сотен параметров, целесообразно использование протоколов более высокого уровня, решающих задачи адресации, коррекции ошибок, синхронизации и некоторые другие. Для организации взаимодействия по интерфейсу *CAN* существует несколько стандартных протоколов [28], из которых был выбран протокол общего назначения *CANopen*, предназначенный для использования в распределённых информационно-измерительных и управляющих системах, работающих в режиме реального времени [29–31].

Протокол *CANopen* обеспечивает верхние пять уровней модели *OSI*: сетевой (адресация, маршрутизация), транспортный (доставка сообщений от отправителя к получателю без потерь, искажений и в правильном порядке), сеансовый (синхронизация взаимодействия), уровень представления (кодирование данных) и прикладной уровень. Самый верхний, прикладной уровень определяет способы настройки устройств и передачи объектов данных уровня приложения.

Выводы

Проведённое исследование показало, что в состав СВМ ТА может входить до 50–60 модулей среднего уровня, взаимодействующих между собой, причём от качества этого взаимодействия зависит общая работоспособность системы. В результате предварительной оценки, выполненной на основе анализа типов передаваемых данных и периодичности их отправки, выяснилось, что пропускной способности интерфейса межмодульного взаимодействия около 300–500 кбит/с достаточно для обеспечения бесперебойной связи модулей в максимальной конфигурации СВМ. С учётом требований к скорости и надёжности передачи данных обоснована целесообразность применения в качестве системной шины СВМ интерфейса *CAN* и протокола обмена данными *CANopen*. Последующее аналитическое и имитационное моделирование работы ряда СВМ для ТА различной сложности, а также опыт их практической реализации подтвердили корректность принятых решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гольдин А.С.* Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.
2. *Барков А.В.* Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. 169 с.
3. Акт технического расследования причин аварии, происшедшей 17 августа 2009 года в филиале ОАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного» [Электронный ресурс] / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2009. URL: http://www.rushydro.ru/file/main/global/press/news/8526.html/Akt_tehrassledovaniya_prichin_avarii_na_SShGES.pdf (дата обращения: 18.09.2022)
4. ГОСТ 25364-97 Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. Взамен ГОСТ 25364-88; введ. 1.07.99. М.: Изд-во стандартов, 1998. 6 с.
5. ГОСТ 27165-97 Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации валопроводов и общие требования к проведению измерений. Взамен ГОСТ 27165-86; введ. 1.07.99. М.: Изд-во стандартов, 1998. 7 с.
6. Описание типа средства измерений. Аппаратура контроля механических параметров турбоагрегата «СИБОК» [Электронный ресурс] / г. Ростов-на-Дону. ООО «Электрон», 2017. 10 с. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/325316> (дата обращения: 10.12.2023)
7. Автоматизированная система контроля вибрации, механических величин и диагностики (АСКВД) [Электронный ресурс]. Екатеринбург: ООО «Прософт-Системы», 2021. URL: <https://prosoftsystems.ru/solution/show/avtomatizirovannaja-sistema-kontrolja-vibracii-mehaniceskikh-velichin-i-diaagnostiki-askvd> (дата обращения: 10.12.2023)
8. Аппаратура «Вибробит-300». Руководство по эксплуатации. ВШПА.421412.300 РЭ. Ростов-на-Дону: ООО НПП «Вибробит», 2012. 169 с.
9. Аппаратура контрольно-измерительная «Вибробит 500» Руководство по эксплуатации. ВШПА.421412.501.001 РЭ. Ростов-на-Дону: ООО НПП «Вибробит», 2019. 92 с.
10. *Плотников Д.А., Лачин В.И., Алджиязна В.К.М.* Цифровые технологии в системах вибромониторинга турбоагрегатов // Безопасность ядерной энергетики: тез. докл. 17-й Междунар. науч.-практ. конф., 26–28 мая 2021 г. / НИЯУ МИФИ [и др.]. Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2021. С. 16–19.

11. Каталог продукции группы компаний «Силловые машины» [Электронный ресурс] / АО «Силловые машины», 380 с. URL: https://power-m.ru/upload/iblock/83b/SM_product_cataloge_2020.pdf (дата обращения: 21.12.2023).
12. Группа компаний «Силловые машины». Паровые турбины [Электронный ресурс] / АО «Силловые машины», 78 с. URL: <http://www.energyed.ru/res/Discipline/Engine/tur-2-5.pdf> (дата обращения: 21.12.2023).
13. ГОСТ 27164-86 Аппаратура специального назначения для эксплуатационного контроля вибрации подшипников крупных стационарных агрегатов. Технические требования. Введ. 1.01.88. М.: Изд-во стандартов, 1987. 4 с.
14. ГОСТ ISO 2954-2014 Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений. Введ. 1.11.15. М.: Стандартиформ, 2019. 18 с.
15. *Плотников Д.А.* Вероятностный метод для оценки параметров межмодульного взаимодействия в системе управления защитой турбоагрегата по вибрации // Глобальная ядерная безопасность. 2021. № 3. С. 37–51.
16. Разработка модели межмодульного взаимодействия в системах контроля вибрации на базе протокола CANopen / *Д.А. Плотников, В.И. Лачин, В.К.М. Алджиязна, К.Ю. Соломенцев* // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. № 2. С. 68–75.
17. *Plotnikov D.A., Lachin V.I., Solomentsev K.Y.* Modeling of intermodular Interaction Based on the CANopen Protocol in Vibration Monitoring Systems / 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 463 032060, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032060>
18. Using bit-stuffing distributions in CAN analysis / *Thomas Nolte, Hans Hansson, Christer Norström, Sasikumar Punnekkat.* IEEE Real-Time Embedded Systems Workshop. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/255672829_Using_bitstuffing_distributions_in_CAN_analysis (дата обращения 18.12.2023).
19. *Sußmann N., Meroth A.* Model based development and verification of CANopen components 2017 22nd // IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2017. Pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247745>.
20. Interface Circuits for TIA/EIA-485 (RS-485). Application Report [Электронный ресурс]. Texas Instruments Incorporated. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slla036d/slla036d.pdf?ts=1636957884480> (дата обращения: 19.11.2023).
21. Application Note 3884. Full Guide to Serial Communication Protocol and Our RS-485 [Электронный ресурс] / © 25 Jul, 2006, Maxim Integrated Products, Inc. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/3/3884.html> (дата обращения: 19.11.2023).
22. CAN Specification. Version 2.0 [Электронный ресурс] / Robert Bosch GmbH, 1991. 73 p. URL: http://www.bosch-semiconductors.de/media/ubk_semiconductors/pdf_1/canliteratur/can2spec.pdf (дата обращения: 19.11.2023).
23. ISO 11898-1:2015 Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signaling [Электронный ресурс] / URL: <https://www.iso.org/standard/63648.html> (дата обращения: 19.11.2023)
24. ГОСТ Р ИСО 11898-1-2015 Транспорт дорожный. Местная контроллерная сеть (CAN) Часть 1: Канальный уровень и передача сигналов. Введ. 1.08.2016. М.: Стандартиформ, 2016. 42 с.
25. CAN with Flexible Data-Rate; Version 1.1. Aug.2011 [Электронный ресурс] / Robert Bosch GmbH. – URL: https://www.semiconductors.bosch.de/media/pdf/.../canliteratur/can_fd.pdf (дата обращения: 19.11.2023).
26. *Lennartsson K.* Comparing CAN FD with Classical CAN [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://www.kvaser.com/wp-content/uploads/2016/10/comparing-can-fd-with-classical-can.pdf> (дата обращения: 19.11.2023).
27. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель. Введ. 1.01.2000. М.: Изд-во стандартов, 1999. 58 с.
28. Standardized higher-layer protocols [Электронный ресурс] / © 2021 CAN in Automation. URL: <https://www.can-cia.org/can-knowledge/hlp/standardized-higher-layer-protocols/> (дата обращения: 5.12.2023).
29. CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0 [Электронный ресурс] / © CAN in Automation (CiA) 2011. URL: <https://www.can-cia.org> (дата обращения: 5.12.2023)

30. CANopen – The standardized embedded network [Электронный ресурс] / URL: <https://www.can-cia.org/canopen/> (дата обращения: 5.12.2023)
31. The Basics of CANopen. © 2021 National Instruments Corp [Электронный ресурс] / URL: <http://www.ni.com/white-paper/14162/en/#toc2> (дата обращения: 5.12.2023)

Статья поступила в редакцию 16 января 2024 г.

ASSESSMENT OF THE INTENSITY OF INTERMODULE INTERACTION AND THE CHOICE OF MEANS OF ITS ORGANIZATION IN VIBRATION MONITORING SYSTEMS OF TURBINE UNITS*

D.A. Plotnikov, V.I. Lachin, A.S. Muzhenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, Rostovskaya obl., 346428, Russian Federation

E-mail: dpl68@mail.ru, lachinv@mail.ru, muzhenko97@mail.ru

Abstract. *During the operation of turbine units (TU) of electric power plants, continuous monitoring of vibration levels of the main elements of the TU is necessary, which ensures the safe operation of the equipment and is performed using stationary vibration monitoring systems (VMS). Modern stationary VMS for TU have a modular structure, where the types and number of modules used are determined by the complexity of the controlled unit. The performance of a number of VMS functions requires the organization of intermodular interaction, and the efficiency of the system as a whole depends on the timeliness and reliability of information transmission. To ensure these indicators, the article analyzes one of the most complex TU, estimates the number of measuring channels of the VMS necessary to control its vibration state. It is shown that for high-power TU, the total number of vibration measurement channels and related parameters can reach up to 140. The structure of the digital VMS and the principles of network interaction of its elements are proposed, based on the information received about the required number of channels, the types and maximum number of medium-level modules in the VMS are determined. For modules of each type, the sets of transmitted data, their sizes and frequency of transmission are described, and an expression is obtained for calculating the total intensity of the data flow in the VMS system bus. It is shown that the system bus bandwidth of 300...500 kbit/s is sufficient for the normal operation of the VMS. The use of the CAN interface and the CANopen protocol for the organization of intermodule interaction is justified.*

Keywords: *vibration, vibration monitoring, intermodule interaction, data transfer rate, bus topology, CAN interface, CANopen protocol*

REFERENCES

1. *Goldin A.S. Vibratsiya rotornykh mashin [Vibration of rotary machines]. M.: Mechanical engineering, 1999. 344 p. (In Russian).*
2. *Barkov A.V. Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii [Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration]. St. Petersburg: Publishing house of the SPbGMTU Center, 2000. 169 p. (In Russian).*
3. The act of technical investigation of the causes of the accident that occurred on August 17, 2009 at the branch of JSC RusHydro – Sayano-Shushenskaya HPP named after P.S. Naporozhny [Electronic resource] / Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, 2009. http://www.rushydro.ru/file/main/global/press/news/8526.html/Akt_tehrassledovaniya_prichin_aviarii_na_SShGES.pdf (accessed September 18, 2022)



© The Author(s), 2024

**Dmitriy A. Plotnikov, (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*
Vyacheslav I. Lachin, (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander S. Muzhenko, Assistant.

4. GOST 25364-97 Stationary steam turbine units. Vibration standards of shaft supports and general requirements for measurements. – instead of GOST 25364-88; introduction 1.07.99. M.: Publishing House of Standards, 1998. 6 p. (In Russian)
5. GOST 27165-97 Stationary steam turbine units. Vibration standards of shaft lines and general requirements for measurements. – instead of GOST 27165-86; introduction 1.07.99. M.: Publishing House of Standards, 1998. 7 p. (In Russian).
6. Description of the type of average values. Control equipment for mechanical parameters of the SIVOK turbine unit [electronic resource]. Rostov-on-Don. OOO "Electron", 2017. 10 p. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/325316> (accessed December 10, 2023) (In Russian).
7. Automated vibration control system, mechanical quantities and diagnostics (ASKVD) [electronic resource] / Yekaterinburg: Prosoft-Systems LLC, 2021. <https://prosoftsystems.ru/solution/show/avtomatizirovannaja-sistema-kontrolja-vibracii-mehanicheskikh-velichin-i-dagnostiki-askvd> (accessed December 10, 2023). (In Russian).
8. Vibrobit 300 equipment. User manual. VSHPA.421412 300 r. Rostov-on-Don: NPP Vibrobit LLC, 2012. 169 p. (In Russian).
9. Controller equipment-measuring "Vibrobit 500" Operating manual. VSHPA.421412.501.001 R. Rostov-on-Don: NPP Vibrobit LLC, 2019. 92 p. (In Russian).
10. *Plotnikov D.A., Lachin V.I., Aljiyazna V.K.M.* Digital technologies in vibration monitoring systems of turbine units // Safety of nuclear energy: Abstracts of the report of the 17th International Scientific and Practical Conference, May 26-28, 2021 / NRU MEPhI [et al.]. Volgogradsk: VITI NRU MEPhI, 2021. Pp. 16–19. (In Russian).
11. Catalog of products of the group of companies "Power machines" [Electronic resource]. JSC "Power machines". 380 p. https://power-m.ru/upload/iblock/83b/SM_product_cataloge_2020.pdf (accessed December 21, 2023) (In Russian).
12. Power Machines Group of Companies. Steam turbines [Electronic resource]. JSC "Power machines". 78 p. <http://www.energyed.ru/res/Discipline/Engine/tur-2-5.pdf> (accessed December 21, 2023) (In Russian).
13. GOST 27164-86 Special purpose equipment for operational vibration control of bearings of large stationary units. Technical requirements. – introduction 1.01.88. M.: Publishing House of Standards, 1987. 4 p. (In Russian).
14. GOST ISO 2954-2014 Monitoring of the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts. Requirements for measuring instruments. – introduction 1.11.15. Moscow: Standartinform, 2019. 18 p. (In Russian).
15. *Plotnikov D.A.* Probabilistic method for estimating the parameters of intermodule interaction in the control system for the protection of a turbine unit by vibration. Volgogradsk: Global nuclear safety, 2021. Vol. 3. Pp. 37–51. (In Russian).
16. Development of a model of intermodule interaction in vibration control systems based on the CANopen protocol / *D.A. Plotnikov, V.I. Lachin, V.K.M. Aljiyazna, K.Y. Solomentsev.* Novocherkassk: News of universities. Electromechanics. 2020. Vol. 2. Pp. 68–75. (In Russian).
17. *Plotnikov D.A., Lachin V.I., Solomentsev K.Y.* Modeling of intermodular Interaction Based on the CANopen Protocol in Vibration Monitoring Systems // IOP Conf. Ser., Mater. Sci. Eng. 463 032060. 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032060>
18. Using bit-stuffing distributions in CAN analysis / *Thomas Nolte, Hans Hansson, Christer Norström, Sasikumar Punnekkat.* IEEE Real-Time Embedded Systems Workshop. 2009. https://www.researchgate.net/publication/255672829_Using_bitstuffing_distributions_in_CAN_analysis (accessed December 18, 2023).
19. *Sußmann N., Meroth A.* Model based development and verification of CANopen components 22nd // IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2017. Pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247745>
20. Interface Circuits for TIA/EIA-485 (RS-485). Application Report [Electronic resource]. Texas Instruments Incorporated. 2008. <https://www.ti.com/lit/an/slla036d/slla036d.pdf?ts=1636957884480> (accessed November 19, 2023).
21. Application Note 3884. Full Guide to Serial Communication Protocol and Our RS-485 [Electronic resource]. Maxim Integrated Products, Inc. 2006 <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/3/3884.html> (accessed November 19, 2023).
22. CAN Specification. Version 2.0 [Electronic resource]. Robert Bosch GmbH, 1991. 73 p. http://www.bosch-semiconductors.de/media/ubk_semiconductors/pdf_1/canliteratur/can2spec.pdf (accessed November 19, 2023).

23. ISO 11898-1:2015 Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signaling [Electronic resource]. <https://www.iso.org/standard/63648.html> (accessed November 19, 2023).
24. GOST R ISO 11898-1-2015 Road transport. Local controller network (CAN) Part 1: Channel layer and signal transmission – introduction 1.08.2016. M.: Standartinform, 2016. 42 p. (In Russian).
25. CAN with Flexible Data-Rate; Version 1.1. Aug.2011 [Electronic resource]. Robert Bosch GmbH. https://www.semiconductors.bosch.de/media/pdf/.../canliteratur/can_fd.pdf (accessed November 19, 2023).
26. *Lennartsson K.* Comparing CAN FD with Classical CAN [Electronic resource]. 2016. <https://www.kvaser.com/wp-content/uploads/2016/10/comparing-can-fd-with-classical-can.pdf> (accessed November 19, 2023).
27. GOST R ISO/IEC 7498-1-99 Information technology. The interconnection of open systems. The basic reference model. Part 1. The basic model. – introduction 1.01.2000. M.: Publishing House of Standards, 1999. 58 p. (In Russian).
28. Standardized higher-layer protocols [Electronic resource]. © CAN in Automation, 2021. <https://www.can-cia.org/can-knowledge/hlp/standardized-higher-layer-protocols/> (accessed December 5, 2023).
29. CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0 [Electronic resource]. © CAN in Automation (CiA), 2011. <https://www.can-cia.org> (accessed December 5, 2023).
30. CANopen – The standardized embedded network [Electronic resource]. <https://www.can-cia.org/canopen/> (accessed December 5, 2023).
31. The Basics of CANopen. © National Instruments Corp, 2021. [Electronic resource]. <http://www.ni.com/white-paper/14162/en/#toc2> (accessed December 5, 2023).

Original article submitted 16.01.2024

Энергетика и электротехника

УДК 621.313.8

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ РОТОРА СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ВСТРОЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ*

Ю.В. Зубков, Д.А. Владимиров, И.Х. Бикташев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zub577@mail.ru, devladimirovdenis@yandex.ru, irshat.biktashev@bk.ru

Аннотация. Рассматриваются способы определения механических напряжений в индукторе синхронной электрической машины с магнитоэлектрическим возбуждением и встроенными V-образными постоянными магнитами, предназначенной для использования в качестве генератора собственных нужд газокompрессорной станции с приводом от газотурбинного двигателя. Наряду с достоинствами – высокой энергоэффективностью, большими электромагнитным моментом и удельной мощностью, возможностью выполнения малого зазора между статором и ротором у машин с такой конструкцией индуктора имеется существенный недостаток – сильное рассеяние магнитного потока в области наружных и внутренних мостиков насыщения, которое тем существеннее, чем большую ширину имеют мостики. Для снижения потоков рассеяния и обеспечения приемлемых энергетических показателей желательнее уменьшать ширину мостиков, но при этом ослабляется механическая прочность ротора.

Предложены аналитические модели двух уровней для оценки механических напряжений в конструкции индуктора, на основании которых выбирается вариант конфигурации постоянных магнитов и полюсных наконечников ротора. Модель первого уровня предполагает знание геометрических размеров индуктора, которые могут быть получены на этапе электромагнитного расчета электрической машины. Поэтому она больше подходит для оценочного расчета механических напряжений, действующих на наружные мостики. Модель второго уровня получена при использовании аналитических зависимостей, основанных на аналогии системы «магнит – полюсный наконечник» с балкой с жестким защемлением на опорах и распределенной нагрузкой вдоль нее. Она пригодна для определения механической прочности при



© Автор(ы), 2024

*Юрий Валентинович Зубков, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Денис Андреевич Владимиров, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Иршат Хабильевич Бикташев, аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

оптимизационном проектировании, когда приходится оперировать большими объемами данных.

Результаты расчета механических напряжений по аналитическим моделям проверяются и уточняются посредством решения прочностной задачи методом конечных элементов в программном комплексе *Ansys Structural*.

Ключевые слова: электрическая машина, встроенные постоянные магниты, ротор, механическая прочность, аналитическая методика, конечно-элементный анализ

Введение

Электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) находят широкое применение в таких приложениях, как генерация электрической энергии, электрические и гибридные автомобили, электрический запуск газотурбинных двигателей, системы слежения и ориентации объектов и т. д. Они отличаются высокими крутящим моментом, удельной мощностью, энергоэффективностью, производительностью, коэффициентом мощности [1, 2]. Перечисленные достоинства в разной степени присущи электрическим машинам с магнитоэлектрическим возбуждением с различным конструктивным исполнением индуктора. ПМ могут быть расположены на поверхности индуктора – *SMPM* (*surface-mounted permanent magnet*), вставлены в сердечник – *IMPM* (*inset-mounted permanent magnet*) и инкорпорированы в индуктор – *IPM* (*interior permanent magnet*). *IPM* машины имеют ряд преимуществ по сравнению с двумя другими типами. Фрагмент поперечного сечения индуктора *IPM* машины показан на рис. 1.

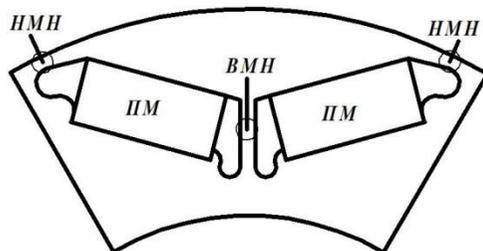


Рис. 1. Фрагмент *IPM* индуктора

Такое расположение ПМ в сердечнике индуктора предполагает наличие реактивного момента в отличие от *SMPM* конструкции и более высокое его значение относительно *IMPM*, обеспечивает защиту ПМ от размагничивающего действия реакции якоря посредством демпфирования магнитного поля в магнитомягких полюсных наконечниках. Последнее особенно важно при регулировании частоты вращения ослаблением поля (добавлением продольной составляющей тока обмотки статора) в двигательном режиме работы и для ослабления размагничивающего действия поля якоря при работе генератором. Отсутствует необходимость использования гильзы, фиксирующей ПМ на поверхности при высоких частотах вращения, что ведет к уменьшению немагнитного зазора, требуемого объема и массы дорогих высококоэрцитивных ПМ, исключает поверхностные потери в гильзе, улучшает условия охлаждения ПМ. С точки зрения технологии процесс изготовления индуктора здесь более прост по сравнению с другими типами роторов. ПМ вставляются непосредственно в прорези пластин сердечника

ротора, что существенно удешевляет производство по сравнению с *SMPM* и *IPPM* конструкциями.

Участки магнитной системы индуктора, удерживающие ПМ в посадочных местах, называются мостиками насыщения – наружными (НМН) и внутренними (ВМН). Функциональное назначение МН – удерживание магнитов в процессе вращения ротора и обеспечение механической прочности вращающейся части машины. Ширина мостиков должна быть достаточной для обеспечения надежности конструкции при воздействии на нее центробежных и электромагнитных усилий. Однако чрезмерный их размер вызывает увеличение потоков рассеяния ПМ и полезный поток значительно сокращается, что ведет к ухудшению энергетических характеристик машины в целом [3]. Эта проблема достаточно полно исследована в работах [4–6], где предложены способы снижения негативного влияния мостиков на величину полезного потока в зазоре. Обзор возможных методов снижения механических напряжений в мостиках насыщения представлен в [7–9]. В [10] предложена разгрузка по напряжению мостов с помощью отверстий, выполненных на пути потока, в результате чего возможно уменьшение толщины мостика. В [11] высказана идея о замене ферромагнитных мостиков карбоновыми клиньями специальной конфигурации, удерживающими ПМ в посадочных местах при вращении ротора. Все эти способы предполагают изменение конструкции индуктора и не гарантируют стабильности характеристик машины в широком диапазоне частот вращения. Оценка полезного эффекта от их применения требует больших затрат времени, вычислительных ресурсов и использования специализированных программных продуктов численного моделирования.

В настоящем исследовании рассмотрены способы определения механических напряжений в *IPM* индукторе синхронной машины с *V*-образными ПМ, предназначенной для использования в качестве генератора собственных нужд газодвигательной станции с приводом от газотурбинного двигателя (ГТД). Предложены аналитические модели для оценки механических напряжений в конструкции индуктора, на основании которых выбирается вариант конфигурации постоянных магнитов и полюсных наконечников ротора и оптимизируется его конструкция. Далее с помощью конечно-элементного анализа получена картина распределения механических нагрузок в наружных и внутренних мостиках, уточняющая и подтверждающая приближенные аналитические расчеты.

Анализ причин механических проблем

На начальном этапе методом подобия была разработана геометрическая модель ротора генератора с *V*-образными встроенными магнитами. Такая компоновка ПМ в индукторе диктовалась желанием получить весомую реактивную составляющую электромагнитного момента за счет разности проводимостей магнитного потока по продольной и поперечной осям машины. Генератор предназначен для работы в широком диапазоне частот вращения, верхний предел которого достигает 6000 об/мин и более в зависимости от приводного ГТД [12]. Достаточно высокая окружная скорость предъявляет повышенные требования к конструктивному исполнению вращающейся части, в первую очередь к мостикам насыщения, чья прочность во многом зависит от физических свойств материалов, из которых выполнен индуктор. В табл. 1 приведены физические свойства материалов сердечника и ПМ ротора.

Физические свойства материалов

Плотность электротехнической стали 2412, кг/м ³	$\gamma_{cm} = 7600$
Плотность материала постоянного магнита N38UH, кг/м ³	$\gamma_{nm} = 7600$
Модуль упругости стали, Па	$E = 2,15 \cdot 10^{11}$
Модуль сдвига стали, Па	$G = 8,4 \cdot 10^{10}$
Предел кратковременной прочности, МПа	$\sigma_6 = (330...470)$
Относительное удлинение при разрыве, %	20...35

Из приведенных данных следует, что временное сопротивление на разрыв стали 2412, из которой выполнен сердечник ротора, находится в достаточно широком диапазоне. Напряжение текучести и допустимое напряжение не регламентированы. Как правило, допустимое напряжение в 1,8–2,5 раза ниже временного сопротивления на разрыв. Таким образом, ориентировочное значение допустимого напряжения находится в диапазоне 180–240 МПа. Эти цифры являются ориентиром в последующих оценках механической прочности ротора.

Аналитический метод расчета механических напряжений (модель 1)

На рис. 2 показаны составляющие сил, действующих на ПМ при вращении ротора, и геометрические параметры магнита.

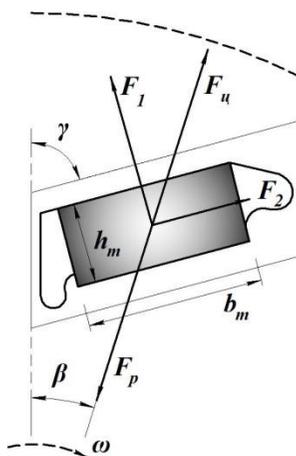


Рис. 2. Диаграмма сил и размеры ПМ

В установившемся режиме работы на вращающиеся части машины – полюсный наконечник и магнит в радиальном направлении действует центробежная сила F_c , пытающаяся переместить магнит из посадочного места. Со стороны полюсного наконечника на магнит действует сила упругости F_p , направленная встречно центробежной силе, поэтому конструктивные части ротора находятся в уравновешенном состоянии. Величина силы упругости зависит от механических свойств материала ротора и, в случае превышения критических значений внутренних напряжений, происходит его разрушение. Сила упругости обеспечи-

вается связями мостиков насыщения и полюсного наконечника. Нагрузка, действующая на наружные мостики, определяется суммарной центробежной силой полюсного наконечника и магнита.

$$F_{ц} = F_{цпм} + \frac{1}{2} F_{цпн} = \omega^2 \cdot \left(\rho_{пм} \cdot b_m \cdot h_m \cdot l_m \cdot r_{пм} + \frac{1}{2} \rho_{пн} \cdot S_{пн} \cdot l_{пн} \cdot r_{пн} \right), \quad (1)$$

где ω – угловая частота вращения; $\rho_{пм}$, $\rho_{пн}$ – плотность материала ПМ и сердечника ротора; $r_{пм}$, $r_{пн}$ – радиус вращения центров масс ПМ и полюсного наконечника (ПН); $S_{пн}$ – площадь поперечного сечения наконечника.

Центробежная сила, стремящаяся переместить ПМ по нормали к зазору, может быть разложена на две составляющие F_1 и F_2 , действующие на верхнюю и боковую площадки посадочного места ПМ и оказывающие реакции на ПМ. При контакте без трения силы реакции равны и противоположны составляющим центробежной силы $F_{цпм}$

$$F_1 = F_{цпм} \cdot \sin \left(\beta + \frac{\pi}{2} - \gamma \right); \quad F_2 = F_{цпм} \cdot \cos \left(\beta + \frac{\pi}{2} - \gamma \right). \quad (2)$$

Для определения силы реакции, действующей на мостики, необходимо найти координаты центров масс двух ПМ и полюсного наконечника, основываясь на модели полюса, показанной на рис. 3.

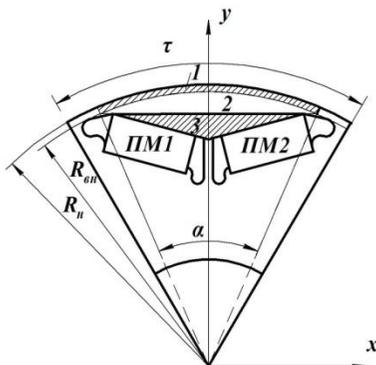


Рис. 3. К определению центра масс

В модели полюсный наконечник разделен на три области. Поскольку ротор однороден в осевом направлении, задача сводится к плоскопараллельной постановке. Координаты радиус-вектора системы нескольких тел с непрерывным распределением плотности в этом случае

$$x_c = \frac{\sum_i \int_{D_i} x dS_i}{\sum_i S_i}; \quad y_c = \frac{\sum_i \int_{D_i} y dS_i}{\sum_i S_i}. \quad (3)$$

Здесь D_i – i -тая область модели; S_i – площадь ее поперечного сечения.

Тела, принадлежащие одной системе (ПМ или ПН), имеют одинаковую плотность.

Ввиду симметрии модели $x_c = 0$. Тогда радиус центра масс системы из двух магнитов ПМ1 и ПМ2 с учетом равенства их поперечных сечений

$$r_{nm} = y_{c(nm)} = \frac{\oint_{D_{nm1}} y dS_{nm1} + \oint_{D_{nm2}} y dS_{nm2}}{2S_{nm}} = R_{\text{вн}} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \left[R_{\text{вн}} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \text{ctg } \gamma + \frac{h_{nm}}{2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left[\frac{h_{nm}}{2 \cdot \text{ctg } \gamma} + \frac{d}{2} + \frac{b_{nm}}{2} \right] \right], \quad (4)$$

где d – ширина внутреннего мостика, $S_{nm} = b_{nm} \cdot h_{nm}$.

Радиус центра масс полюсного наконечника

$$r_{nn} = y_{c(nn)} = \frac{\oint_{D_1} y dS_1 + \oint_{D_2} y dS_2 + \oint_{D_3} y dS_3}{S_{D_1} + S_{D_2} + S_{D_3}}. \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \oint_{D_1} y dS_1 &= \frac{2}{3} \cdot (R_n^3 - R_{\text{вн}}^3) \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); \\ \oint_{D_2} y dS_2 &= \frac{2}{3} R_{\text{вн}}^3 \cdot \left[\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \cos^3\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right]; \\ \oint_{D_3} y dS_3 &= R_{\text{вн}}^3 \cdot \left[\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \text{ctg } \gamma - \frac{1}{3} \sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right) \text{ctg}^2 \gamma \right]. \end{aligned}$$

Площади поперечных сечений областей полюсного наконечника

$$S_1 = \frac{\alpha}{2} (R_n^2 - R_{\text{вн}}^2); \quad S_2 = \frac{R_{\text{вн}}^2 (\alpha - \sin \alpha)}{2}; \quad S_3 = R_{\text{вн}}^2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \text{ctg } \gamma.$$

Выражения (1)–(5) позволяют определить усилие, действующее на систему «магнит – наконечник», и его составляющие.

Для нахождения механических напряжений введем допущение о замене системы «постоянные магниты – полюсный наконечник» эквивалентным кольцом [13], имеющим плотность материала

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{(\rho_{nm} \cdot R_{nm} \cdot 2S_{nm} + \rho_{nn} \cdot R_{nn} \cdot S_{nn}) \cdot (1 - \cos(2\gamma))}{R_{\text{экв}} \cdot S_{\text{экв}}},$$

где $S_{nn} = S_1 + S_2 + S_3$ – площадь полюсного наконечника; $S_{\text{экв}} = S_1$ – площадь сектора эквивалентного кольца; $R_{\text{экв}} = \frac{R_n + R_{\text{вн}}}{2}$ – средний радиус эквивалентного кольца.

Окружное напряжение на эквивалентном кольце определяется выражением

$$\sigma_{\text{ц}} = R_{\text{экв}}^2 \omega^2 \rho_{\text{экв}}. \quad (6)$$

Формула (6) для оценки механических напряжений применима только в случае плавного изменения сечения мостиков. Так как в реальной конструкции ро-

тора форма сечения мостиков резко изменяется, возникают локальные высокие напряжения в местах соединения наружных мостиков и мостиков между разноименными полюсами, а максимальные механические напряжения на стыках наружных мостиков насыщения и мостиков между ПМ, имеющими разноименные полюса, можно определить по уравнению

$$\sigma_{\max} = \alpha_{\sigma} \sigma_{\psi}, \quad (7)$$

где α_{σ} – коэффициент концентрации напряжений.

Для нахождения α_{σ} при инженерных расчетах обычно пользуются руководством [14], согласно которому коэффициент концентрации напряжений определяется по кривым, соответствующим типовым геометрическим структурам. Однако с учетом того, что конфигурация полюса электрических машин с встроенными магнитами может иметь множество геометрических типов, оценка максимальных механических напряжений по выражению (7) не является универсальной, хотя вполне может быть использована на стадии оценочных расчетов и эскизного проектирования электрической машины с V-образными ПМ в роторе.

Предложенная здесь модель и метод расчета механических напряжений предполагает знание геометрических размеров индуктора, которые могут быть получены на этапе электромагнитного расчета электрической машины. Поэтому данный метод больше подходит для определения механической прочности ротора при поверочных расчетах генератора.

Аналитический метод расчета механических напряжений (модель 2)

При оптимизационном проектировании, когда приходится оперировать большими объемами данных, необходима простая модель, которая не требует точного знания конфигурации индуктора и ПМ в нем, но позволяет сделать заключение о пригодности конкретного варианта по механическим ограничениям.

При анализе сделано допущение о равномерном распределении составляющей силы F_1 и силы реакции полюсного наконечника $F_{\psi nn}$ по ширине системы двух V-образных ПМ. В рамках оценочного расчета механических напряжений, действующих на наружные мостики, были использованы аналитические зависимости, справедливые для балки с жестким защемлением на опорах и распределенной нагрузкой вдоль нее (рис. 4). Предполагается, что данная стандартная конструкция с точки зрения распределения сил и моментов наиболее близка к системе «V-образный постоянный магнит – полюсный наконечник».

Ширина полюсного наконечника от одного наружного мостика до другого

$$l = 2(R_n + R_{\psi n}) \sin \frac{\alpha}{2}.$$

После приведения геометрических размеров и нагрузок реальной полюсной системы к модели балки

$$c = 2b_{nm} \sin \gamma + d; \quad b = \frac{c}{2}; \quad g = \frac{F}{c},$$

получим выражение для расчета момента на опорах

$$M = M_A = M_B = -\frac{g \cdot c^2}{l^2} \cdot \left(b^3 - \frac{c^2}{12} \cdot b \right).$$

Опорные реакции

$$A = B = \frac{g \cdot c \cdot b}{l}.$$

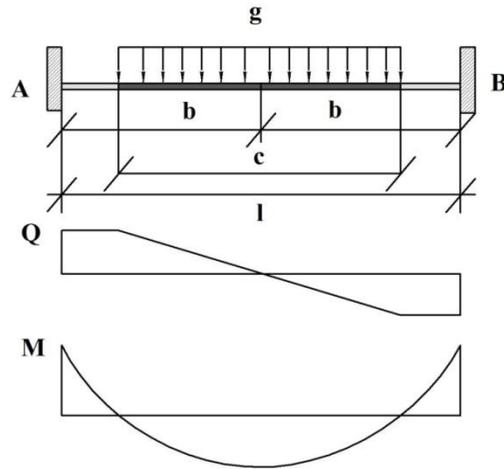


Рис. 4. Эпюры сил и моментов

Максимальное напряжение на изгиб в наиболее нагруженном сечении наружного мостика

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_z},$$

где $W_z = \frac{(R_n - R_{вн}) \cdot L^2}{6}$ – осевой момент сопротивления сечения балки; L – длина сердечника ротора.

Максимальное касательное напряжение на срез в наиболее нагруженном месте

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{A}{(R_n - R_{вн}) \cdot L}.$$

Центробежная сила действует под углом к оси наружных мостиков насыщения, что свидетельствует о наличии растягивающих напряжений. Таким образом, мостики насыщения одновременно работают на растяжение, изгиб и срез, а суммарное напряжение может быть уточнено при решении механической задачи методом численного моделирования.

Ввиду простоты данный метод не предъявляет специальных требований к объему памяти и быстродействию вычислительной техники.

Конечно-элементный анализ

Для подтверждения адекватности аналитических методик определения механических напряжений в элементах ротора *IPM* машины разработана геометрическая модель индуктора (рис. 5), которая в дальнейшем использовалась при решении прочностной задачи численного моделирования. Модель представляет собой часть окружности ротора, при этом используется граничное условие симметричности (поз. 6). На внутреннюю грань ротора наложено граничное условие, препятствующее перемещению в радиальном направлении, при этом разрешается

вращение. Источником механических напряжений является центробежная сила, которая задавалась условием *Rotational Velocity* с вращением относительно оси *z*. Сопряжение постоянных магнитов с сердечником ротора осуществлено с использованием контакта *Bonded* (поз. 3), что эквивалентно неразъемному соединению, и *Frictionless* – контакт без трения (поз. 5).

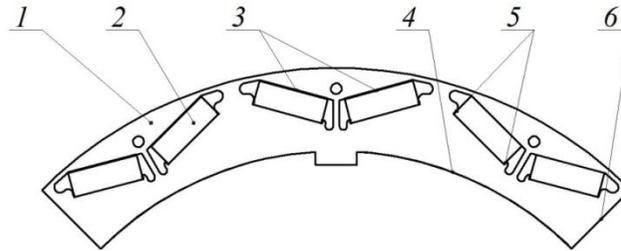


Рис. 5. Геометрическая модель прототипа ротора с встроенными магнитами

В процессе построения модели было уделено внимание концентрации напряжений на периферии наружных мостиков и в области резкого изменения сечения внутреннего мостика. Возможности вычислительного алгоритма весьма чувствительны к плотности сетки конечных элементов, поэтому в тех областях, где напряжения ожидалось максимальными, плотность сетки была увеличена.

В табл. 2 приведены параметры генератора с *IPM* индуктором, предназначенного для использования на электростанции собственных нужд, и некоторые конструктивные размеры его ротора.

Таблица 2

Параметры прототипа

Величина	Ед. изм	Значение
Номинальная мощность	кВт	300
Максимальная частота вращения	об/мин	6000
Внешний диаметр ротора	мм	300
Внутренний диаметр ротора	мм	240
Длина сердечника	мм	410
Высота магнита	мм	9
Ширина магнита	мм	26
Толщина наружного мостика	мм	1,8
Толщина внутреннего мостика	мм	2,2
Угол развертки магнитов	град	150

Результаты моделирования представлены на рис. 6.

При решении прочностной задачи также выявлена деформация элементов ротора, имеющая существенное влияние на электромагнитные характеристики и вибрацию генератора. Максимальная деформация составила $\Delta\varepsilon = 1,13 \cdot 10^{-5}$ м. Картина деформации полюса с V-образными ПМ показана на рис. 7.

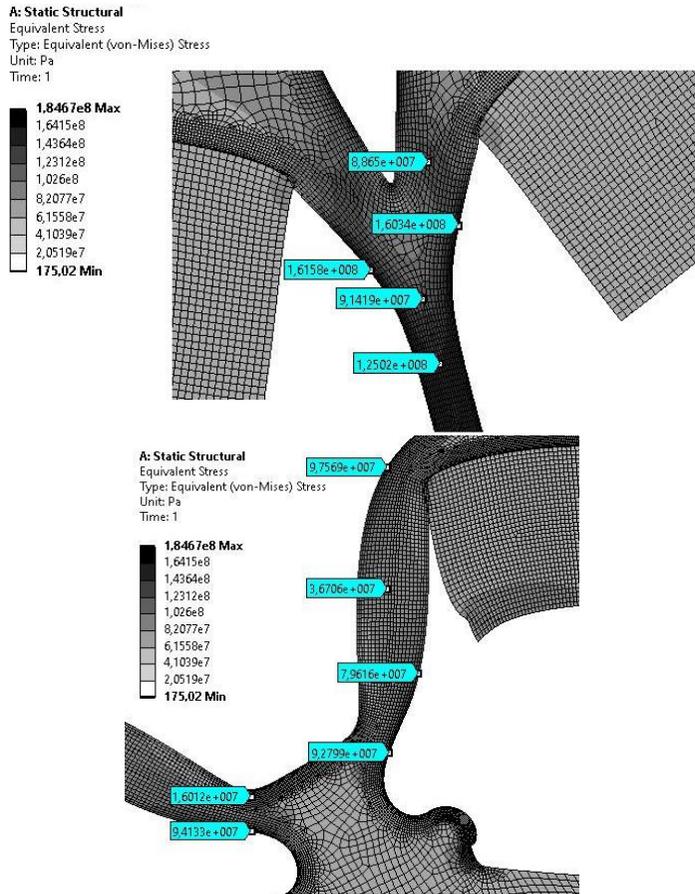


Рис. 6. Механические напряжения во внутреннем и наружном мостиках при частоте вращения 6000 об/мин

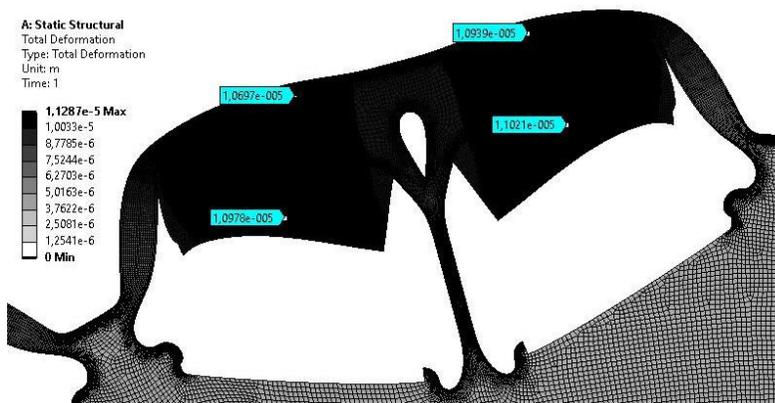


Рис. 7. Деформация ротора

Анализ результатов моделирования и их сравнение с аналитическим расчетом показали следующее:

– внутренний мостик нагружен больше, чем наружный. Средний уровень напряжений составил в нем $\sigma = 128 \dots 163$ МПа. Данная величина механических напряжений ниже границы текучести стали 2412 (180...240 МПа). Подобный показатель для наружного мостика $\sigma = 94 \dots 135$ МПа, что несколько меньше и также отвечает требованиям по прочности;

– механические напряжения в мостике, разделяющем магниты одноименного полюса, достигают величины 185 МПа, что входит в диапазон допустимых значений. В мостиках насыщения, разделяющих разноименные полюсы, максимальные напряжения достигают значения 133 МПа. Средние значения в рассмотренных конструктивных элементах ниже и составляют 120...128 МПа. Таким образом, величина максимальных напряжений при частоте вращения 6000 об/мин входит в диапазон допустимых значений и меньше величины временного сопротивления стали 2412 на разрыв;

– механические напряжения в наружных мостиках, рассчитанные по аналитической методике, близки к средним уровням их значений, найденных в результате конечно-элементного моделирования. Расхождение не превышает 10 %. Полученный результат указывает на то, что предложенный метод может быть использован для расчета механических напряжений в наружных мостиках при разных углах развертки V-образных ПМ.

Заключение

В данном исследовании предложена аналитическая методика оценки механических напряжений в роторе с V-образными встроенными магнитами. Результаты расчета механических напряжений были проверены посредством решения прочностной задачи методом конечных элементов в программном комплексе *Ansys Structural*. Установлено, что расхождения между аналитическими и численным методами при оценке прочности наружных мостиков насыщения не превышают 10 %, что указывает на возможность применения аналитических методик расчета механических напряжений ротора с встроенными ПМ для проверочных расчетов и оптимизационного проектирования с целью сокращения затрат времени и вычислительных ресурсов. Полученное расхождение можно объяснить неравномерным распределением плотности материала ПМ и полюсного наконечника на протяжении полюсного деления, чего не учитывают аналитические модели. Расчет средних механических напряжений внутренних мостиков и максимальных напряжений всех элементов ротора проводится МКЭ на стадии финишной доводки проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shen J., Qin Xu., Wang Yu.* High-Speed Permanent Magnet Electrical Machines – Applications, Key Issues and Challenges // *Ces Trans. on Elec. Machines and Systems*. 2018. Vol. 2. No. 1. Pp. 23–33. doi: 10.23919/TEMS.2018.8326449.
2. Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples / *G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, P. Guglielmi* // *IEEE Trans. on Ind. Appl.* 2012. Vol. 48. No. 6. Pp. 2322–2332. doi: 10.1109/TIA.2012.2227092.
3. *Han Z., Yang H., Chen Y.* Investigation of the rotor mechanical stresses of various interior permanent magnet motors // *Proc. ICEMS*. 2009. Pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382987.
4. Mechanical design considerations for conventionally-laminated, high-speed, interior PM synchronous machine rotors / *E.C. Lovelace, T.M. Jahns, T.A. Keim, J.H. Lang* // *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 40. No. 3. 2004. Pp. 806–812. doi: 10.1109/TIA.2004.827440.

5. *Смирнов А.Ю.* Особенности конструирования и анализа высокооборотных синхронных машин с постоянными магнитами на роторе // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2013. С. 231–235.
6. Analytical modeling of open-circuit air-gap field distributions in multisegment and multilayer interior permanent-magnet machines / *L. Zhu, S.Z., Jiang Z.Q. Zhu, C.C. Chan* // IEEE Trans. Magn. Vol. 45. No. 8. 2009. Pp. 3121–3130. doi: 10.1109/TMAG.2009.2019841.
7. Optimal design of IPM-PMASR motors for wide constant power speed range applications / *P. Guglielmi, E. Armando, G.M. Pellegrino, A. Vagati* // Proc. PCIM, Nuremberg, Germany. 2007. Vol. 1. Pp. 1–6.
8. *Iles-Klumpner D., Boldea I.* Comparative optimization design of an interior permanent magnet synchronous motor for an automotive active steering system // Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Aachen, Germany. 2004. Vol. 1. Pp. 369–375. doi: 10.1109/PESC.2004.1355772.
9. *Zeyin H., Haodong Y., Yangsheng Ch.* Investigation of the rotor mechanical stresses of various interior permanent magnet motors // Int. Conf. on Elec. Mach. and Syst., Tokyo. 2009. doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382987.
10. *Lee T., Kim D., Hong J.* Performance improvement by making holes of interior permanent magnet synchronous motor // Proc. ICEMS. 2009. Pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382877
11. *Cirani M., Eriksson S., Thunberg J.* Innovative Design for Flux Leakage Reduction in IPM Machines // IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 50. No. 3. 2014. Pp. 1847–1853. doi: 10.1109/TIA.2013.2289969.
12. <https://www.roscosmos.ru/2114/> (дата обращения 28.02.2024).
13. Analytical calculation of maximum mechanical stress on the rotor of the interior permanent-magnet synchronous machine / *G. Chu, R. Dutta, H. Lovatt, B. Sarlioglu, M.F. Rahman* // IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 56. No. 2. 2020. Pp. 1321–1331. doi: 10.1109/TIA.2019.2960756.
14. *Петерсон П.* Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.
15. *Ситин Д.А.* Магнитные системы синхронных электрических машин с редкоземельными постоянными магнитами и повышенной частотой вращения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 167 с.
16. *Zubkov Yu.V.* Mechanical strength of the rotor with internal permanent magnets // 2021 Int. Conf. on Elec. Comp. and Syst. (ICOECS), Ufa, 16–18 Nov. 2021. doi 10.1109/ICOECS52783.2021.9657430.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2024 г.

NUMERICAL AND ANALYTICAL CALCULATION OF THE ROTOR MECHANICAL STRESSES OF A SYNCHRONOUS ELECTRIC FLUX MACHINE WITH INCORPORATED PERMANENT MAGNETS*

Yu.V. Zubkov, D.A. Vladimirov, I.H. Biktashev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zub577@mail.ru, devladimirovdenis@yandex.ru, irshat.biktashev@bk.ru

Abstract. *This paper proposed methods for determining mechanical stresses in the inductor of a synchronous electric machine with magneto-electric excitation and incorporated V-shaped permanent magnets, intended for use as an auxiliary generator of a gas compressor station driven by a gas turbine engine. Along with the advantages: high energy efficiency, large electromagnetic torque and specific power, the ability to create a small airgap between the stator and the rotor, machines with such an inductor design have a significant drawback - large magnetic flux dissipation in the area of external and internal saturation bridges, which is all the more significant as the bridges are wider. To decrease leakage fluxes and ensure acceptable energy performance, it is desirable to reduce the width of the bridges, but this weakens the mechanical strength of the rotor.*

Analytical models of two levels are proposed for assessing mechanical stresses in the inductor design, on the basis of which the configuration option for permanent magnets and rotor pole pieces is selected. The first level model assumes knowledge of the inductor geometric dimensions, which can be obtained at the stage of the electric machine electromagnetic calculation. Therefore, it is more suitable for the estimated calculation of mechanical stresses on external bridges. The second-level model was obtained using analytical dependencies based on the analogy of a magnet-pole tip system with a beam with rigid clamping on supports and a distributed load along it. It is suitable for determining mechanical strength during optimization design, when it is necessary to operate with large volumes of data.

The results of calculating mechanical stresses using analytical models are checked and refined by solving the strength problem using the finite element method in the Ansys Structural software package.

Keywords: *electric machine, incorporated permanent magnets, rotor, mechanical strength, analytical technique, finite element analysis*

REFERENCES

1. Shen J., Qin Xu., Wang Yu. High-Speed Permanent Magnet Electrical Machines – Applications, Key Issues and Challenges // *Ces Trans. on Elec. Machines and Systems*. 2018. Vol. 2. No. 1. Pp. 23–33. doi: 10.23919/TEMS.2018.8326449.
2. Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples / G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, P. Guglielmi // *IEEE Trans. on Ind. Appl.* 2012. Vol. 48. No. 6. Pp. 2322–2332. doi: 10.1109/TIA.2012.2227092.
3. Han Z., Yang H., Chen Y. Investigation of the rotor mechanical stresses of various interior permanent magnet motors // *Proc. ICEMS*. 2009. Pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382987.



© The Author(s), 2024

*Yuri V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Denis A. Vladimirov, Engineer.

Irshat H. Biktashev, Postgraduate Student.

4. Mechanical design considerations for conventionally-laminated, high-speed, interior PM synchronous machine rotors / *E.C. Lovelace, T.M. Jahns, T.A. Keim, J.H. Lang* // IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 40. No. 3. 2004. Pp. 806–812. doi: 10.1109/TIA.2004.827440.
5. *Smirnov A.Yu.* Osobennosti konstruirovaniya i analiza visokooborotnykh sinhronnykh mashin s postoyannymi magnitami na rotore [Features of the design and analysis of high-speed synchronous machines with permanent magnets on the rotor] // Proceedings of R.E. Alekseev NSTU. 2013. Pp. 231–235. (In Russian).
6. Analytical modeling of open-circuit air-gap field distributions in multisegment and multilayer interior permanent-magnet machines / *L. Zhu, S.Z., Jiang Z.Q. Zhu, C.C. Chan* // IEEE Trans. Magn. Vol. 45. No. 8. 2009. Pp. 3121–3130. doi: 10.1109/TMAG.2009.2019841.
7. Optimal design of IPM-PMASR motors for wide constant power speed range applications / *P. Guglielmi, E. Armando, G.M. Pellegrino, A. Vagati* // Proc. PCIM, Nuremberg, Germany. 2007. Vol. 1. Pp. 1–6.
8. *Iles-Klumpner D., Boldea I.* Comparative optimization design of an interior permanent magnet synchronous motor for an automotive active steering system // Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Aachen, Germany. 2004. Vol. 1. Pp. 369–375. doi: 10.1109/PESC.2004.1355772.
9. *Zeyin H., Haodong Y., Yangsheng Ch.* Investigation of the rotor mechanical stresses of various interior permanent magnet motors // Int. Conf. on Elec. Mach. and Syst., Tokyo. 2009. doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382987.
10. *Lee T., Kim D., Hong J.* Performance improvement by making holes of interior permanent magnet synchronous motor // Proc. ICEMS. 2009. Pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382877
11. *Cirani M., Eriksson S., Thunberg J.* Innovative Design for Flux Leakage Reduction in IPM Machines // IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 50. No. 3. 2014. Pp. 1847–1853. doi: 10.1109/TIA.2013.2289969.
12. <https://www.roscosmos.ru/2114/> (дата обращения 28.02.2024).
13. Analytical calculation of maximum mechanical stress on the rotor of the interior permanent-magnet synchronous machine / *G. Chu, R. Dutta, H. Lovatt, B. Sarlioglu, M.F. Rahman* // IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 56. No. 2. 2020. Pp. 1321–1331. doi: 10.1109/TIA.2019.2960756.
14. *Peterson R.* Koeffitsienty koncentracii napryazheniy [Stress concentration factors]. M.: Akademiya. 1977. 302 p. (In Russian).
15. *Sityn D.A.* Magnitnyy sistemy sinhronnykh elektricheskikh mashin s redkozemelnimi postoyannymi magnitami i povishennoi chastotoyi vrashcheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 2009. 167 p. (In Russian).
16. *Zubkov Yu.V.* Mechanical strength of the rotor with internal permanent magnets // 2021 Int. Conf. on Elec. Comp. and Syst. (ICOECS), Ufa, 16–18 Nov. 2021. doi 10.1109/ICOECS2783.2021.9657430.

Original article submitted 13.03.2024

УДК 681.518

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ*

К.С. Пешкин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке проблемно-ориентированной численной модели процесса зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки. Проанализирован рынок программных продуктов (ПП) для численного решения задач различной физической природы и обоснован выбор наиболее универсального пакета для решения взаимосвязанных тепловой и электромагнитной задач – ПП ANSYS Mechanical APDL. Приведены ключевые для решения поставленной задачи функции и конкурентные преимущества программного пакета. Подробно рассмотрены последовательные этапы построения осесимметричной модели трехсекционной нагревательной установки: присвоение постоянных и нелинейных физических свойств материалов заготовки и индуктора; задание конструктивных и режимных характеристик системы «заготовка – индуктор» в параметрическом виде; построение осесимметричной геометрической модели системы; реализация возможности автономного управления токами секций индуктора; определение и присвоение конечных элементов; наложение конечно-элементной сетки, задание начальных и граничных условий. Приведен анализ результатов моделирования. Реализованная численная модель процесса зонного индукционного нагрева ориентирована на интеграцию в специальную оптимизационную процедуру, основанную на альтернативном методе параметрической оптимизации и направленную на снижение отклонений результирующих температурных распределений от требуемого профиля, оцениваемых в равномерной метрике.

Ключевые слова: Зонный индукционный нагрев, программный пакет, ANSYS Mechanical APDL, метод конечных элементов, краевые условия, численная модель

Введение

Термическая обработка металлических заготовок является обязательным этапом перед операциями их пластической деформации в промышленном производстве. Основной целью термообработки деталей является изменение их механических свойств, таких как твердость, прочность и упругость, а также устранение опасных напряжений в структуре металла, которые могут привести к короблению и образованию трещин на последующих стадиях обработки изделия.



© Автор(ы), 2024

*Кирилл Сергеевич Пешкин, аспирант кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов»

Для термической обработки больших партий металлических полуфабрикатов часто применяют электротермические способы термообработки, в частности процесс индукционного нагрева, имеющий очевидные преимущества перед типовыми пламенными способами нагрева [1, 2, 3–5].

Отличительной особенностью индукционной термообработки являются широкие возможности гибкого управления и оптимизации процесса, позволяющие повысить эффективность нагрева за счет достижения экстремальных значений критерия оптимальности. Проблемы оптимизации процесса индукционного нагрева по типовым критериям качества, сводящиеся к поиску оптимальных значений конструкционных и режимных параметров индукционных нагревательных установок (ИНУ), рассматриваются в работах А.Г. Бутковского, В.С. Немкова, Ю.В. Егорова, Э.Я. Рапопорта, Л.С. Зимина, А.И. Данилушкина, П. Ди Барбы, Б. Наке, М. Форзана, Э. Бааке, М.Ю. Лившица, Ю.Э. Плешивцевой, В.Б. Демидовича и др. [1, 6–11].

Для анализа качества процессов индукционного нагрева применяются современные программные пакеты, позволяющие проводить численный конечно-элементный анализ сложных нелинейных мультифизических задач. Пакеты, связанные с анализом электромагнитных и температурных полей, позволяют решать систему взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье, описывающую процесс индукционного нагрева [12]. Численная модель индукционной нагревательной системы «заготовка – индуктор» строится на основе конкретных конструктивных и режимных параметров и учитывает теплофизические свойства материалов, условия взаимодействия с окружающей средой и иные факторы, влияющие на процесс нагрева.

В статье приводится статистический анализ использования программного пакета (ПП) ANSYS для численного моделирования физических процессов и рассматривается процесс построения проблемно-ориентированной численной модели процесса зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки, разрабатываемой для решения задачи оптимального управления и проектирования зонной ИНУ. Рассматриваются специфические особенности построения модели, связанные с реализацией возможности автономного управления секциями индуктора. На основе полученных результатов численного моделирования поставлены задачи на следующие работы.

Численная модель зонной индукционной установки предлагает большие возможности для инженерного анализа и оптимизации процесса нагрева стальной заготовки под обработку давлением [13, 14]. Кроме того, она может стать основой для создания цифрового двойника, являющегося одним из основных элементов сложных автоматизированных интеллектуальных систем управления технологическими процессами и киберфизических промышленных систем [15].

Содержательная постановка задачи исследования

В сфере современного промышленного производства большое внимание уделяется совершенствованию и оптимизации технологических процессов с целью сокращения затрат материальных и энергетических ресурсов и повышения качества конечных продуктов. В частности, в области промышленного применения технологий индукционного нагрева стремление к инновациям проявляется в разработке методов достижения специфических температурных профилей для различных видов продукции. Эта тенденция позволяет перейти от традиционной

практики равномерного нагрева к более целенаправленному и эффективному способу, известному как зонный индукционный нагрев.

Особенность зонного индукционного нагрева заключается в интенсивном нагреве определенных участков заготовки, подвергаемых в дальнейшем операциям пластической деформации. При этом остальные участки заготовки нагреваются до некоторой меньшей температуры для предотвращения коробления металла и образования трещин. Таким образом, основной задачей зонной ИНУ является точная локализация процесса нагрева для достижения заданного температурного профиля [16]. Промышленное применение методики зонного индукционного нагрева позволяет с высокой точностью контролировать требуемое температурное распределение по объему заготовки, что существенно сказывается на экономии материальных и энергетических ресурсов при повышении качества конечной продукции.

В настоящем исследовании рассматривается процесс зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки (рис. 1, *а*) в трехсекционном индукторе (рис. 1, *в*). По длине стальной заготовки определены три зоны нагрева – ДУ1, ДУ2, ДУ3 и переходные зоны ПЗ между участками, которые напрямую не нагреваются (рис. 1, *б*). Зону ДУ2 требуется нагреть до температуры 1250 °С с допустимым отклонением температуры ± 30 °С, поскольку предполагается, что в дальнейшем именно этот участок будет подвергаться операциям пластической деформации. Центральную зону ДУ1 (теплоизолированный центр заготовки) и зону ДУ3 (наиболее близкую к торцу заготовки) требуется нагреть до температуры 950 °С с допустимым отклонением температуры ± 30 °С (см. рис. 1, *б*) для сохранения температурного перепада по длине заготовки. При этом должны соблюдаться технологические ограничения на максимальную температуру нагрева стальной заготовки (1350 °С – температура плавления стали) и минимальную температуру нагрева заготовки перед операциями пластической деформации (700 °С – температура, по достижении которой снимаются внутренние напряжения) [17].

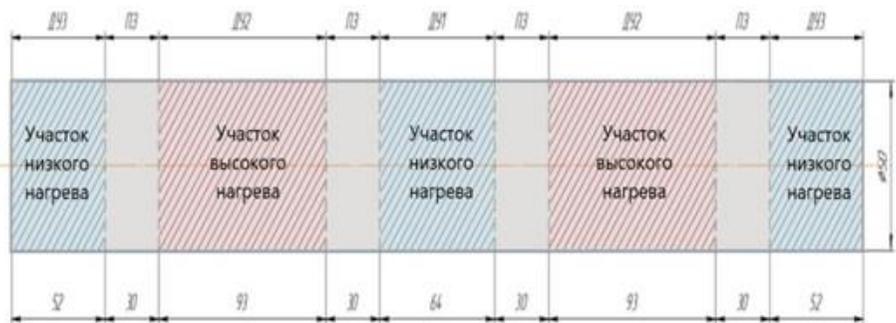
Для достижения заданного конечного, неравномерного по длине заготовки температурного распределения проектируется зонная ИНУ, которая представляет собой индуктор с тремя независимыми секциями (см. рис. 1, *в*). Каждая секция индуктора характеризуется набором параметров: длиной секции L_i , числом равномерно расположенных вдоль секции витков N_i и подведенным к этим виткам питающим током I_i .

Целью настоящего исследования является разработка численной модели процесса зонного индукционного нагрева ориентированной на анализ процесса и реализацию процедуры оптимизации конструктивных и режимных параметров ИНУ, направленной на достижение требуемого конечного температурного распределения на поверхности стальной заготовки (см. рис. 1, *б*) с максимальной точностью. Выбор программного пакета и построение численной модели процесса зонного индукционного нагрева подробно описаны далее.

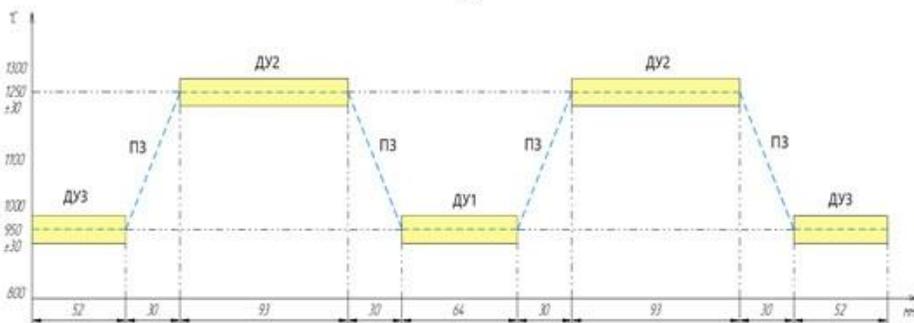
Современные программные пакеты для численного моделирования

В настоящее время на рынке программного обеспечения представлен большой выбор пакетов численного моделирования, предназначенных для инженерного анализа и опытно-конструкторских расчетов. В большинстве программных пакетов реализуется метод конечных элементов (МКЭ), который представляет

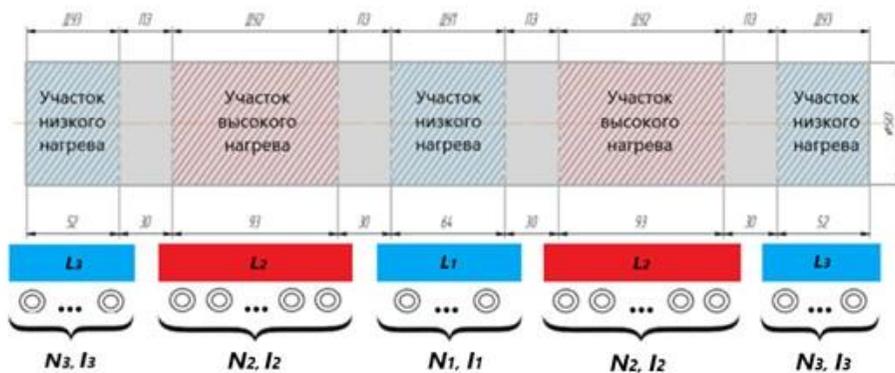
собой наиболее распространенный способ анализа дифференциальных уравнений в частных производных при решении широкого спектра инженерных задач, включая, но не ограничиваясь исследованиями в области механики деформируемого твердого тела, теплопередачи, гидродинамики и электромагнетизма [18].



а)



б)



в)

Рис. 1. Исходные данные для задачи исследования:

а – стальная цилиндрическая заготовка;

б – требуемое конечное температурное распределение; *в* – зонный индуктор

Подробный анализ программных пакетов численного моделирования физических процессов, актуальных для решения инженерных задач различной степе-

ни сложности, представлен в [19]. При выборе ПП для численного моделирования необходимо исходить из требований решаемой задачи, учитывая основные функциональные возможности программных пакетов, к которым относятся типы решаемых физических задач, возможности геометрического проектирования, особенности задания физических свойств материала, архитектура ПП и возможность его интеграции в другие программные средства.

Исходя из содержательной постановки задачи исследования, определенной в предыдущем пункте, на основе сравнительного анализа в [19] ПП ANSYS выбран в качестве инструмента для построения численной модели индукционной установки зонного нагрева, ориентированной на последующее использование при решении задач оптимизации. ANSYS представляет собой многоцелевой программный пакет для численного моделирования физических процессов и явлений в области механики, динамики жидкостей и газов, теплофизики, электромагнетизма и акустики [20]. Он обладает широкими функциональными возможностями для численного моделирования процессов индукционного нагрева: решением совмещенных электромагнитной и тепловой задач, моделированием кинематического движения, проведением статических и динамических расчетов, выбором различных типов конечных элементов, заданием нелинейных свойств материалов, геометрическим проектированием в 2D/3D-областях, наличием встроенного алгоритмического языка APDL (на базе языка FORTRAN), интеграцией с другими программными средствами с использованием специальных команд.

ANSYS.Inc является одним из крупнейших продавцов на рынке CAE продуктов (Computer-Aided Engineering – систем для расчета, анализа и моделирования физических процессов), что подтверждается статистическим анализом. На рис. 2, а представлены ключевые финансово-экономические показатели ANSYS.Inc, которые отражают эффективность коммерческой деятельности компании. Исходя из приведенных данных, ANSYS.Inc имеет средний ежегодный прирост в выручке 11,9 %, в EBITDA – 8,2 % и в чистой прибыли – 12,6 %, что характеризует ANSYS.Inc не только как эффективную, но и как развивающуюся компанию. Коммерческая деятельность ANSYS.Inc характеризуется постоянным расширением рынка сбыта и информационной поддержки, что подтверждается присутствием офисов компании более чем в 25 странах мира и постоянно растущим штатом сотрудников (рис. 2, в). Среди потребителей продуктов ANSYS.Inc выделяются такие крупные производители, как Exxon, Caterpillar, General Electric, Siemens и т. д. (рис. 2, б). Наличие таких крупных мировых потребителей ПП Ansys характеризует данный пакет программ как высококачественный и многофункциональный продукт, позволяющий решать широкий спектр инженерных задач различной степени сложности. Кроме того, ПП Ansys постоянно совершенствуется и дополняется новыми модулями и функциями, реализуемыми в периодически выходящих новых версиях продукта (рис. 2, з).

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что ANSYS представляет собой в достаточной степени универсальный и надежный программный пакет, обладающий подробными официальными и пользовательскими руководствами и позволяющий решать взаимосвязанные электромагнитные и тепловые задачи. Ниже подробно рассматривается процесс построения проблемно-ориентированной численной модели зонной индукционной нагревательной установки (см. рис. 1, в).

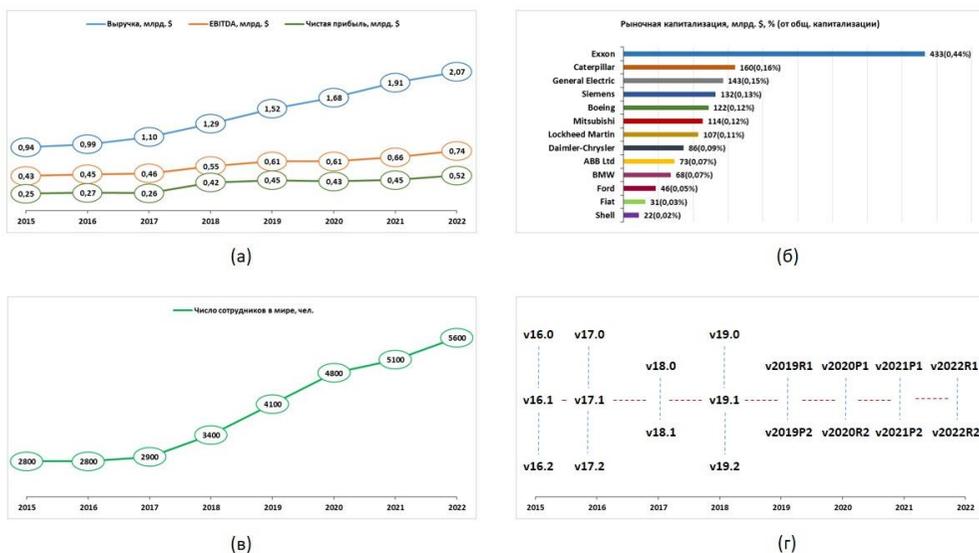


Рис. 2. Статистический анализ ПП ANSYS: *a* – ключевые финансовые показатели ANSYS, Inc [21]; *б* – основные потребители ПП ANSYS [22]; *в* – число сотрудников в ANSYS, Inc [21]; *г* – версии ПП ANSYS за период 2015–2022 гг.

Численное моделирование процесса зонного индукционного нагрева в ПП Ansys Mechanical APDL

Процесс индукционного нагрева представляет собой сложное явление, основанное на принципе электромагнитной индукции, генерирующей вихревые токи в материале и вызывающей его нагрев из-за Джоулева тепла. В общем виде математическая модель периодического процесса индукционного нагрева может быть представлена системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье, описывающей поведение электромагнитного и теплового полей и дополненной краевыми условиями [1]:

$$\left. \begin{aligned}
 \operatorname{rot} \vec{H} &= \sigma(T(\vec{x}; t)) \vec{E}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\
 \operatorname{div} \vec{B} &= 0; \operatorname{div} \vec{E} = 0; \\
 \vec{D} &= \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}; \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}; \vec{J} = \sigma \vec{E}; \\
 \alpha(T(\vec{x}; t)) \frac{\partial T(\vec{x}; t)}{\partial t} &= \operatorname{div}(\beta(T(\vec{x}; t)) \operatorname{grad} T(\vec{x}; t)) + F(\vec{x}; T(\vec{x}; t); u); \\
 t &\in (0; \tau^0); \vec{x}(x, y); T(\vec{x}; 0) = T_0(\vec{x}).
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля; $\sigma(T)$ – электрическая проводимость; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; \vec{D} – вектор плотности электрического потока; t – время; \vec{B} – вектор плотности магнитного потока; $T(\vec{x}; t)$ – пространственно-временное распределение температуры; $\vec{x}(x, y)$ – вектор пространственных координат; $\alpha(T(\vec{x}; t))$ – коэффициент тепло-

отдачи в окружающую среду; $\beta(T(\bar{x};t))$ – коэффициент теплопроводности; $F(\bar{x};T(\bar{x};t);u)$ – удельная мощность внутренних электромагнитных источников тепла; $u(\bar{x};t)$ – управляющее воздействие; $T_0(\bar{x})$ – начальное пространственное распределение температуры; τ^0 – время окончания процесса нагрева [1].

Процесс численного моделирования в ANSYS Mechanical APDL [26] может быть выполнен с использованием двух платформ на выбор пользователя: встроенного графического интерфейса программного пакета или специализированного программного языка ANSYS APDL.

В общем случае процесс построения модели зонного индукционного нагрева можно условно представить в виде следующих этапов:

- выбор типа решаемой задачи;
- задание физических свойств материалов;
- проектирование геометрической модели системы «индуктор – заготовка»;
- определение типов конечных элементов;
- присвоение соответствующих свойств областям и элементам;
- формирование конечно-элементной сетки;
- задание начальных и граничных условий,

после которых происходит итерационное решение задач электромагнитного и теплового анализа (рис. 3) [24].



Рис. 3. Последовательность решения задачи численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева

Исходными данными для численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева являются физические свойства материалов, к которым относятся материал заготовки и материал витков индуктора (медь). Заготовка выполнена из стали марки С45, химический состав которой приведен в табл. 1. Данный тип стали относится к конструкционным углеродистым качественным

сталям, отличающимся хорошей физической устойчивостью к интенсивным нагрузкам, трениям и ударам, резистивностью к агрессивным погодным условиям и перепадам температур, отсутствием отпускной хрупкости и т. д. [25]. Химический состав стали С45 обеспечивает описанные выше эксплуатационные преимущества изделий и обуславливает физические свойства стали, заданные в виде постоянных или нелинейных параметров и представленные в табличной форме (табл. 2, 3) и графическом виде (рис. 4, 5).

Таблица 1

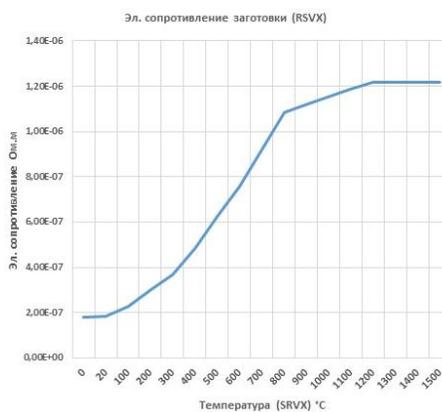
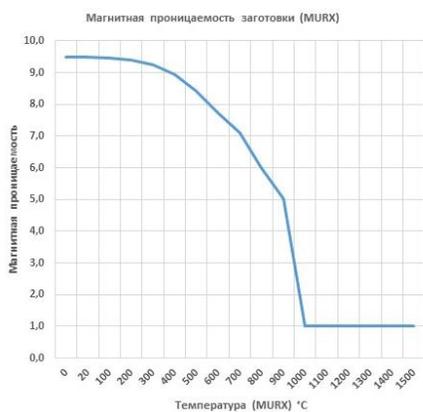
Химический состав стали марки С45

Класс стали	Марка	Доля элементов, %							
		С	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
					Не более				
Нелегированные специальные	45	0.42–0.50	0.17–0.37	0.50–0.80	0.03	0.035	0.25	0.3	0.3

Таблица 2

Физические свойства стали марки С45 и меди для решения электромагнитной задачи

Температура (MURX) °С	Магнитная проницаемость заготовки (MURX), [1]	Магнитная проницаемость проводника (MURX), [1]	Температура (RSVX) °С	Электрическое сопротивление заготовки (RSVX), [Ом·м]	Электрическое сопротивление проводника (RSVX), [Ом·м]
0	9.5	1.0	0	1.80E-07	2.0e-8
20	9.5		20	1.85E-07	
100	9.5		100	2.27E-07	
200	9.4		200	2.99E-07	
300	9.2		300	3.70E-07	
400	9.0		400	4.85E-07	
500	8.4		500	6.25E-07	
600	7.7		600	7.57E-07	
700	7.1		700	9.22E-07	
800	6.0		800	1.09E-06	
900	5.0		900	1.12E-06	
1000	1.0		1000	1.15E-06	
1100	1.0		1100	1.19E-06	
1200	1.0		1200	1.22E-06	
1300	1.0		1300	1.22E-06	
1400	1.0		1400	1.22E-06	
1500	1.0		1500	1.22E-06	



а)

б)

Рис. 4. Электромагнитные свойства стали С45:

а – зависимость магнитной проницаемости от температуры;

б – зависимость электрического сопротивления от температуры

Таблица 3

Физические свойства стали С45 для решения тепловой задачи

Температура (KXX) °C	Теплопроводность, (KXX), [Вт/м.°K]	Температура (C) °C	Удельная теплоемкость, (C), [Дж/кг.°K]	Плотность (DENS), [кг/м ³]	Коэффициент конвективной теплоотдачи, (AlphaSteel), [Вт/(м ² K)]	Коэффициент теплоотдачи излучением, (EmisSteel), [1]
20	48.0	20	474.6	7800	5.0	0.85
100	47.2	100	487.9			
200	45.8	200	501.2			
300	42.5	300	523.4			
400	39.1	400	545.7			
500	35.4	500	573.8			
600	31.7	600	601.8			
700	27.6	700	649.1			
800	23.5	800	696.3			
900	25.1	900	693.8			
1000	26.6	1000	691.3			
1100	28.0	1100	688.8			
1200	29.3	1200	686.3			
1300	29.7	1300	686.0			
1400	30.0	1400	686.0			
1500	30.0	1500	686.0			

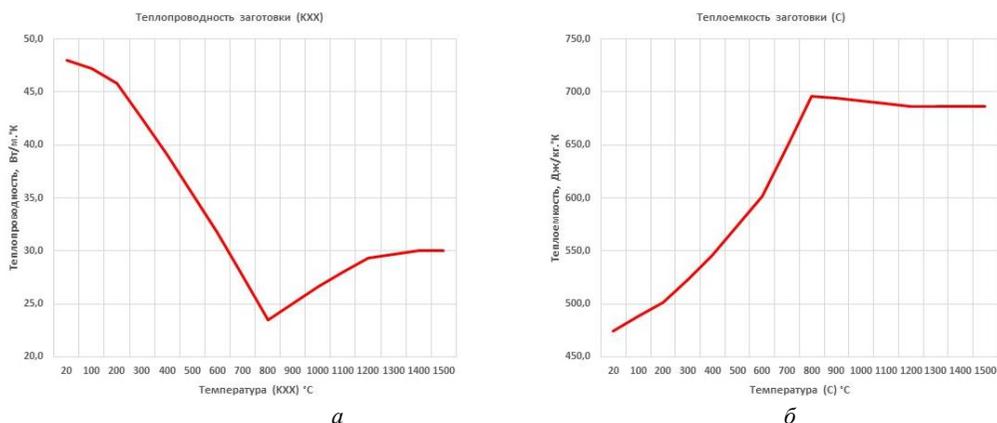


Рис. 5. Теплофизические свойства стали С45:
а – зависимость теплопроводности от температуры;
б – зависимость теплоемкости от температуры

После задания теплофизических и электромагнитных свойств материалов проектируется двумерная осесимметричная геометрическая модель системы «заготовка – индуктор» (рис. 6, *а*), которая включает цилиндрическую заготовку, три секции индуктора (с равномерно расположенными на них витками) и окружающую среду (воздух), область которой впоследствии определяется таким образом, чтобы ее увеличение не повлияло на точность решения тепловой задачи.

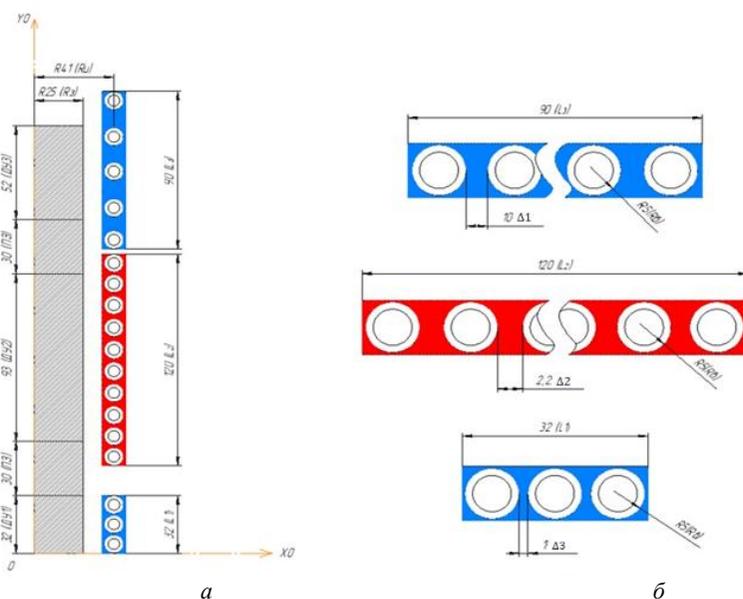


Рис. 6. Схематичное изображение геометрической модели системы «заготовка – индуктор»:
а – общий вид системы; *б* – секции индуктора

Рассматриваемая в работе осесимметричная заготовка (см. рис. 1, *a*), характеризующаяся длиной L_3 , равной сумме длин зон нагрева (ДУ1, ДУ2, ДУ3) и переходных зон ПЗ, и диаметром D_3 , проектируется таким образом, чтобы горизонтальная ось Х0 и вертикальная ось Y0 являлись осями симметрии. В таком случае рассматривается только четверть системы «заготовка – индуктор», что существенно снижает требования к вычислительным мощностям ЭВМ и ускоряет процесс численного моделирования в ANSYS Mechanical APDL за счет сокращения числа узлов сеточного разбиения и количества конечных элементов.

Разрабатываемая численная модель ориентирована на её последующее использование в процедуре решения оптимизационной задачи, обеспечивающей достижение заданного конечного температурного распределения на поверхности заготовки (см. рис. 1, *б*) с максимальной точностью. Это проявляется в специфических требованиях к проектированию ИНУ. В соответствии с заданным неравномерным температурным профилем проектируется трехсекционный индуктор (рис. 6, *б*), каждая секция которого характеризуется собственным набором параметров: длиной секции (L_1, L_2, L_3), числом равномерно расположенных в пределах каждой секции витков (N_1, N_2, N_3) и значением питающего тока (I_1, I_2, I_3).

Исходя из равномерного расположения витков вдоль секций (см. рис. 6, *б*) рассчитывается расстояние между витками Δ_i , которое зависит от числа витков в секции N_i , длины секции L_i и радиуса витков R_B :

$$\Delta_i = \frac{L_i - (N_i \times 2R_{Bi})}{N_i - 1}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

В отличие от известных моделей [26], где на секции индуктора подается общий ток I источника питания, т. е. $I_1 = I_2 = I_3 = I$, в настоящей модели реализуется возможность автономного управления токами для каждой секции индуктора. Такое построение модели открывает большие возможности при локальном управлении, контроле и оптимизации процесса зонного индукционного нагрева. Помимо задания значений токов (I_1, I_2, I_3) необходимо присвоить их элементам и узлам геометрической модели, что реализуется с использованием кодов, написанных на встроенном параметрическом языке ANSYS APDL.

В связи с тем, что проектируемая геометрическая модель является осесимметричной, возникает особенность в присвоении тока виткам первой секции индуктора. В случае, когда при осесимметричном рассмотрении первой секции L_1 число витков N_1 представляется дробным значением (при симметричном делении длины L_1 и числа витков N_1 пополам), значение N_1 округляется до целого числа. На рис. 7 и 8 представлены программные коды, реализующие присвоение токов элементам и узлам геометрической модели в случаях целочисленного и дробного значений N_1 соответственно.

Описанные выше характеристики процесса зонного индукционного нагрева, к которым относятся геометрические размеры системы «заготовка – индуктор», начальные и краевые условия, режимные параметры, задаются в параметрическом виде с помощью ANSYS APDL. Параметрическая форма позволяет оперативно изменять характеристики системы «заготовка – индуктор», вследствие чего пропадает необходимость полной перестройки модели. Исходные данные для

численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки представлены в табл. 4.

```

*IF,modulo1,EQ,0,THEN

*DO,inkrem_curr,1,((N3)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO

*DO,inkrem_curr,1,((N2)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentmM_r,currentmM_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO

*DO,inkrem_curr,1,((N1)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO

```

Рис. 7. Присвоение автономных токов элементам модели в случае целочисленного значения N_1

```

*ELSEIF,modulo1,NE,0,THEN

*DO,inkrem_curr,1,((N3)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO
  inkrem_curr=inkrem_curr+8

*DO,inkrem_curr,2,1,%,N1-0.5%,1
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  inkrem_curr=inkrem_curr+8
  *ENDDO
*ENDIF

```

Рис. 8. Присвоение автономных токов элементам модели в случае дробного значения N_1

**Исходные данные для численного моделирования процесса
зонного индукционного нагрева**

№	Наименование параметра	Значение
1	Начальная температура заготовки, $T_{нач}$, °С	20
2	Длительность стадии индукционного нагрева, τ^0 , с	20
3	Требуемая температура нагрева участков ДУ1 и ДУ3, $T_{1,3}$, °С	950
4	Требуемая температура нагрева участков ДУ2, T_2 , °С	1250
5	Критическая температура заготовки, $T_{кр}$, °С	1350
6	Длина заготовки, L_3 , мм	237
7	Радиус заготовки, R_3 , мм	25
8	Конструкционная углеродистая качественная сталь, (марка)	C45
9	Частота тока индуктора, f , Гц	527
10	Шаг расчета модели, с	1
11	Длина первого участка нагрева, ДУ1, мм	32
12	Длина второго участка нагрева, ДУ2, мм	93
13	Длина третьего участка нагрева, ДУ3, мм	52
14	Длина переходной зоны, ПЗ, мм	30
15	Длина первой секции индуктора, L_1 , мм	35
16	Длина второй секции индуктора, L_2 , мм	128
17	Длина третьей секции индуктора, L_3 , мм	64
18	Число витков на первой секции индуктора, N_1 , шт	2
19	Число витков на второй секции индуктора, N_2 , шт	12
20	Число витков на третьей секции индуктора, N_3 , шт	4
21	Расстояние между витками первой секции индуктора, Δ_1 , мм	13
22	Расстояние между витками второй секции индуктора, Δ_2 , мм	0.5
23	Расстояние между витками третьей секции индуктора, Δ_3 , мм	5.5
24	Радиус индуктора, R_{II} , мм	94
25	Радиус витков индуктора, R_B , мм	5
26	Сила тока витков первой секции индукторов, I_1 , А	4744
27	Сила тока витков второй секции индукторов, I_2 , А	4744
28	Сила тока витков третьей секции индукторов, I_3 , А	4744

После задания исходных для ранее построенной геометрической модели данных необходимо сгенерировать конечно-элементную сетку, для чего осуществляется выбор и присвоение типов конечных элементов (КЭ), требуемых для решения задач анализа. Библиотека элементов ANSYS обладает широким набором типов конечных элементов для анализа полей различной физической природы [26]. Выбор КЭ обуславливается спецификой решаемых задач, так как уникальность каждого конечного элемента в библиотеке определяется двумя основными свойствами элементов: числом степеней свободы, определяющим тип решаемой задачи, и формой (размерностью) конечного элемента.

Процесс индукционного нагрева, представляющий собой взаимодействие электромагнитного и теплового полей, описывается уравнениями Максвелла и Фурье (1), что напрямую влияет на выбор типов конечных элементов при построении численной модели. Для решения тепловой задачи библиотека ANSYS предлагает тип конечного элемента PLANE13, для электромагнитной задачи – PLANE55 [26].

КЭ типа PLANE13 используется в решении двумерных взаимосвязанных задач магнитной, электрической, тепловой природы и механики сплошных сред. Он определяется четырьмя узлами с четырьмя степенями свободы на каждый узел (рис. 9, а). КЭ PLANE13 позволяет моделировать зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля (кривые В-Н) и обладает высоким потенциалом жесткости при изгибе и напряжении [26, 13].

КЭ типа PLANE55 используется в решении двумерных задач теплопроводности как плоский или осесимметричный кольцевой элемент. Он определяется четырьмя узлами с одной степенью свободы на каждый узел (рис. 9, б). В основном его применяют для двумерного стационарного или переходного теплового анализа [26, 13].

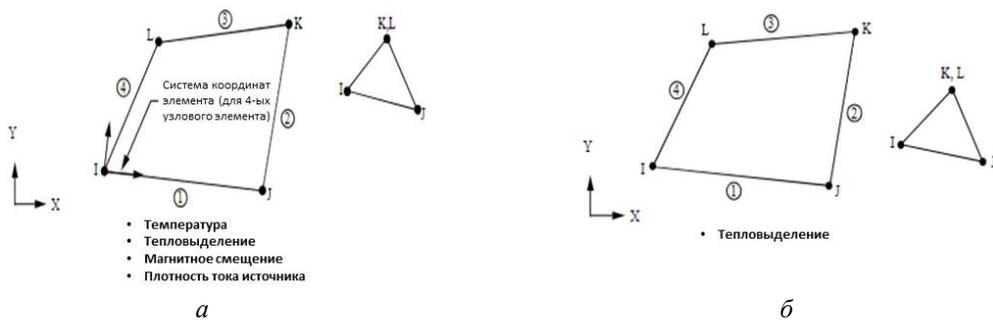


Рис. 9. Схематичное изображение КЭ численной модели процесса зонного индукционного нагрева:
а – КЭ типа PLANE13; б – КЭ типа PLANE55

После определения типов КЭ на геометрическую модель накладывается четырёхугольная конечно-элементная сетка и все области геометрической модели делятся на определенное число элементов. Это число определяет компромисс между точностью получаемого решения и требованиями к вычислительной мощности ЭВМ (т. е. времени решения задачи). Соответственно, в областях заготовки и витков индуктора, где требуется высокая точность решения, конечно-элементная сетка обладает высокой дисперсностью (т. е. увеличенным числом элементов и узлов). Наложение конечно-элементной сетки является важным этапом численного моделирования, напрямую влияющим на результат решения задачи. Поэтому в ПП ANSYS реализована функция оценки качества сеточного разбиения, которая позволяет выявить области некорректного распределения КЭ.

На рис. 10 представлена система «заготовка – индуктор» с наложенной конечно-элементной сеткой, реализованной в ПП ANSYS Mechanical APDL. Оценка качества генерации сетки показала, что сеточное разбиение геометрии системы выполнено корректно, сетка КЭ включает в себя 10797 элементов и 11036 узлов.

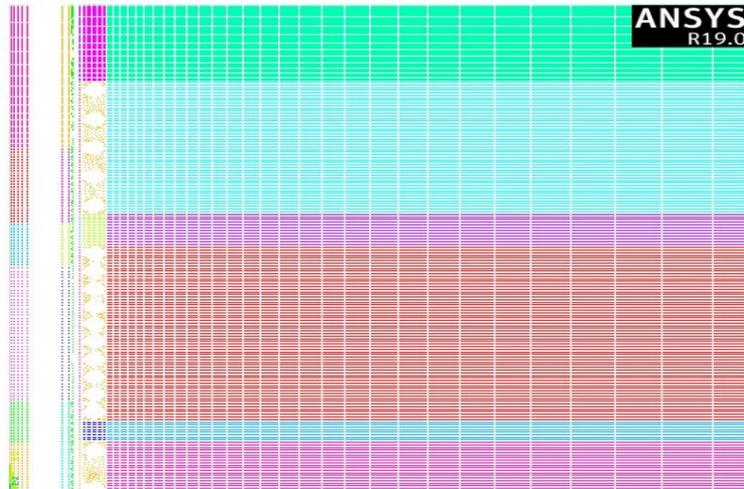


Рис. 10. Система «заготовка – индуктор» с наложенной конечно-элементной сеткой

Последним этапом задания исходных данных для численного моделирования является присвоение начальных и краевых условий, определенных ранее в параметрической форме. Начальные условия, к которым относится температура заготовки в нулевой момент времени $T_{нач}$, равная температуре воздуха $T_{возд}$, необходимы для определения параметров в каждом узле в нулевой момент времени при вычислении характеристик электромагнитного поля [9]. Граничные условия, к которым относятся коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена (AlphaSteel и EmissSteel соответственно), определяют взаимодействие нагреваемой заготовки с окружающей средой, т. е. конвективные потери и потери с излучением.

Как было сказано ранее, принцип работы ПП ANSYS Mechanical APDL основан на встроенном алгоритмическом языке, близком к FORTRAN, поэтому все введенные ранее параметры были записаны в соответствующие файлы (геометрическая модель, тепловые свойства, электромагнитные свойства, конечно-элементная сетка и т. д.). Данные файлы объединены главным файлом, который определяет сценарий расчета, т. е. содержит последовательность команд на открытие файлов и выполнение прописанных в этих файлах алгоритмов.

После запуска численной модели на решение сначала происходит определение магнитно-векторного и скалярного электрического потенциалов, после чего производится расчет количества выделенной тепловой энергии по закону Джоуля – Ленца, что необходимо для определения температурных полей [26]. Расчет двумерной модели занимает около 20–30 минут в зависимости от нагрузки процессора фоновыми приложениями. ПК, на котором производилось численное реше-

ние, имеет следующие технические характеристики: процессор Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU 2.40GHz, объем оперативной памяти 16 Гб, видеокарта NVIDIA GeForce GTX 1650 2 Гб, ОС Windows 10.0 64-разрядная.

Результаты численного решения

Основной целью построения численной модели процесса зонного индукционного нагрева в ПП ANSYS Mechanical APDL является анализ конечного температурного распределения на поверхности заготовки и определение его соответствия требованиям задания (см. рис. 1, б). Моделируемый процесс состоит из двух этапов: нагрева и охлаждения заготовки. На этапе нагрева длительностью $\tau^0 = 20$ с источник питания зонной ИУ включен; внутренние источники тепла индуцируются в заготовке. По окончании этапа нагрева ИУ отключается и нагретая заготовка естественно охлаждается при $T_{\text{возд}}$ на протяжении времени $\tau^{\text{охл}} = 10$ с. При оптимальной длительности охлаждения заготовки происходит выравнивание температурного распределения для его максимального приближения к профилю, требуемому для последующих технологических операций, за счет естественных тепловых потерь при отсутствии внутренних источников тепла.

Для анализа изменения температуры во времени выбраны 8 характерных точек (рис. 11), равномерно расположенных на поверхности заготовки. Изменение температуры во времени в характерных точках позволяет определить возможный момент достижения заготовкой критической температуры $T_{\text{кр}}$, при которой происходит недопустимый перегрев стали, и отображает описанное выше температурное выравнивание, начинающееся с момента времени $\tau^{\text{охл}} = 20,5$ с (см. рис. 11).

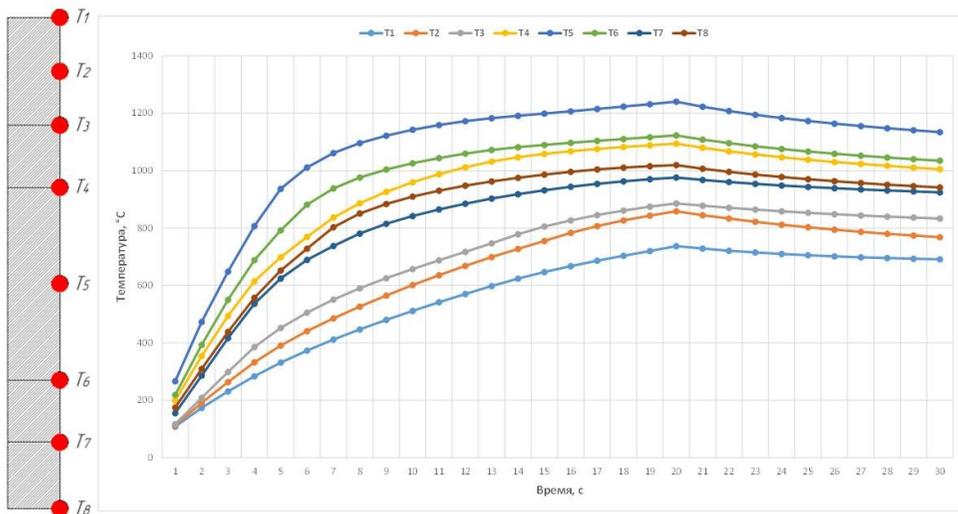


Рис. 11. Расположение критических точек на поверхности заготовки и изменение температуры в этих точках во времени

Перепад температур между критическими точками объясняется их расположением относительно поверхности заготовки. Максимальные значения темпера-

туры наблюдаются в точках Т4, Т5, Т6, расположенных в наиболее «горячей» зоне ДУ2 (нагреваемой второй секцией индуктора L_2). В точке Т8 можно наблюдать температуру теплоизолированного центра заготовки. Точки Т1, Т2 и Т3 отображают температуру зоны наиболее близкой к торцу заготовки, где наблюдаются наибольшие конвективные потери и потери с излучением. В связи с этим критические температуры третьего участка нагрева ДУ3 ниже остальных.

На рис. 12 представлено распределение температуры на поверхности заготовки в конечный момент времени, полученное в ходе численного моделирования при $I_1 = I_2 = I_3 = I = 4744$ А, $N_1 = 2$, $N_2 = 12$, $N_3 = 4$, $L_1 = 35$ мм, $L_2 = 128$ мм, $L_3 = 64$ мм [28].

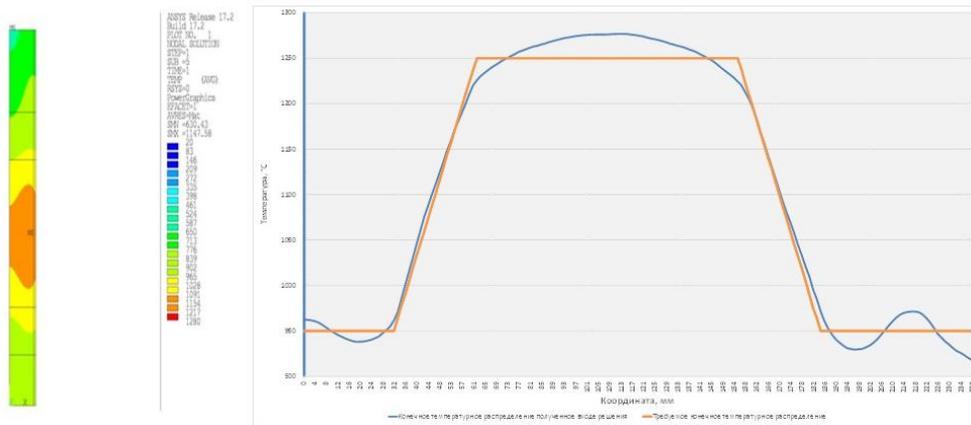


Рис. 12. Конечное температурное распределение на поверхности заготовки, полученное в ходе численного решения, в сравнении с требуемым конечным температурным распределением

Как видно из рисунка, полученное в ходе численного решения в ПП ANSYS конечное температурное распределение на поверхности заготовки приближено к требованиям задания (см. рис. 1, б). Однако отмечается существенный потенциал в снижении отклонений температуры от требуемой в пределах участков нагрева заготовки за счет реализации возможности автономного управления токами отдельно для каждой секции индуктора, что отличается от подхода, продемонстрированного в [28]. Для снижения отклонений температуры от требуемой (рис. 12) необходимо определение оптимальных значений характеризующих секции ИУ параметров, к которым относятся L_i , N_i , I_i , $i = 1, 2, 3$. При этом отклонение результирующего температурного распределения от заданного профиля целесообразно оценивать в равномерной метрике, которая соответствует наиболее строгим технологическим требованиям, предъявляемым к процессам нагрева перед операциями пластической деформации.

Применение специальных методов равномерной оптимизации, в частности альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами [1], для поиска оптимальных конструктивных и режимных параметров зонной ИУ с целью достижения максимально возможной точности нагрева, будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

Заключение

Анализ современных программных продуктов численного моделирования мультифизических электротехнологических процессов определил выбор ПП ANSYS Mechanical APDL как наиболее подходящего инструмента для моделирования процесса зонного индукционного нагрева. На выбор данного программного продукта повлияли его высокая производительность, возможность решать взаимосвязанные задачи различной физической природы, постоянная информационная поддержка и обновление, подробные руководства, построение геометрической 2D- и 3D-модели и т. д.

В статье представлены основные этапы и результаты численного моделирования в ПП ANSYS Mechanical APDL процесса зонного нагрева стальной цилиндрической заготовки в трехсекционной индукционной установке. Проанализированы временные диаграммы изменения температуры в характерных точках, расположенных на поверхности заготовки. Рассмотрены способы задания геометрических характеристик зонной ИУ в параметрическом виде, представлены постоянные и нелинейные физические свойства материалов заготовки и индуктора, построена осесимметричная геометрическая модель зонной ИУ. Описано построение индуктора, включающее проблемно-ориентированное представление секций индуктора и расположения на них витков, реализована возможность автономного управления токами для каждой секции индуктора, что является существенным отличием модели от известных [26] и позволяет в дальнейшем использовать ее в оптимизационных процедурах. Определены и описаны типы конечных элементов для решения взаимосвязанных тепловой и электромагнитной задач и определены начальные и граничные условия.

Полученное в ходе численного решения в ПП ANSYS конечное температурное распределение на поверхности заготовки обладает существенным потенциалом в снижении температурных отклонений от требуемого температурного распределения за счет реализованной возможности автономного управления токами отдельно для каждой секции индуктора. Для снижения температурных отклонений и достижения требуемого конечного температурного распределения необходимо применение специальной оптимизационной методики, основанной на альтернативном методе параметрической оптимизации [1]. Интеграция разработанной модели в оптимизационную процедуру позволит найти оптимальные по критерию максимальной точности нагрева конструктивные и режимные параметры зонной ИУ, что будет продемонстрировано в следующих работах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Плешевцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012. 309 с.
2. Бааке Э., Шпенст В.А. Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки // Записки Горного института, секция "Электромеханика и машиностроение". 2019. № 240. С. 660–668.
3. Лебедев Д.В., Готовкина Е.Е. Разработка конструкции индуктора для закалки детали сложной формы // Вестник ИГЭУ. 2023. № 3. С. 16–24.
4. Карней Ф.С., Кузьмич И.А. Индукционный нагрев в кузнечно-прессовом производстве // Литье и металлургия 2020 [Электронный ресурс]: сборник научных работ III Международной научно-практической интернет-конференции студентов и магистрантов, 18–19 ноября 2020 г. Минск: БНТУ, 2021. С. 8–10.
5. Петров П.А., Крутина Е.В., Калтин Ю.Г. Нагрев и нагревательные устройства в кузнечном производстве. Учебное пособие для вузов. М.: МГТУ «МАМИ», 2010. 110 с.

6. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с.
7. *Зимин Л.С.* Оптимальное проектирование систем индукционного нагрева в технологических комплексах обработки металла давлением: автореф. дис... докт. техн. наук. Л., 1987. 30 с.
8. *Данилушкин А.И.* Оптимальное управление процессом индукционного непрерывного нагрева: автореф. дис. канд. техн. наук. Ленинград, 1979. 16 с.
9. *Коломейцева М.Б., Панасенко С.А.* Оптимизация нагрева сплошного цилиндра в индукторе // Техническая кибернетика. Тр. МЭИ. М.: МЭИ, 1972. Вып. 95. С. 139–143.
10. *Лившиц М.Ю.* Разработка и исследование адаптивной системы оптимального управления процессом индукционного нагрева металла с прогнозирующей моделью: автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1982. 19 с.
11. *Демидович В.Б., Чмиленко Ф. В., Растворова И.И.* Оптимальное проектирование индукционных нагревателей с использованием численных моделей // Индукционный нагрев. 2011. № 15. С. 6–10.
12. *Демидович В.Б.* Применение индукционного нагрева в металлургической промышленности. СПб., 2003.
13. Роль численного моделирования и продвинутых цифровых технологий в развитии различных отраслей промышленности // Материалы XVII Международной онлайн-конференции CAD/FEM/Ansys. CAD/CAM/CAE Observer #1 (141), 2021. С. 61–66.
14. *Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero* Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. № 7.
15. *Пешикин К.С.* Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. № 1. С. 47–59.
16. Моделирование температурного поля неравномерно нагретой по длине заготовки при ее остывании на штампе / *В.В. Кухарь, О.А. Лаврентик, В.А. Бурко, М.В. Крестников* // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2007. № 17. С. 125–129.
17. Сталь 45. Применение углеродистой конструкционной Стали 45 при производстве редукторов и цепных звёздочек // Stalcu.ru все про обработку металла URL: <https://stalcu.ru/temperatura/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=iojx4dvej6319835808> (дата обращения: 05.11.2023).
18. *Елисеев К.В., Зиновьева Т.В.* Вычислительный практикум в современных CAE-системах // Компьютерное моделирование. СПб.: СПбПУ, 2008. С. 36–54.
19. *Попов А.В.* Оптимальное проектирование индукционного нагревателя для поверхностной закалки в условиях интервальной неопределенности параметров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. № 3. С. 139–154.
20. Основы работы в ANSYS 17 / *Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова* М.: ДМК Пресс, 2017. 210.
21. STOCK ANALYSIS: сайт. URL: <https://stockanalysis.com/stocks/anss/company/> (дата обращения: 30.01.2024)
22. marketcap: сайт. URL: <https://marketcap.ru/stocks/BA/financial-statements/income-statement/market-cap/?ysclid=ls098hw011241832261> (дата обращения: 30.01.2024)
23. ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения 16.02.2024)
24. *Коришкова С.Е.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева цилиндрических слитков с учетом технологических ограничений: автореф. дис... канд. техн. наук. Самара, 2015. 24 с.
25. Марочник сталей и сплавов / *А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.*; под ред. *А.С. Зубченко*. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
26. *Ennen M, Niedzwiecki I, Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach. in Proceeding of XIX International UE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.
27. *Павлушин А.В.* Совместная оптимизация конструктивных параметров индуктора и алгоритмов управления процессом нагрева под поверхностную закалку // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 3. С. 17–28.

28. *Пешкин К.С.* Параметрическая оптимизация конструкции индукционной установки для зонного нагрева деталей перед операцией пластической деформации // Сборник научных трудов. МНИЦ «Наукофера». Смоленск: Общество с ограниченной ответственностью «Смоленский социологический центр», 2022. С. 46–53.

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2024 г.

PROBLEM-ORIENTED NUMERICAL MODEL OF THE PROCESS OF TAILORED INDUCTION HEATING OF A STEEL CYLINDRICAL BILLET*

K.S. Peshkin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Abstract. *The article is devoted to the development of a problem-oriented numerical model of the process of tailored induction heating of a steel cylindrical billet. The market of software products (SP) for the numerical solution of problems of various physical nature is analyzed and the choice of the most universal package for solving interrelated thermal and electromagnetic problems – ANSYS Mechanical APDL is justified. The key functions and competitive advantages of the software package for solving the task are given. The successive stages of building an axisymmetric model of a three-section heating system are considered in detail: assignment of constant and nonlinear physical properties of billet and inductor materials; setting the design and operating characteristics of the "billet-inductor" system in parametric form; construction of an axisymmetric geometric model of the system; realization of the possibility of autonomous control of the currents of the inductor sections; definition and assignment of finite elements; superimposing a finite element grid, setting initial and boundary conditions. The analysis of the simulation results is given. The implemented numerical model of the tailored induction heating process is focused on integration into a special optimization procedure based on the alternanse parametric optimization method and aimed at reducing deviations of the resulting temperature distributions from the required profile, estimated in a uniform metric.*

Keywords: *Tailored induction heating, software package, ANSYS Mechanical APDL, the finite element method, boundary conditions, numerical model*

REFERENCES

1. *Rapoport E.Ya., Pleshevtseva Yu.E.* Optimal'noye upravleniye temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva [Optimal control of temperature conditions of induction heating]. M.: Nauka, 2012. 309 p. (In Russian).
2. *Baake E., Shpenst V.A.* Posledniye nauchnyye issledovaniya v sfere elektrotermicheskoy metallurgicheskoy obrabotki [Latest scientific research in the field of electrothermal metallurgical processing] // Zapiski Gornogo instituta, sektsiya "Elektromekhanika i mashinostroyeniye". 2019. № 240. Pp. 660–668. (In Russian).
3. *Lebedev D.V., Gotovkina E.E.* Razrabotka konstruksii induktora dlya zakalki detali slozhnoy formy [Development of an inductor design for hardening parts of complex shape] // Vestnik IGEU. 2023. № 3. Pp. 16–24. (In Russian).
4. *Karpey F.S., Kuz'mich I.A.* Induktsionnyy nagrev v kuznechno-pressovom proizvodstve [Induction heating in forging and press production] // Lit'yë i metallurgiya 2020 [Elektronnyy resurs]: sbornik nauchnykh rabot III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet konferentsii studentov i magistrantov, 18–19 noyabrya 2020 g. Minsk: BNTU, 2021. Pp. 8–10. (In Russian).



© The Author(s), 2024

*Kirill S. Peshkin, Postgraduate Student

5. *Petrov P.A., Krutina E.V., Kalpin YU.G.* Nagrev i nagrevatel'nyye ustroystva v kuznechnom proizvodstve [Heating and heating devices in forging]. M.: MGTU «MAMI», 2010. 110 p. (In Russian).
6. *Rapoport E.YA.* Al'ternansnyy metod v prikladnykh zadachakh optimizatsii [Alternance method in applied optimization problems]. M.: Nauka, 2000. 336 p. (In Russian).
7. *Zimin L.S.* Optimal'noye proyektirovaniye sistem induktsionnogo nagreva v tekhnologicheskikh kompleksakh obrabotki metalla davleniyem [Optimal design of induction heating systems in metal forming technological complexes]: avtoref. dis... dokt. tekhn. nauk. L., 1987. 30 p. (In Russian).
8. *Danilushkin A.I.* Optimal'noye upravleniye protsessom induktsionnogo nepreryvnogo nagreva [Optimal control of the continuous induction heating process]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. L., 1979. 16 p. (In Russian).
9. *Kolomeytseva M.B., Panasenko S.A.* Optimizatsiya nagreva sploshnogo tsilindra v induktore [Optimal control of the continuous induction heating process] // Tekhnicheskaya kibernetika, Tr. MEI. M.: MEI, 1972. Vip. 95. Pp. 139–143. (In Russian).
10. *Livshits M.Yu.* Razrabotka i issledovaniye adaptivnoy sistemy optimal'nogo upravleniya protsessom induktsionnogo nagreva metalla s prognoziryuyushchey model'yu [Development and research of an adaptive system for optimal control of the process of induction heating of metal with a predictive model]: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. M., 1982. 19 p. (In Russian).
11. *Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Rastvorova I.I.* Optimal'noye proyektirovaniye induktsionnykh nagrevateley s ispol'zovaniyem chislennykh modeley [Optimal design of induction heaters using numerical models] // Induktsionnyy nagrev. 2011. № 15. Pp. 6–10. (In Russian).
12. *Demidovich V.B.* Primeneniye induktsionnogo nagreva v metallurgicheskoy promyshlennosti [Application of induction heating in the metallurgical industry]. SPb., 2003. (In Russian).
13. Rol' chislennogo modelirovaniya i prodvinutykh tsifrovyykh tekhnologiy v razvitiy razlichnykh otrasley promyshlennosti [The role of numerical modeling and advanced digital technologies in the development of various industries] // Materialy XVII Mezhdunarodnoy onlayn-konferentsii CADFEM/Ansys. CAD/CAM/CAE Observer #1 (141), 2021. Pp. 61–66. (In Russian).
14. *Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero* Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. № 7.
15. *Peshkin K.S.* Naznacheniy i perspektivy razvitiya kiberfizicheskikh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Purpose and prospects for the development of cyber-physical process control systems] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije nauki. 2023. № 1. Pp. 47–59. (In Russian).
16. Modelirovaniye temperaturnogo polya neravnomerno nagretoy po dline zagotovki pri yeye ostyvanii na shtampe [Modeling the temperature field of a workpiece unevenly heated along the length as it cools on the die] / V.V. Kukhar', O.A. Lavrentik, V.A. Burko, M.V. Krestnikov // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2007. № 17. Pp. 125–129. (In Russian).
17. Stal' 45. Primeneniye uglerodistoy konstruktsionnoy Stali 45 pri proizvodstve reduktorov I tsepykh zvězdochek [Steel 45. Application of carbon structural Steel 45 in the production of gearboxes and chain sprockets] // Stalcu.ru vse pro obrabotku metalla. URL: <https://stalcu.ru/temperaturey/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=lojx4dvej6319835808> (data obrashcheniya: 05.11.2023). (In Russian).
18. *Yeliseyev K.V., Zinov'yeva T.V.* Vychislitel'nyy praktikum v sovremennykh CAE-sistemakh [Computational workshop in modern CAE systems] // Komp'yuternoye modelirovaniye. SPb.: SPbPU/ 2008. Pp. 36–54. (In Russian).
19. *Popov A.V.* Optimal'noye proyektirovaniye induktsionnogo nagrevatelya dlya poverkhnostnoy zakalki v usloviyakh interval'noy neopredelennosti parametrov [Optimal design of an induction heater for surface hardening under conditions of interval parameter uncertainty] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije Nauki. 2020. № 3. Pp. 139–154. (In Russian).
20. Osnovy raboty v ANSYS 17 [ANSYS 17 Basics]. / N.N. Fedorova, S.A. Val'ger, M.N. Danilov, YU.V. Zakharova M.: DMK Press, 2017. 210 p. (In Russian).
21. STOCK ANALYSIS: sayt. – URL: <https://stockanalysis.com/stocks/anss/company/> (data obrashcheniya: 30.01.2024) (In Russian).

22. marketcap: sayt. – URL: <https://marketcap.ru/stocks/BA/financial-statements/income-statement/market-cap?ysclid=ls098hw011241832261> (data obrashcheniya: 30.01.2024) (In Russian).
23. ANSYS [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.ansys.com/> (data obrashcheniya 16.02.2024) (In Russian).
24. *Korshikov S.E.* Optimal'noye upravleniye temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh slitkov s uchetom tekhnologicheskikh ogranicheniy [Optimal control of temperature conditions of induction heating of cylindrical ingots taking into account technological limitations]: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. – Samara, 2015 – 24 p. (In Russian).
25. Marochnik staley i splavov [Brand of steels and alloys] / *A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Yu.V. Kashirskiy* i dr.; pod red. *A.S. Zubchenko*. M.: Mashinostroyeniye, 2003. 784 p. (In Russian).
26. *Ennen M, Niedzwiecki I, Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach. in Proceeding of XIX International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.
27. *Pavlushin A.V.* Sovmestnaya optimizatsiya konstruktivnykh parametrov induktora i algoritmov upravleniya protsessom nagreva pod poverkhnostnuyu zakalku [Joint optimization of inductor design parameters and control algorithms for the heating process for surface hardening] // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2023. № 3. Pp. 17–28. (In Russian).
28. *Peshkin K.S.* Parametricheskaya optimizatsiya konstruktсии induktsionnoy ustanovki dlya zonnogo nagreva detaley pered operatsiyey plasticheskoy deformatsii [Parametric optimization of the design of an induction installation for zone heating of parts before plastic deformation] // Sbornik nauchnykh trudov. MNITS «Naukosfera». Smolensk: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Smolenskiy sotsiologicheskii tsentr», 2022. Pp. 46–53 (In Russian).

Original article submitted 17.02.2024