

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«КРЫМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В.И. Вернадского»

**Автоматизация,
телекоммуникации,
информационные технологии
и программное обеспечение
2023 (ATITS 2023)**

Материалы международной
научно-практической конференции

ЯЛТА
24 – 27 октября 2023 г.

Симферополь 2023

Автоматизация, телекоммуникации, информационные технологии и программное обеспечение 2023 (АТІТS 2023): материалы международной научно-практической конференции (24-27 октября 2023 г.) / отв. редактор В.В. Дядичев. – Симферополь: ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», 2023. – 78 с.

Редакционная коллегия

Менюк Сергей Григорьевич, кандидат экономических наук, доцент, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»;

Мельник Анастасия Юрьевна, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»;

Поздеева Ирина Владимировна, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского».

Настоящий сборник составлен по итогам Международной научно-практической конференции «Автоматизация, телекоммуникации, информационные технологии и программное обеспечение 2023» (АТІТS 2023), состоявшейся в г. Ялта 24-27 октября 2023 г. Материалы предназначены для научных и педагогических работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов с целью применения в научно-исследовательской и педагогической деятельности.

Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законодательства об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых материалов.

При перепечатке материалов статей международной научно-практической конференции ссылка на материалы статей обязательна

© ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1 Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении, нефтегазовой отрасли, металлургии, энергетике и др.)	5
<i>Никишечкин П.А., Тонких П.Д.</i> Автоматизация технологического процесса сортировки деталей, управляемого с помощью программно-реализованного контроллера SoftPLC ¹	5
<i>Пестряева А.Р., Фёдоров С.Н.</i> Автоматизация процесса первичной подготовки нефти с помощью нейросетевого цифрового двойника ...	14
<i>Филатова Г.А., Несмелова А.Ф., Сизов Д.А.</i> Экспериментальное исследование работы автоматических устройств дистанционного определения места повреждения на линии электропередачи, выполненное на учебном стенде.....	22
<i>Шарыгин Д.С., Филатова Г.А., Яблоков А.А.</i> Исследование метрологических характеристик катушек Роговского для задач автоматического определения места повреждения и релейной защиты.....	28
Секция 7 Математическое моделирование технологических процессов и технических систем	38
<i>Дмитриев Э.А., Карпенко В.А., Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И.</i> Результаты численного моделирования процесса течения расплава в кристаллизаторе унрс при принудительном вращении рубашки и эксцентричными выходными окнами в погружном глухдонном стакане.....	38
<i>Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С.</i> Использование методов сетевого моделирования для технологии производства пеностекла ...	47
Секция 20 Нейросетевое программное обеспечение	60
<i>Згода Ю.Н.</i> Высокопроизводительное нейросетевое моделирование в визуализации напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций	60
Секция 22 Компьютерные системы для поддержки организационных решений	67
<i>Дядичев В.В., Биленко Г.Р., Стоянченко С.С., Менюк С.Г.</i> Информационно-аналитическая система рационального и безопасного развития дорожного пространства Республики Крым	67

Секция 23 Разработка математического и программного обеспечения для моделирования нелинейных, нестационарных и неоднородных процессов	73
<i>Петухова В.В., Огородников И.Н. Численное решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности для уточнения свойств неметаллических материалов</i>	<i>73</i>

Секция 1

*Автоматизация технологических процессов и производств
(в машиностроении, нефтегазовой отрасли, металлургии,
энергетике и др.)*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СОРТИРОВКИ ДЕТАЛЕЙ, УПРАВЛЯЕМОГО С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНО- РЕАЛИЗОВАННОГО КОНТРОЛЛЕРА SOFTPLC

Никишечкин П.А., Тонких П.Д.
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

На сегодняшний день сложно представить современное производство, работающее без использования средств автоматизации. В основе автоматизации практически любого технологического процесса лежит программируемый логический контроллер (ПЛК). В статье рассматриваются практические аспекты разработки ПЛК программы для автоматизации технологического процесса сортировки деталей, управляемого с помощью программно-реализованного контроллера SoftPLC, разработанного на кафедре компьютерных систем управления МГТУ «СТАНКИН» [1-3].

В качестве объекта управления была выбрана конвейерной системы с автоматической сортировкой, так как подобная система достаточно проста для понимания, и при этом демонстрирует взаимосвязанную работу датчиков различного вида и зависящих от них исполнительных механизмов. За основу для разработки решения был выбран сортировочный ленточный конвейер с толкателями (5 шт.). Толкатели выполняют однонаправленную сортировку. Сталкивание продукции производится под углом 90 градусов к основному движению груза. Внешний вид рассматриваемого сортировочного ленточного конвейера с толкателями представлен на рисунке 1.

Груз приходит на конвейерную ленту для сортировки. На входе конвейера установлены датчики, определяющие материал (металл или пластик), размер (крупный или мелкий) и качество детали (качественная или брак). Возможен вариант, когда на конвейер поступает неопознанный объект. За определение металла отвечает индуктивный датчик, а за определение пластика оптический датчик.

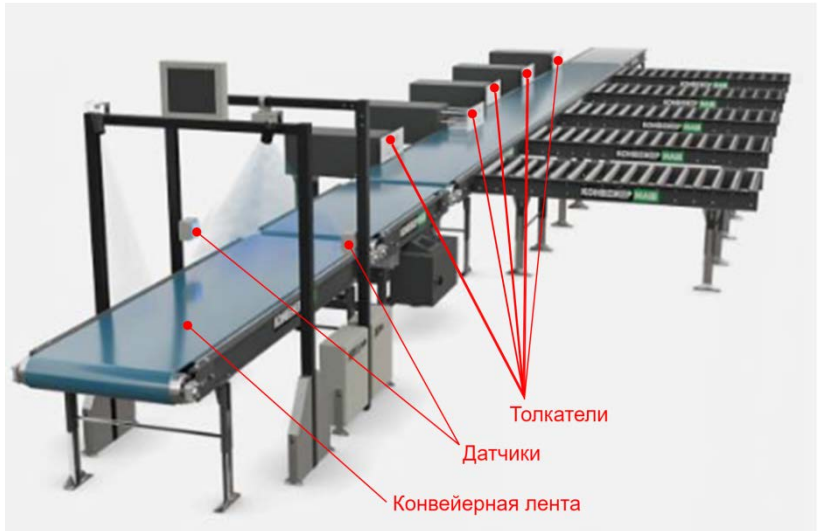


Рисунок 1. Сортировочный ленточный конвейер с толкателями.

За определение размера отвечают датчики положения. В зависимости от срабатывания совокупности датчиков активируется один из толкателей, установленных в конце конвейерной ленты. В контейнерах, куда складываются детали, находятся датчики, показывающие уровень наполненности. Сортировка продолжается до тех пор, пока уровень наполненности одного из контейнеров не достигает максимально возможного уровня, после чего конвейер останавливается, происходит отгрузка заполненного контейнера на склад. После отгрузки контейнер возвращается на место, движение конвейера возобновляется. Сортировка также может быть остановлена принудительно после поступления соответствующей команды [4].

Для управления выбранным технологическим процессом автоматической сортировки деталей с помощью ленточного контейнера с выталкивателями была разработана ПЛК программа на языке функциональных блоков (FBD). На первом этапе были определены основные ПЛК переменные, необходимые для управления процессом (таблица 1).

Таблица 1. Таблица привязки ПЛК переменных.

№ входа/ выхода	Обозначение	Описание
Входы		
0	X0	Сигнал с тумблера «Мелкий».
1	X1	Сигнал с тумблера «Средний».
2	X2	Сигнал с тумблера «Крупный».
3	X3	Сигнал с тумблера «Пластик\Металл».
4	X4	Сигнал с тумблера «Качественная\Брак».
5	X5	Сигнал с кнопки «Добавить деталь».
6	X6	Сигнал с кнопки «Убрать деталь».
7	X7	Сигнал с тумблера «Автоматический\Гибридный».
8	X8	Сигнал с кнопки «Начать сортировку».
9	X9	Сигнал с кнопки «Остановить сортировку».
10	X10	Сигнал с кнопки «Аварийный останов».
11	X11	Сигнал с кнопки «Начать сортировку в демонстрационном режиме».
12	X12	Сигнал принудительного срабатывания с кнопки «Мелкий металл».
13	X13	Сигнал принудительного срабатывания с кнопки «Средний металл».
14	X14	Сигнал принудительного срабатывания с кнопки «Крупный металл».
15	X15	Сигнал принудительного срабатывания с кнопки «Мелкий пластик».
16	X16	Сигнал принудительного срабатывания с кнопки «Средний пластик».
17	X17	Сигнал принудительного срабатывания с кнопки «Крупный пластик».
18	X18	Сигнал принудительного срабатывания с кнопки Кнопка «Брак».
19	X19	Сигнал принудительной разгрузки с кнопки «Мелкий металл».
20	X20	Сигнал принудительной разгрузки с кнопки «Средний металл».
21	X21	Сигнал принудительной разгрузки с кнопки «Крупный металл».
22	X22	Сигнал принудительной разгрузки с кнопки «Мелкий пластик».
23	X23	Сигнал принудительной разгрузки с кнопки «Средний пластик».
24	X24	Сигнал принудительной разгрузки с кнопки «Крупный пластик».
25	X25	Сигнал принудительной разгрузки с кнопки «Брак».
Выходы		
0	Y0	Сигнал на Data-вход 1.
1	Y1	Синхроимпульс 1.
2	Y2	Защелка 1.
3	Y3	Сигнал на светодиод «Идет сортировка».
4	Y4	Сигнал на светодиод «Сортировка остановлена».
5	Y5	Сигнал на светодиод «Ошибка».
6	Y6	Сигнал на светодиод «Неопознанный объект на ленте».
7	Y7	Сигнал на светодиод «Столкновение».
8	Y8	Сигнал на светодиод «Попытка вмешательства в процесс сортировки».
9	Y9	Сигнал на светодиод толкателя «Мелкий металл».
10	Y10	Сигнал на светодиод толкателя «Средний металл».
11	Y11	Сигнал на светодиод толкателя «Крупный металл».
12	Y12	Сигнал на светодиод толкателя «Мелкий пластик».
13	Y13	Сигнал на светодиод толкателя «Средний пластик».
14	Y14	Сигнал на светодиод толкателя «Крупный пластик».

15	Y15	Сигнал на светодиод толкателя «Брак»
16	Y16	Сигнал на светодиод конвейерной ленты «Светодиод 1».
17	Y17	Сигнал на светодиод конвейерной ленты «Светодиод 2».
18	Y18	Сигнал на светодиод конвейерной ленты «Светодиод 3».
19	Y19	Сигнал на светодиод конвейерной ленты «Светодиод 4».
20	Y20	Сигнал на светодиод конвейерной ленты «Светодиод 5».
21	Y21	Сигнал на светодиод конвейерной ленты «Светодиод 6».
22	Y22	Сигнал на светодиод конвейерной ленты «Светодиод 7».
23	Y23	Сигнал на Data-вход 2.
24	Y24	Синхроимпульс 2.
25	Y25	Защелка 2.
26	Y26	Синхроимпульс 3.
27	Y27	Защелка 3.
28	Y28	Синхроимпульс 4
29	Y29	Защелка 4.
30	Y30	Синхроимпульс 5.
31	Y31	Защелка 5.
32	Y32	Синхроимпульс 6.
33	Y33	Защелка 6.
34	Y34	Синхроимпульс 7.
35	Y35	Защелка 7.
36	Y36	Синхроимпульс 8.
37	Y37	Защелка 8.

При разработке ПЛК программы был создан набор пользовательских библиотек, позволяющих разбить ее на подпрограммы и максимально обособить друг от друга для того, что обеспечивает гибкость и хорошую читаемость программы. В ходе работы были разработаны следующие пользовательские блоки для управления конвейером:

1. «SettingsBlock» для регистрации входящих параметров, в котором реализован в котором набор входных битов, входящих с тумблеров группы «Размер», преобразуется в набор выходных битов, показывающих, параметры какой детали выставлены на данный момент (рисунок 2).

2. «SecurityMechanism» позволяет выполнять блокировку кнопок "добавить деталь" и "убрать деталь" на момент начала сортировки, а также выполняет блокировку на момент работы сдвигового регистра, управляющего шкальным индикатором, который показывает текущее число деталей, добавленных на конвейерную ленту

3. «SaveSettings» сохраняет поступающие параметры детали, предварительно преобразованные в десятичное число с помощью блока PASC, в массив, одновременно присваивая каждому числу адрес в памяти контроллера. Текущее число деталей выдается на

другие блоки, таким образом, реализовано динамическое изменение размера массивов, в которых используется текущее число деталей в массиве. Подобное решение избавляет от необходимости задавать размер массива для каждого блока заново.

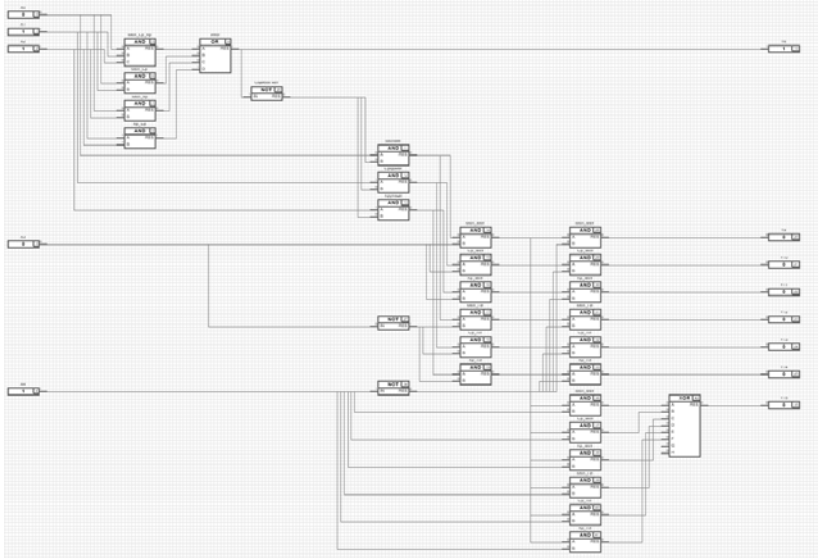


Рисунок 2. Реализация пользовательского блока «SettingsBlock».

4. «AddTakeIAMechanism», реализующий механизм добавления деталей в массив и извлечения их из массива, а также контроль количества добавленных деталей (рисунок 3).

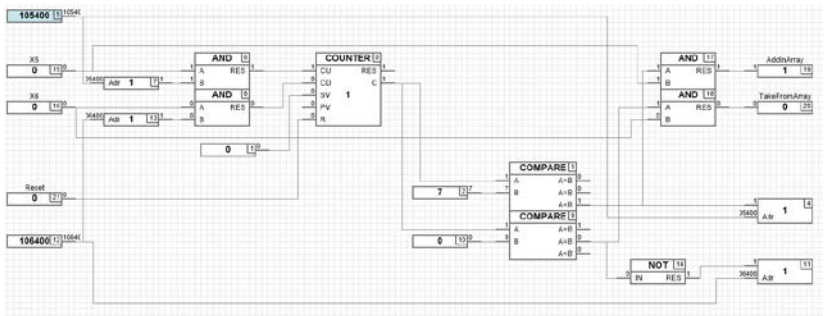


Рисунок 3. Реализация пользовательского блока «AddTakeIAMechanism».

5. «TakeFromArray» извлекает значения параметров из соответствующих ячеек памяти, тем самым соблюдая ту последовательность, в которой пришли детали.

6. «InputRegister» отвечает за выдачу сигналов на регистр. Регистр управляет шкальным индикатором, который показывает количество деталей на ленте.

7. «AutoSort» отвечает за режим работы и выдачу сигналов на толкатели и на пользовательский блок «Data» во время работы в автоматическом и демонстрационном режимах (рисунок 4).

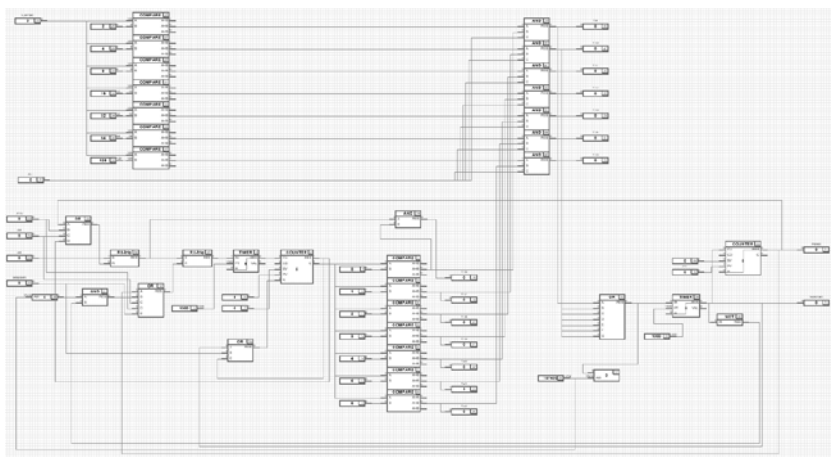


Рисунок 4. Реализация пользовательского блока «AutoSort».

8. «HybridControl» отвечает за выдачу сигналов на толкатели и сдвиговые регистры, которые управляют шкальными индикаторами, показывающими уровень наполненности контейнеров, в гибридном режиме сортировки.

9. «Data» отвечает за принятие сигналов с пользовательского блока «AutoSort» и выдачу сигналов на сдвиговые регистры, которые управляют шкальными индикаторами, показывающими уровень наполненности контейнеров, в автоматическом режиме.

10. «ErrorBlock» отвечает за обработку и выдачу ошибок.

При разработке ПЛК программы была предусмотрена возможность активации демонстрационного режима, при котором выполняется запись 8 деталей в массив и их дальнейшую сортировку в автоматическом режиме. Если выбран гибридный режим работы,

сортировка закончится выдачей ошибки о столкновении, поскольку начало сортировки заблокирует кнопки срабатывания толкателей [5].

Отладка ПЛК программы выполнялась с применением модуля 3Dвизуализации, который был разработан для наглядного представления технологического процесса. Тестирование разработанного программного модуля заключается в проверке корректности выполнения его основных задач в различных режимах работы. В первую очередь проверяется возможность задания параметров деталей и их выпуск на конвейерную ленту. Выпущенная на ленту деталь должна соответствовать заданным параметрам и двигаться по ленте. Для тестирования стенда было реализовано промежуточное приложение, выступающее в роли посредника между ядром SoftPLC и виртуальным стендом. Очередность задания параметров: мелкий пластик, крупный пластик, мелкий металл, крупный металл, брак [2, 6].

На следующем этапе проверяется функция ручного управления толкателями. Толкатель должен начать движение, перпендикулярное направлению ленты до определенной точки, после достижения которой он должен вернуться в исходное состояние. Очередность тестирования толкателей: толкатель № 1, толкатель № 2, толкатель № 3, толкатель № 4, толкатель № 5. На последнем этапе проводится тестирование работы в демонстрационном режиме. Стенд должен сам выпускать детали на ленту и сортировать их до тех пор, пока пользователь не отключит демонстрационный режим. Очередность, в которой должна происходить сортировка в демонстрационном режиме: мелкий пластик – толкатель № 1; мелкий металл – толкатель № 2; крупный пластик – толкатель № 3; крупный металл – толкатель № 4; брак – толкатель № 5. Результат разработанного решения в режиме тестирования представлен на рисунке 5.

Разработана и протестирована ПЛК программа для управления и синхронизации основными узлами конвейера. Реализовано приложение, позволяющее наглядно визуализировать состояние конвейера в зависимости от состояния его основных ПЛК переменных. Разработанное решение может использоваться как для подготовки специалистов в учебном процессе, так и для визуализации реальных технологических процессов и отладке их работы [7-9].

Разработанные механизмы можно использовать в качестве основы для визуализации и отладки других технологических процессов, как в традиционном представлении, так и с применением технологий виртуальной и адаптивной реальности.

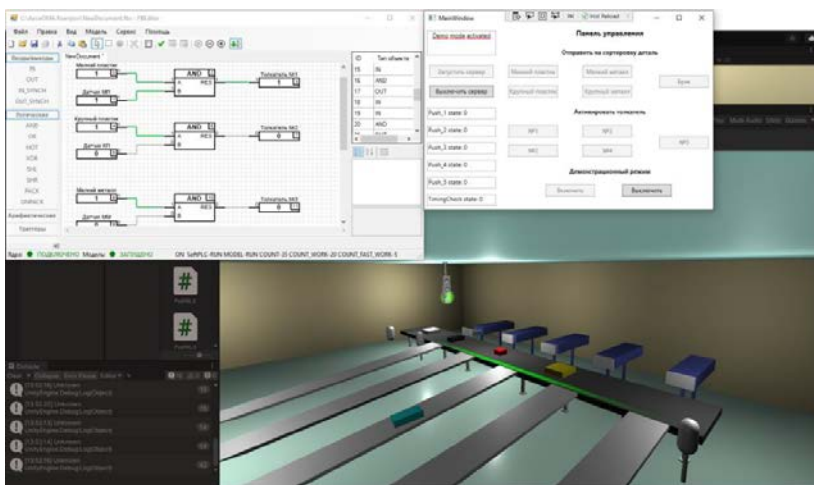


Рисунок 5. Тестирование разработанного решения.

Источники финансирования

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования и Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания (проект FSFS-2023-0004). Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инжиниринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013).

Список литературы

1. Практические аспекты применения программно-реализованного контроллера для управления электроавтоматикой вертикально-фрезерных станков QuaserMV184 / Р.А. Нежметдинов, П. А. Никишечкин, Р. Л. Пушков, С. В. Евстафиева // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 5. – С. 14-17. – EDNTVJTXB.
2. Построение кроссплатформенной системы для сбора и обработки диагностической информации о работе технологического оборудования на промышленных предприятиях / П.А. Никишечкин, И.А. Ковалев, А.С. Григорьев, А.Н. Никич // Автоматизированные технологии и производства. – 2016. – № 4(14). – С. 51-55. – EDN XQRNJB.
3. Information model of production and logistics systems of machine-building enterprises as the basis for the development and maintenance of their digital twins / S.N. Grigoriev, P.A. Nikishechkin, V.A. Dolgov, N.V. Dolgov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 032094. – DOI 10.1088/1757-899X/971/3/032094. – EDN XDKTOY.

4. Martinov, G. M. Real-time diagnosis and forecasting algorithms of the tool wear in the CNC systems / G.M. Martinov, A.S. Grigoryev, P.A. Nikishechkin // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9142. – P. 115-126. – DOI 10.1007/978-3-319-20469-7_14. – EDN VAMBUZ.

5. Мартинов, Г. М. Модульная компоновка и построение прикладных приложений диагностики систем управления / Г.М. Мартинов, Е.С. Трофимов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 7. – С. 44-50. – EDNKVPOHR.

6. Архипов, А. Е. Применение Unity 3D для проектирования тренажерных систем / А.Е. Архипов, А.А. Сиухин // Интеллектуальные технологии и техника в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, Мичуринск, 18–20 октября 2016 года. – Мичуринск: Общество с ограниченной ответственностью "БИС", 2016. – С. 7-12. – EDN VMDNXH.

7. Никищечкин, П. А. Повышение уровня открытости системы управления путем организации многоцелевого канала взаимодействия ее основных компонентов / П.А. Никищечкин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2014. – № 4(31). – С. 161-164. – EDNTFCGVV.

8. Nikishechkin, P. A. An approach of developing solution for monitoring the status and parameters of technological equipment for the implementation of Industry 4.0 / P.A. Nikishechkin, N.Y. Chervonnova, A.N. Nikich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 709, 4, Issue 3. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 044065. – DOI 10.1088/1757-899X/709/4/044065. – EDN WMYYPC.

9. Особенности расчета технологического цикла сборки изделия с нестабильной длительностью операций в многономенклатурном производстве методами имитационного моделирования и математической статистики / В.А. Долгов, Н.В. Долгов, А.А. Акимов, О.С. Прошкина // Вестник МГТУ "Станкин". – 2023. – № 1(64). – С. 34-41. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_1_34. – EDNZULTXU.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОГО ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Пестряева А.Р., Фёдоров С.Н.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы, связанные автоматизацией технологического процесса первичной подготовки нефти путем внедрения в систему управления цифрового двойника на примере классической установки подготовки нефти.

На основе исходных данных из открытого источника разработана нейросетевая модель, обученная на искусственно расширенном объеме данных лабораторных исследований и связывающая показатель качества с режимными параметрами процесса (температурой, расходом деэмульгатора, временем пребывания в аппарате), которая может быть использована в качестве цифрового двойника, как элемент системы управления процессом подготовки нефти.

Ключевые слова. Первичная подготовка нефти, автоматизация технологического процесса, нейронная сеть, цифровой двойник.

Введение

Первичная подготовка нефти на нефтедобывающих предприятиях связана с приведением параметров товарной нефти, отправляемой на транспортировку, к нормативным требованиям по давлению насыщенных паров и содержанию примесей.

Поступающие из различных скважин нефти, часто очень значительно отличаются между собой по составу и по количеству растворенных в них газов, а также по содержанию сероводородов. По этой причине, свойства и состав суммарного потока, который приходит на подготовку, будет зависеть от соотношения дебитов нефтей между скважинами. Дебиты отдельных скважин могут существенно меняться во времени, что происходит как по технологическим причинам, так и при прекращении добычи нефти в связи с поломками оборудования, приводящими к остановке на ремонт. Очень часто нефтедобывающие скважины находятся на большом удалении от установки подготовки нефти, и возникает ситуация, когда химический состав нефти, поступающей на подготовку в данный конкретный момент времени, точно неизвестен. Несмотря на ответственность и профессиональную компетентность персонала установки подготовки нефти, в такой ситуации вероятна

возможность появления продукции, параметры которой не будут соответствовать нормативным требованиям.

Также, трудно поддерживать качество подготовки нефти из-за отсутствия приборов для его непрерывного контроля. Контроль за качеством подготавливаемой нефти осуществляется в специальных лабораториях путем проведения ее химического анализа на основе отобранных на производстве проб. Это занимает значительное время, а сами лаборатории часто располагаются вдали от установок подготовки нефти. Задержка по времени между отбором контрольных проб и их анализом может негативно сказываться на качестве подготавливаемой к транспортировке нефти.

Кроме того, проведенный химический анализ лишь позволяет обнаружить брак в подготовке нефти, но не дает рекомендаций технологическому персоналу, что необходимо предпринять в конкретном случае. Чтобы получить рекомендации, как правило, прибегают к помощи профильных институтов, специалисты которых проводят моделирование процесса подготовки нефти для нового состава сырья. Очевидно, что этот процесс требует существенных временных и финансовых затрат.

Постановка задачи автоматизации

В связи с вышесказанным, задача по поддержанию качества получаемой товарной нефти и автоматизации процесса ее подготовки в настоящий момент является актуальной, а часть перечисленных выше проблем можно решить с помощью цифровых двойников, моделирующих поведение реальных объектов в процессе первичной подготовки нефти. Для построения такого двойника требуется:

- проанализировать технологический процесс подготовки нефти как объекта управления;
- создать и подготовить цифровой двойник, функционально-ориентированный на использование в автоматической системе управления установкой подготовки нефти, связывающий показатели качества товарной продукции с параметрами добываемой нефти, технологического режима и оборудования установки.

Анализ технологического процесса подготовки нефти

При создании цифрового двойника установки подготовки нефти потребуются смоделировать сам процесс подготовки нефти, выделить его управляющие параметры и определить управляемую величину. Полученная модель для выполнения анализа и прогнозирования

должна работать с достаточной точностью в широком диапазоне параметров.

Существуют несколько вариантов построения схем технологического процесса подготовки нефти. На рисунке 1 представлен классический вариант технологического процесса подготовки нефти [1].

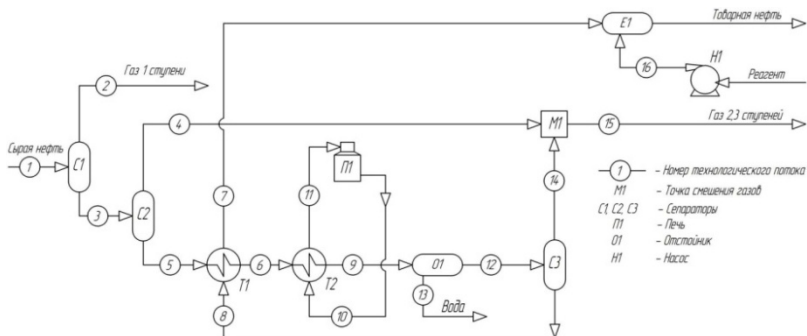


Рисунок 1. Схема технологического процесса подготовки нефти.

Поступающая со скважин нефть по порядку проходит три ступени сепарации С1, С2, С3, на которых последовательно снижается давление. На каждой следующей ступени остаточное газосодержание нефти уменьшается, что приводит к снижению ее давления насыщенных паров (ДНП) и содержания в ней сероводорода (H_2S). Для достижения нормативного значения ДНП (500 мм.рт.ст.) перед конечной ступенью сепарации предусмотрен нагрев нефти. Доведение остаточного содержания сероводорода до нормативных требований осуществляется с помощью химического реагента. Например, в качестве такого реагента может использоваться щелочь. Подготовка нефти основывается на двух основных технологических процессах: испарении и химической нейтрализации. Если в случае химической нейтрализации необходимое количество химического реагента связано только с количеством сероводорода в нефти, которое необходимо нейтрализовать, то, на интенсивность испарения легких веществ, влияют уже два параметра: давление и температура. На ступенях сепарации проблематично использовать в качестве управляющих параметров давления. Это связано с тем, что они обеспечивают решение и других немаловажных технологических задач, таких как, например, дальнейшая транспортировка газа и жидкости, как в пределах технологической установки, так и при отправке готовой

продукции потребителю. Так как более сильное влияние на процесс испарения оказывает температура, то это делает ее более предпочтительной в качестве управляющего воздействия. Однако управление температурой на всех ступенях сепарации не оправдано с экономической точки зрения, поэтому нагрев нефти предусмотрен только перед третьей ступенью сепарации, в то время как на двух предыдущих ее температура устанавливается самопроизвольно в ходе адиабатического процесса испарения.

Таким образом, учитывая все выше сказанное, в качестве управляющих параметров, влияющих на качество подготовки нефти, могут быть выделены следующие:

$T_{\text{печь}}$ – температура теплоносителя на выходе из печи;

$G_{\text{реар}}$ – расход реагента, поступающего на нейтрализацию H_2S .

Создание и подготовка цифрового двойника

Цифровой двойник, который применяется в нефтегазовой отрасли – это виртуальные нефтегазовые активы, процессы или системы, которые фиксируют параметры и поведение объектов в реальном времени, необходимые для сохранения и обработки информации с целью максимизации эффективности основных активов.

Среди различных методов моделирования наиболее перспективным является нейросетевое моделирование. Нейронные сети можно рассматривать как современные вычислительные системы, преобразующие информацию по образу процессов, происходящих в мозгу человека. Обработка информации имеет численный характер, что позволяет использовать нейронную сеть в качестве модели объекта с нечеткими или неопределенными характеристиками [2].

Нейронная сеть, выступающая в роли цифрового двойника в системе управления установкой подготовки нефти, должна быть предварительно обучена на ранее полученных и накопленных экспериментальных данных, таких как, удельный расход и тип реагента-деэмульгатора, температура и продолжительность отстаивания обработанной реагентом эмульсии. В качестве основных исходных данных из открытого источника были взяты результаты теплотехнического обезвоживания нефти Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения I ступень при температуре 10 °С, 20 °С, 40 °С, времени отстаивания 15, 30, 60, 90, 120 минут и расходе реагента 0, 21, 42, 63, 84 г/т нефти для деэмульгатора Dissolvan–5592 (относится к неионогенным деэмульгаторам).

В таблице 1 представлен фрагмент сводной таблицы результатов теплохимического обезвоживания нефти Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения.

Таблица 1. Фрагмент сводной таблицы результатов термохимического обезвоживания нефти Среднеботуобинского НКМ.

Наименование реагента	Температура, °С	Расход реагента, г/т нефти	Отделилось воды, %, за время оттаивания, мин				
			15	30	60	90	120
Без реагента	–	0	0	0	0	0	0
Dissolvan–5592	10	21	2,7	5,4	13,6	16,3	19,0
		42	5,6	11,2	28,2	33,9	36,7
		63	8,6	25,5	44,5	54,0	58,4
		84	11,4	40,0	60,6	74,3	80,0
	20	21	5,3	21,0	26,3	31,6	36,8
		42	12,9	36,1	43,8	49,0	54,1
		63	14,2	51,6	61,8	65,5	70,0
	40	84	15,5	67,0	79,9	82,2	85,1
		21	10,4	23,4	39,1	44,3	49,5
		42	36,8	52,6	65,8	71,7	73,7
		63	52,3	70,6	77,1	81,4	82,4
		84	67,7	88,5	88,5	91,1	91,1

При создании нейросетевой модели моделируемый объект рассматривается как «черный ящик» без его параметрического описания и находятся зависимости в больших объемах данных.

Для качественного обучения искусственной нейронной сети и обнаружения всех характерных зависимостей между выходными и входными величинами необходим достаточно большой набор данных. Так как в исходных таблицах лабораторных исследований нефтяных эмульсий набор данных недостаточно большой, то возникает задача заполнения отсутствующих данных. Решить эту задачу и расширить обучающий набора данных можно с помощью модели генеративного искусственного интеллекта для генерации синтетических данных.

Существует всего несколько моделей для генерации табличных синтетических данных, и CTGAN (Conditional Tabular Generative Adversarial Network) – одна из них. Как и другие GAN, он использует нейронную сеть генератора и дискриминатора для создания синтетических данных со статистическими свойствами, аналогичными реальным данным. CTGAN может сохранять базовую структуру реальных данных, включая корреляции между столбцами.

На примере таблицы экспериментальных данных лабораторных исследований с помощью CTGAN был получен следующий результат:

– начальная таблица экспериментальных данных размерностью 110×4 после расширения получила размерность 4275×4, то есть увеличилась до 17100 элементов;

– получено 4275 выходных целевых значений, которые были использованы при обучении нейронной сети.

Обучение искусственных нейронных сетей выполнялось в программном пакете MATLAB версия R2017b (9.3.0.713377) 64bit и модуля Neural Network Toolbox. С помощью этого модуля создаются многослойные нейросетевые структуры со связанными между собой нейронами соседних слоёв. Были спроектированы и обучены несколько нейронных сетей прямого распространения (FF/FFNN - Feedforwardneuralnetworks) с количеством нейронов 1, 10, 50, 100.

Сравнение результатов обучения (таблица 2) показало следующее:

– наименьшую среднюю ошибку показала модель с линейной гиперболической тангенциальной функцией активации при количестве нейронов, равном 100 (7×10^{-7});

– метод обучения Левенберга–Марквардта в сравнении с методом градиентного спуска показал на несколько порядков лучшие показатели качества при гораздо меньшем количестве нейронов;

– показатели качества модели улучшаются вместе с увеличением количества нейронов в скрытом слое.

Таблица 2. Результаты обучения искусственных нейронных сетей.

Активационные функции	Количество нейронов скрытого слоя	Метод обучения*	Среднеквадратичная ошибка
Линейная логистическая	1	ГС	0,0147000
		ЛМ	0,0139000
	10	ГС	0,1780000
		ЛМ	0,0004000
	50	ГС	0,0012000
		ЛМ	0,0000300
	100	ГС	0,0011200
		ЛМ	0,0000040
Линейная гиперболическая тангенциальная	1	ГС	0,0140000
		ЛМ	0,0141000
	10	ГС	0,1580000
		ЛМ	0,0003700
	50	ГС	0,0009000
		ЛМ	0,0000036
	100	ГС	0,0008400
		ЛМ	0,0000007

*ГС – обучения методом градиентного спуска, ЛМ – метод обучения Левенберга – Марквардта

Оптимальным числом нейронов является количество от 10 до 50, при которых ошибка принимает значения от 10^{-4} до 10^{-6} , что с учётом размерности выходного параметра модели представляет соответственно ошибку от 1% до 0.01%.

Итоговая искусственная нейронная сеть была обучена на расширенном диапазоне экспериментальных данных с помощью метода Левенберга-Марквардта. Результат, генерируемый обученной ИНС, представлен на рисунке 2, где Q – расход деэмульгатора, t – температура эмульсии.

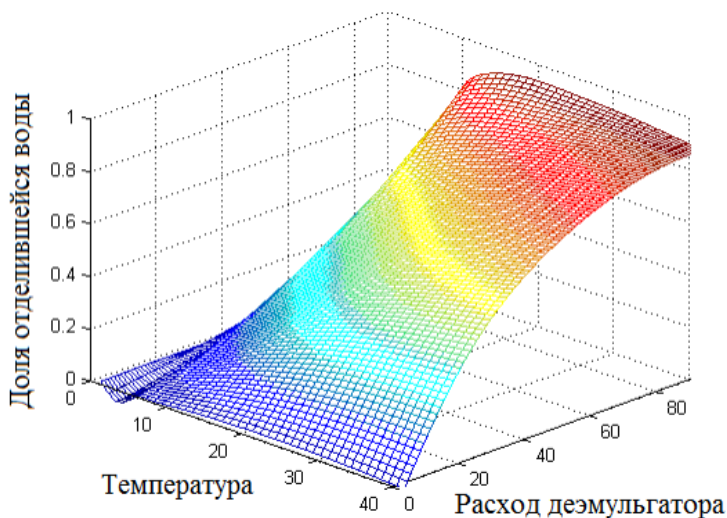


Рисунок 2. Выход нейронной сети для времени отстаивания 60 минут.

После обучения искусственная нейронная сеть становится практически нечувствительной к малым изменениям входных величин и дает правильный результат на выходе.

Выводы

Полученный таким образом нейросетевой цифровой двойник может быть применен как центральный элемент системы управления процессом подготовки нефти к дальнейшей её транспортировке. При этом технологическое оборудование и электронно-вычислительные компоненты остаются унифицированным, а разработка эталонной модели должна проводиться индивидуально для каждого объекта.

Нейронные сети, благодаря своей способности к обучению, позволят создавать такие модели управления, которые будут способны адаптироваться к меняющимся во времени свойствам объекта управления, что положительно скажется на качестве управления.

Нейронные сети позволяют накапливать, хранить и использовать информацию прошлых периодов, строить прогнозы будущих периодов и осуществлять мониторинг общего состояния процесса подготовки нефти, а оперативное управление сложными производственными установками для подготовки нефти, будет значительно упрощено. Предложенная система нейросетевых цифровых двойников является одним из шагов на пути внедрения технологий производства без участия человека, так как позволяет создать полностью автономную установку, не требующую постоянного присутствия оперативного персонала для её обслуживания.

Список литературы

1. Тронов, В.П. Промысловая подготовка нефти / В.П. Тронов. – Казань: «Фэн», 2000. – 416 с.
2. Аксенов, С.В. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / С.В. Аксенов, В.Б. Новосельцев // Томск, 2006.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ВЫПОЛНЕННОЕ НА УЧЕБНОМ СТЕНДЕ

Филатова Г.А., Несмелова А.Ф., Сизов Д.А.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

Аннотация. В статье приведена схема проведения и результаты экспериментальных исследований микропроцессорного устройства (МПУ) определения места повреждения (ОМП) на линиях электропередачи. Разработанная в ходе исследования установка подходит для испытания любых устройств ОМП, основанных на замере параметров аварийного режима (ПАР). В результате исследования получены зависимости погрешности ОМП при влиянии различных искажающих замер факторов. Получено, что в наибольшей степени на замер места повреждения оказывает влияние наличие емкостной проводимости фаз линии на землю.

Введение

Автоматическое определение места повреждения (ОМП) на линиях электропередачи (ЛЭП) позволяет значительно уменьшить время на поиск места повреждения и повысить надежность электроснабжения потребителя [1, 2]. Приборами ОМП оснащаются все воздушные ЛЭП напряжением 110 кВ и выше и длиной более 20 км [3]. На воздушных ЛЭП ОМП проводится в два этапа [4]:

– дистанционное ОМП, предполагающее определение места повреждения или зоны обхода ЛЭП при помощи специальных алгоритмов или автоматических устройств. Часто функцией дистанционного ОМП оснащаются микропроцессорные устройства (МПУ) релейной защиты (РЗ) ЛЭП;

– топографическое ОМП, предполагающее определение места повреждения визуально или с помощью специальных переносных приборов при непосредственном обходе трассы ЛЭП.

Опыт эксплуатации показал, что в настоящее время устройства дистанционное ОМП все еще обладают большой погрешностью (5–10 % и более от длины ЛЭП) [5], поэтому разработка и исследование алгоритмов ОМП является актуальной задачей. Кроме того, актуальной задачей в рамках учебного процесса является получение студентами навыком работы с автоматическими устройствами ОМП, навыка анализа их работы и оценки их точности.

Постановка задачи

В Ивановском энергетическом университете (ИГЭУ) изучение алгоритмов и устройств ОМП проходит в рамках дисциплины «Автоматика электроэнергетических систем». Программа предусматривает выполнение лабораторного практикума, который в настоящий момент реализован на базе стендов «Учебная техника» [6]. В стандартные лабораторные работы, предусмотренные производителями стендов, не входит тема ОМП на ЛЭП. Ранее была опробована схема проведения эксперимента с использованием стенда «Учебная техника» и МПУ ОМП (рисунок 1), однако не было проведено полное испытание устройства и исследования влияния искажающих замер факторов. Поэтому целью научно-исследовательской работы студентов – авторов статьи явились доработка схемы проведения эксперимента и проведение экспериментальных исследований МПУ ОМП.

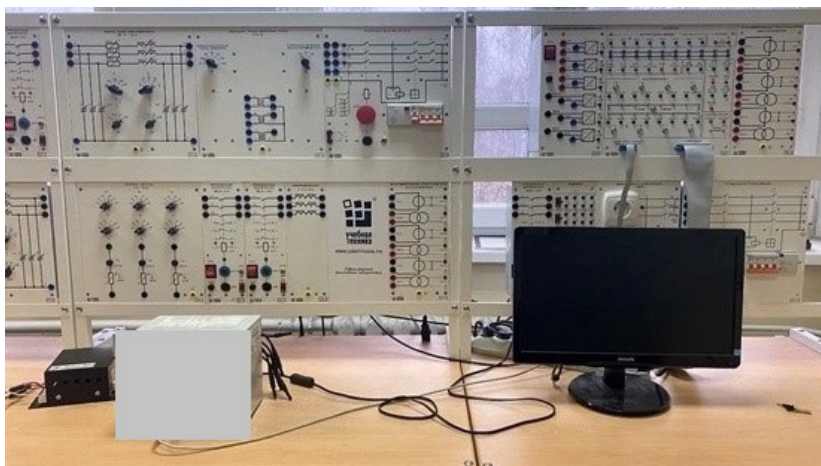


Рисунок 1. Внешний вид стенда «Учебная техника» в лаборатории «Автоматика ЭЭС».

Методы исследования

Разработанная установка подходит для испытания любых устройств ОМП, основанных на замере параметров аварийного режима (ПАР). Принципиальная схема проведения эксперимента, для исследования методов ОМП по ПАР на основе одностороннего замера, представлена на рисунке 2.

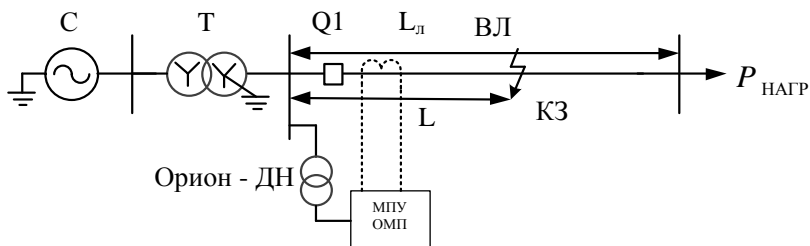


Рисунок 2. Принципиальная схема эксперимента.

Перечень используемого оборудования сведен в таблицу 1. Также в ходе подготовки эксперимента, авторами были проработаны вопросы подключения терминала к оборудованию стенда, поскольку стандартные лабораторные работы на стенде не предусматривают подключение МПУ.

Таблица 1. Перечень используемой аппаратуры.

№	Наименование	Тип	Параметры
1	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3x80 ВА; 230 (звезда)/ 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
2	Трехполюсный выключатель	301.1	400 В~; 10А
3	Модель линии электропередач	313.2	400 В~; 3x0,5 А
4	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50 Гц; 3x0..50 Вт
5	Трехфазный источник напряжения	201.1	400 В~; 16 А
6	Линейный реактор	314.2	3x0,3 Гн
7	МПУ ОМП		Пит. 220 В~; 1 А, 100 В~ аналог. входы
8	Делитель напряжения	Орион-ДН	220/380 В~ 100 В~

Результаты исследования

Было исследовано влияние следующих искажающих замер факторов:

- удаленность короткого замыкания (КЗ);
- вид КЗ;
- переходное сопротивление в месте КЗ;
- нагрузка;
- емкость фаз ЛЭП на землю.

В ходе выполнения экспериментальных исследований получено, что в наибольшей степени на замер оказывает наличие емкостной проводимости фаз ЛЭП на землю. В случае наличия емкости фаз на землю (порядка 0,36 мкФ) погрешность увеличивается на 3 %, относительно замера в отсутствие емкости.

Вторым по степени влияния фактором для данного МПУ ОМП является переходное сопротивление в месте КЗ. Моделировалось наличие переходного сопротивления до 150 Ом. При этом для переходного сопротивления 50 Ом, компенсация которого должна осуществляться алгоритмом ОМП согласно [7], погрешность увеличивается не более чем на 2 %, относительно замера при металлическом КЗ.

Отметим, что при проведении опытов с точки зрения, например, наличия высших гармонических составляющих в токах и напряжениях, КЗ МПУ ОМП находилось в худших условиях функционирования, чем в реальных электроустановках. Поэтому значения погрешностей были значительными, но в целом по модулю не выходили за 7 % для междуфазных КЗ, и за 15 % для однофазных КЗ.

Пример полученной осциллограммы и векторных диаграмм (в начале КЗ, во время существования апериодической составляющей, и через 100 мс) при КЗ А0 на середине моделируемой ЛЭП представлены на рисунках 3 и 4. В данной точке погрешность ОМП составила - 12,1 %.

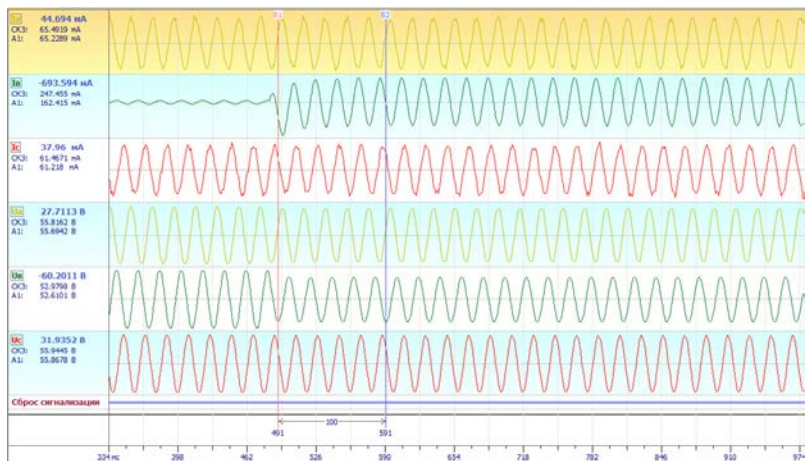


Рисунок 3. Вторичные токи и напряжения при металлическом однофазном КЗ: осциллограммы.

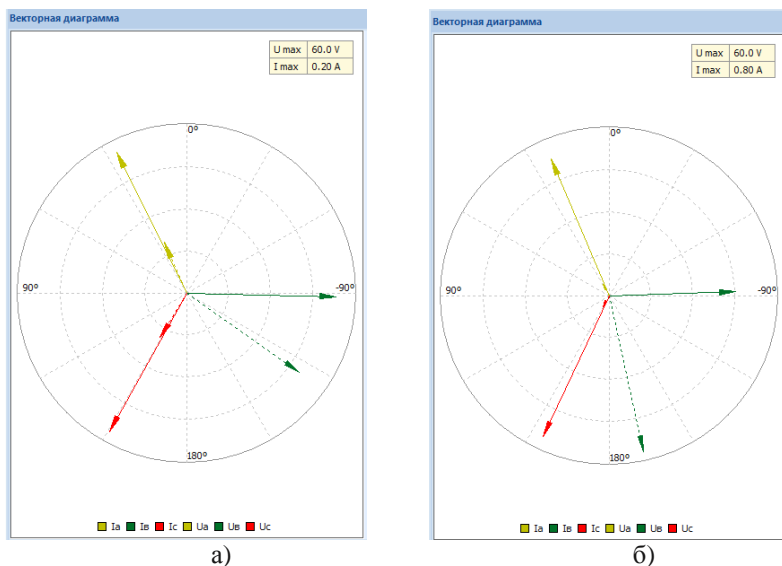


Рисунок 4. Вторичные токи и напряжения при металлическом однофазном КЗ: а) векторная диаграмма для метки времени В1 (красная метка); б) векторная диаграмма для метки времени В2 (синяя метка).

Выводы

Таким образом, разработана схема для проведения экспериментальных исследований МПУ ОМП на основе замера ПАР. Проведены исследования имеющегося образца МПУ ОМП, получены зависимости погрешности ОМП при влиянии различных искажающих замер факторов. Разработанная схема внедрена в учебный процесс.

Список литературы

1. Куликов, А.Л. Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / А.Л. Куликов. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии госслужбы, 2006. – 315 с.
2. Saha, M. M. Fault Location on Power Networks / M. M. Saha, J. Izy-kowski, E. Rosolowski. – London: Springer, 2010. – 437 p.
3. СТО 56947007-29.240.55.159-2013. Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше.
4. Аржанников Е.А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, А.М. Чухин. – М.: НТФ "Энергопрогресс", 1998. – 64 с.
5. Козлов В.Н. О точности современных устройств ОМП / В.Н. Козлов, Ю.В. Бычков, К.И. Ермаков // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 1(22). – С. 43-47.

6. Тимофеев, А. С. Разработка лабораторных работ по дисциплине "Автоматика ЭЭС" на базе стендов "Учебная техника" и микропроцессорных терминалов / А.С.Тимофеев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, Москва, 02–03 марта 2017 года. Том 3. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 438. – EDN ZIKJOX.

7. СТО 34.01-4.1-001-2016. Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАТУШЕК РОГОВСКОГО ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Шарыгин Д.С.¹, Филатова Г.А.², Яблоков А.А.³

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет
им. В.И. Ленина»,

Россия, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34

¹аспирант; ²к.т.н, доцент; ³к.т.н, доцент

e-mails: ¹sharydinds@yandex.ru, ²fgala90@mail.ru, ³andrewyablokov@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению метрологических характеристик нетрадиционных преобразователей тока – катушек Роговского, входящих в состав цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения (ЦТН) и применению их для задач дистанционного определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР) на линиях электропередачи. Представлены методики проведения испытаний; исследованы факторы, оказывающих влияние на погрешность преобразования первичного тока. Использование катушек Роговского с амплитудной погрешностью меньше 1%, с угловой погрешностью меньше 1 градуса в широких диапазонах варьирования факторов (частота и амплитуда первичного тока, угол наклона датчика, температура и др.) позволяет уменьшить инструментальную погрешность ОМП по ПАР.

Ключевые слова: катушка Роговского, определение места повреждения, метрологические характеристики

Введение

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) являются наиболее повреждаемым элементом энергосистемы. Быстрое и точное определение места повреждения (ОМП) позволяет оперативно ликвидировать возникшее повреждение на линии и восстановить работу данного участка сети. По цепям тока и напряжения устройства ОМП подключаются к первичным преобразователям – измерительным трансформаторам тока и напряжения. Одним из основных факторов, оказывающих влияние на точность ОМП, в частности на дистанционное ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), является инструментальная погрешность первичных преобразователей.

Традиционно в электроэнергетике в качестве первичных преобразователей тока применяются электромагнитные измерительные трансформаторы тока (ТТ). На точность определения расстояния до места повреждения оказывает влияние класс точности измерительных ТТ и их нагрузка. Обычно используются ТТ класса 5Р или 10Р, обеспечивающие полную погрешность преобразования не

хуже 5 % или 10 % при номинальной предельной кратности тока. При этом для класса 5P токовая погрешность составляет 1%, а угловая 1 градус по ГОСТ 7746-2015. Наличие апериодической составляющей в токе КЗ в переходных режимах, а также эффекты насыщения и остаточной намагничности сердечников электромагнитных трансформаторов тока приводят к искажению измеряемого сигнала. В таком случае полная погрешность электромагнитных трансформаторов тока может составлять более 10%, что приводит к существенному увеличению погрешности ОМП и оказывает влияние на функционирование РЗА [1].

Крупные аварии в энергосистеме Российской Федерации привели к разработке современных стандартов, связанных с требованиями к техническим характеристикам ТТ и испытаниям устройств РЗА в переходных режимах КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ [2-4]. Уменьшение количества аварийных ситуаций, связанных с насыщением и остаточной намагничностью магнитопроводов ТТ, может быть достигнуто за счет применения ТТ новых классов (PR, TPY, TPZ, описанных в международных стандартах IEC 60044-1, IEC 60044-7 [5], IEC 61869-2) и преобразователей, основанных на новых принципах (безындуктивный шунт, датчик Холла, катушка Роговского, оптический трансформатор и др.). Достоинства, недостатки и характеристики преобразователей определяют область их применения.

Недостатки электромагнитных ТТ и ТН привели к разработкам новых преобразователей и конструкторских решений. В 1967 году фирмой «Аллис-Чалмерс» был разработан первый цифровой трансформатор тока и напряжения [6]. Разработка международного протокола IEC 61850-9-2 [7], регламентирующего передачу мгновенных значений токов и напряжений (SV – Sampled Values) для измерительных трансформаторов, привела к появлению на рынке цифровых трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН), предусматривающих обязательный перевод измеренных величин в цифровую форму и последующую передачу в протоколе IEC 61850-9-2 в соответствии с IEC61869-9. На сегодняшний день разработано и производится большое количество цифровых трансформаторов тока и напряжения (рисунок 1), использующих катушки Роговского и малогабаритные электромагнитные ТТ (в качестве преобразователей тока) и резистивный или ёмкостный делители (в качестве преобразователей напряжения).



а).



б).



в).



г).

Рисунок 1. Внешний вид цифровых измерительных трансформаторов, производимых различными компаниями:

- а) ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы» [8-10];
б) ООО «АЙ-ТОР» [11]; в) ООО «Оптиметрик» [12]; г) TestecS.p.A. [13].*

Малогобаритные ТТ используются для целей коммерческого учета электроэнергии при нормальной работе электрической сети. Катушки Роговского используются также для целей релейной защиты и автоматики, поскольку не имеют магнитного сердечника и,

соответственно, не подвержены влиянию эффектов насыщения и остаточной намагниченности.

Цель данной работы: исследование метрологических характеристик катушек Роговского, входящих в состав ЦТТН, для дальнейшего использования выходных сигналов данных преобразователей для алгоритмов дистанционного ОМП по ПАР.

Методика исследования

На сегодняшний день практически отсутствует опыт продолжительной эксплуатации цифровых трансформаторов с нетрадиционными преобразователями в реальных условиях работы энергообъектов. Отсутствие опыта эксплуатации может быть компенсировано проведением всесторонних исследований нетрадиционных измерительных преобразователей в широком диапазоне внешних эксплуатационных воздействий. В рамках данной работы были выполнены исследования катушек Роговского (рисунок 2), входящих в состав ЦТТН.



а).



б).

Рисунок 2. Фотографии объектов испытания.

Исследования выполнялись на уникальной научной установке (УНУ № 507666) «Многофункциональный испытательный комплекс для исследования первичных преобразователей тока и напряжения, устройств цифровой подстанции и устройств релейной защиты и автоматики», представленной на рисунке 3.

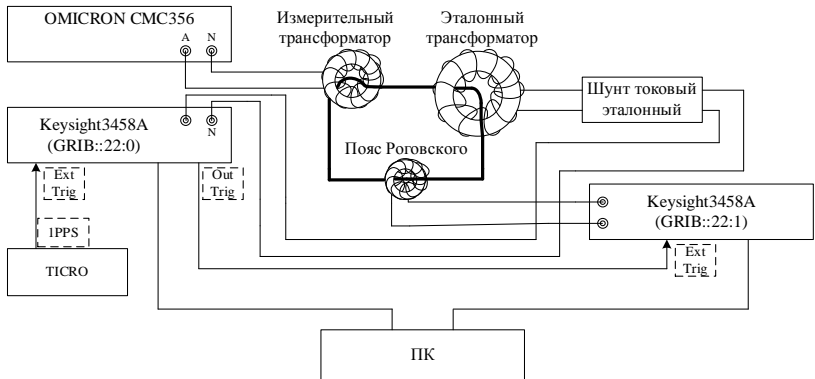


Рисунок 3. Схема экспериментальных исследований.

Выполнены следующие экспериментальные исследования факторов, влияющих на метрологические характеристики на промышленной частоте, на амплитудно-частотные, фазочастотные и переходные характеристик катушки Роговского неразъемной конструкции:

- Исследование метрологических характеристик катушек Роговского при токах, близких к токам короткого замыкания (3-5 кА). Токи короткого замыкания создавались при помощи испытательной установки РЕТОМ-30кА, для измерения тока использовался эталонный трансформатор тока ТТИ-5000.51 с диапазоном измерения до 5 кА.

- Исследование изменения амплитудной и угловой погрешностей катушек Роговского в зависимости от частоты первичного тока. Первичный ток генерировал аппаратно-программный комплекс OMICRON (диапазон частот до 1000 Гц в основном режиме и до 3000 Гц при генерации сигналов с гармоническими составляющими). В качестве эталона использовался шунт токовый эталонный безреактивный ШЭ-5.0 (рабочий диапазон частоты переменного тока: от 0,04 до 100 кГц; основная относительная погрешность: 0,005%).

- Исследование влияния положения катушек Роговского относительно токопровода (рисунок 4) на метрологические и амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики. Исследования выполнялись при смещении катушек Роговского и их наклоне относительно токопровода.

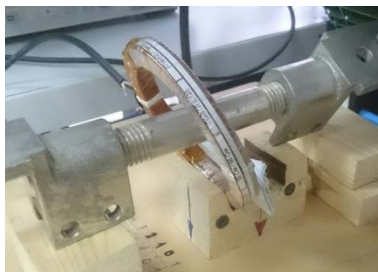


Рисунок 4. Фотография проведения экспериментальных исследований.

– Исследование сигналов катушек Роговского в переходных режимах, при наличии и отсутствии аperiodической составляющей, при наличии гармонических составляющих (частотой до 2500 Гц).

– Исследование зависимости амплитудной и угловой погрешностей катушек Роговского от температуры (от -60°C до $+80^{\circ}\text{C}$). Для исследования катушки Роговского помещались в камеру тепла-холода КТХ -74-75/180, остальное оборудование (в том числе эталонный трансформатор тока) находилось снаружи камеры при нормальных условиях окружающей среды.

Результаты экспериментальных исследований

1. Пространственное положение неразъемной катушки Роговского с равномерной намотанной обмоткой относительно токопровода практически не оказывает никакого влияния даже при угле наклона катушки Роговского относительно токопровода в 45° (рисунок 5).

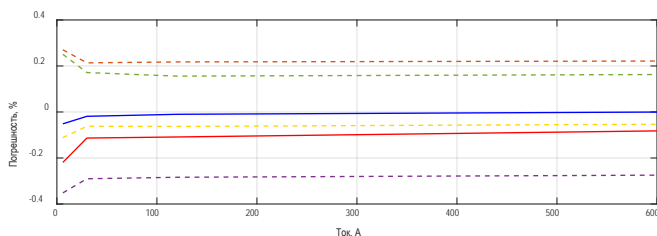


Рисунок 5. Амплитудные погрешности катушки Роговского, экранированного, неразъемного (Синим показан график погрешности без смещения катушки относительно токопровода, красным - наклон под углом 45° , пунктирными линиями - смещение катушки относительно токопровода в разные пространственные положения на 0,5 см).

2. Амплитудная и угловая погрешности исследуемых экранированных катушек Роговского при преобразовании токов близких к токам коротких замыканий (до 5 кА) находятся в рамках класса точности 5ТРЕ (амплитудная погрешность меньше 1%, угловая – меньше 1 градуса при отсутствии искажения формы кривой тока).

3. Катушки Роговского имеют линейно-возрастающие амплитудно-частотные характеристики (рисунок 6). Изменение угловой погрешности у исследуемых образцов не превысило 1 угл. град. в диапазоне от 10 до 1000 Гц.

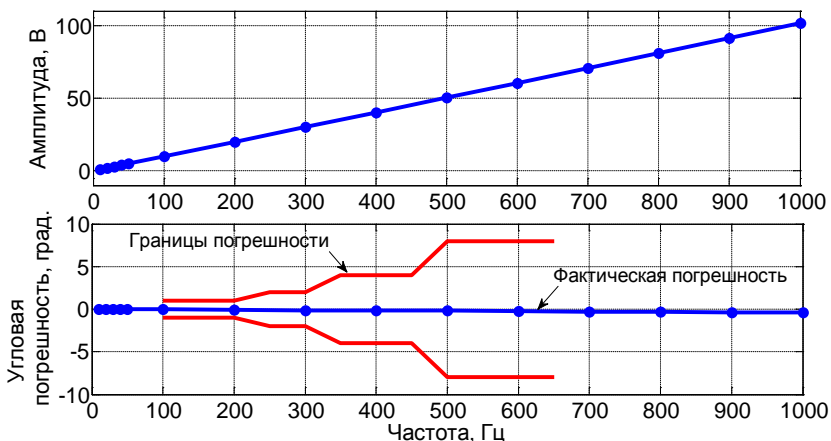


Рисунок 6. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики катушки Роговского без использования интегратора с обозначением границ погрешности (класс точности 0,1) в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010.

4. Цифровое интегрирование осциллографированного сигнала катушки Роговского позволяет восстановить форму тока без искажений даже при наличии аperiodической составляющей в токе короткого замыкания (рисунок 7). Допускается, производить цифровое интегрирование не в режиме реального времени для целей ОМП.

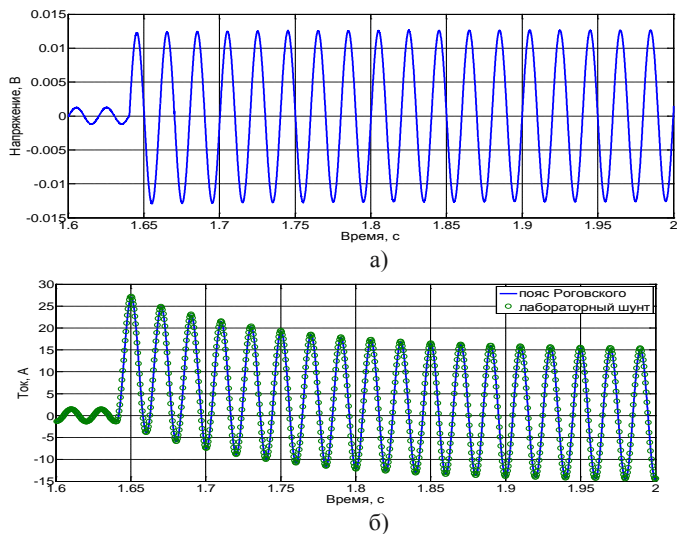


Рисунок 7. Сигнал катушки Роговского при первичном токе с аperiodической составляющей: а – до интегрирования; б – после интегрирования и приведения к первичному току.

5. Для выбранных экспериментальных образцов амплитудная и угловая погрешности катушки Роговского не выходят за рамки допустимых погрешностей при исследовании в широком температурном диапазоне (рисунок 8).

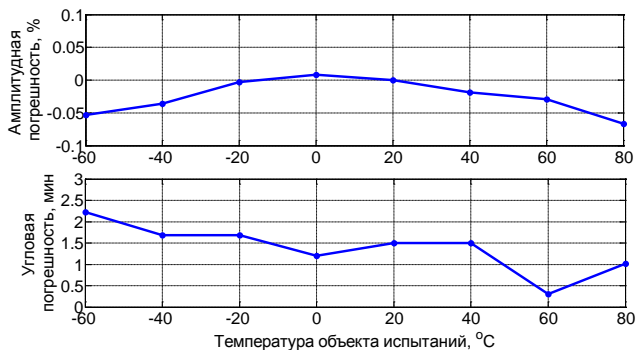


Рисунок 8. Зависимости амплитудной и угловой погрешностей катушки Роговского от температуры.

Выводы

Выполненные исследования метрологических характеристик катушек Роговского позволяют полноценно оценить преимущества использования ЦТТН для дистанционных методов ОМП по ПАР. Данные преобразователи имеют следующие особенности, приводящие к уменьшению инструментальной погрешности ОМП:

– Преобразование токов в широком диапазоне амплитудных и частотных значений с нормируемой погрешностью, даже при изменении влияющих факторов (температуры, положения преобразователя и др.).

– Воспроизведение формы первичного тока посредством интегрирования без искажения даже при наличии аperiodической составляющей в первичном токе. Катушка Роговского не имеет магнитного сердечника, что приводит к отсутствию явлений насыщения и остаточной намагниченности.

Точное воспроизведение формы кривой тока при отсутствии влияния воздействующих факторов позволяют использовать данный тип преобразователей в целях дистанционного ОМП по ПАР на мгновенных значениях [14] с минимальной инструментальной погрешностью.

Список литературы

1. Письмо заместителя министра энергетики от 02.04.2019 № ЧА-3440/10. «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты». – <https://docs.cntd.ru>.
2. ПНСТ 283-2018 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока. – М.: Стандартинформ, 2018.
3. ГОСТ Р 70358-2022 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Требования к работе устройств релейной защиты линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше в переходных режимах, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока. – М.: Российский институт стандартизации, 2023.
4. ГОСТ Р (первая редакция) Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Методические указания по определению параметров электромагнитных трансформаторов тока для обеспечения правильного функционирования релейной защиты в переходных режимах. . – М., 2021.
5. IEC 61869-9 Instrument Transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers, 2016.
6. Афанасьев В.В, Адоньев Н.М., Кибель В.М. и др. Трансформаторы тока. - 2-е изд., перераб. и доп. изд. - Л.: Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1989. - 416 с
7. IEC 61850-9-2: Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3 – First edition.
8. Исследование характеристик и перспективы использования цифровых трансформаторов тока и напряжения / В. Д. Лебедев, А. А. Яблоков, Г. А. Филатова

[и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 2(47). – С. 22-27. – EDN YVOBJP.

9. V. D. Lebedev, A. A. Yablokov, G. A. Filatova, and N. V. Lebedeva, “Specific features of digital current and voltage transformers for relay protection, automation and commercial electric power metering”, 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA), pp. 1–12, 2018. DOI: 10.1109/RPA.2018.8537187.

10. ООО НПП «Цифровые измерительные трансформаторы». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://digitrans.ru/>, свободный, (Дата обращения: 15.10.2023).

11. ООО «АЙ-ТОР». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://i-tor.ru/>, свободный, (Дата обращения: 15.10.2023).

12. ООО «Оптиметрик». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://optimetrik.ru/>, свободный, (Дата обращения: 15.10.2023).

13. TesmecS.p.A.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tesmec.com/>, свободный, (Дата обращения: 15.10.2023).

14. Шарыгин Д.С., Яблоков А.А., Филатова Г.А. Многофакторное автоматизированное исследование методов определения места повреждения на модели воздушной линии электропередачи 500 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2023. – №. 4. – С. 5-17. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.4.005-017.

УДК 519.677

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА В
КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УНРС ПРИ
ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ РУБАШКИ И
ЭКСЦЕНТРИЧНЫМИ ВЫХОДНЫМИ ОКНАМИ
ВПОГРУЖНОМ ГЛУХОДОННОМ СТАКАНЕ.**

Дмитриев Э.А.¹, Карпенко В.А.², Одинокое В.И.³, Евстигнеев А.И.⁴

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», Россия,
г. Комсомольск-на-Амуре

¹д.т.н., профессор; ²соискатель; ³д.т.н., профессор; ⁴д.т.н., профессор
e-mails: ¹rector@knastu.ru, ²volodya.karpenko.89@mail.ru, ³79122718858@yandex.ru,
⁴diss@knastu.ru

Аннотация. В статье изложены результаты математического моделирования движения потоков жидкого металла в объеме прямоугольного кристаллизатора УНРС при различных оборотах вращения рубашки и эксцентричных выходных окнах в стакане. Выявлены особенности течения металла по объему кристаллизатора в разных его сечениях. Установлены условия заброса жидкого металла в шлаковую область.

Ключевые слова: жидкий металл, кристаллизатор, принудительное перемешивание, скорость вращения, математическая модель, скорости потоков.

Введение

Теоретические и практические вопросы подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС рассмотрено в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей, в том числе и авторов настоящей работы.

В последних работах Одинокое В.И., Дмитриева Э.А., Евстигнеева А.И. заложены предпосылки и методология концептуального подхода по математическому моделированию процессов подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе, на базе которых продолжают разработку и исследования по моделированию новых разработок процессов.

Однако, несмотря на имеющийся существенный задел, следует отметить, что проблема проектирования и моделирования процессов и устройств подачи и перемешивания расплава в кристаллизаторе остается изученной недостаточно широко.

Таким образом, актуальной задачей остается разработка новых процессов по подаче и перемешиванию расплава в кристаллизаторе и их математическое моделирование, позволяющее ещё на стадии разработки и проектировании новых устройств предсказать их работоспособность и эффективность.

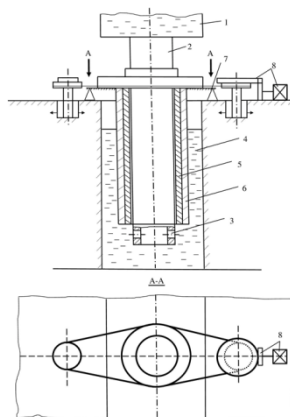
Одной из последних разработок авторов является разработка нового способа перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС за счет использования эффекта принудительного вращения мешалки [1].

Именно решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Целью настоящей работы является постановка и решение задачи по математическому моделированию процесса движения потоков жидкого металла в прямоугольном кристаллизаторе и доказательстве эффективности принудительного вращения для перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС по сравнению со свободным перемешиванием.

2. Инженерная и математическая постановка задачи.

На рисунке 1 представлена схема устройства для такого процесса [1], а на рисунке 2 – формализованная расчетная схема процесса с рассматриваемыми сечениями, для которой построена математическая модель численного моделирования процесса.



*Рисунок 1. Схема устройства для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе с вращающимся стаканом с вертикальными ребрами
1 – разливочный ковш; 2 – глухой погружной стакан; 3 – выходные эксцентричные окна; 4 – вертикальный кристаллизатор; 5 – огнеупорная рубашка; 6 – вертикальные ребра; 7 – упорная плита; 8 – механизм принудительного вращения (привод).*

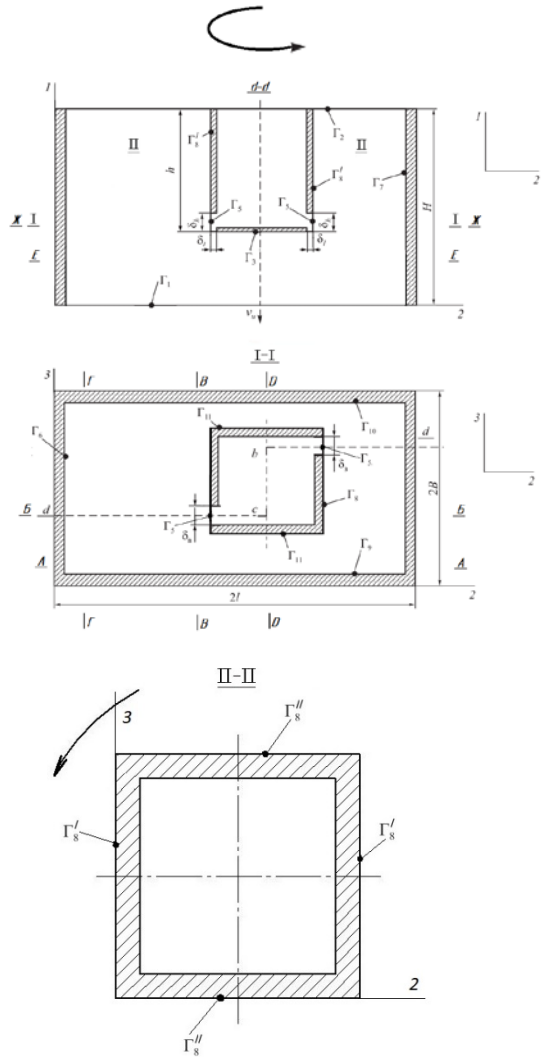


Рисунок 2. Формализованная расчетная схема процесса разливки металла в кристаллизатор.

Из ковша 1 металл через глухонный стакан 2 поступает в вертикальный кристаллизатор 4. Глухонный стакан 2 имеет эксцентрично расположенные отверстия 3. По наружной поверхности глухонного стакана выше его выходных отверстий установлена с

зазором огнеупорная рубашка 5, имеющая вертикальные ребра 6, соединенная с механизмом вращения, состоящим из упорной плиты 7, и механизма принудительного вращения 8.

Методология построения математической модели такого процесса, численная схема и алгоритм решения задачи подробно описано в работе [2], поэтому авторы сочли правомерным рекомендовать читателям в полном объеме ознакомиться в первоисточнике.

Рассматриваемый процесс стационарный, вернее – квазистационарный. При математическом описании данного процесса были приняты ряд допущений (формализация). Глухонный стакан в сечении выпуска и вращающаяся огнеупорная рубашка имеют одинаковое внешнее квадратное сечение, тогда огнеупорная рубашка при вращении будет перемешивать жидкий металл в кристаллизаторе также и своими гранями.

При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата огнеупорной рубашки как бы выталкивает жидкий металл от себя, а вторая половина грани втягивает металл. В этом случае, можно считать погруженный стакан неподвижным, а через её грани втекает и вытекает металл со скоростями пропорциональными скоростям вращения и геометрическим размерам квадратного сечения огнеупорной рубашки. Такая идеализация подробно описана в работе [2] и позволяет рассматривать данный процесс как стационарный. Кроме того, не учитывается появляющуюся на гранях кристаллизатора корочку затвердевшего металла.

Среда (жидкий металл) считается несжимаемой.

Тогда уравнение гидродинамики – это течение ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости, для которой справедливы уравнения:

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*, I_i^* = \rho \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}, \xi_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (2)$$

$$v_{i,i} = 0, \quad i = 1,2,3, \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a\Delta\theta; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i}, \quad i = 1,2,3. \quad (4)$$

Здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера; p – давление в данной точке ($p = -\sigma$); σ – гидростатическое напряжение; μ – коэффициент вязкости (г·сек/см²); v_i – проекция скоростей перемещений по координатным осям x_i ($i = 1,2,3$); ρ – плотность жидкого металла; F_i^* – проекция удельной объемной силы на координатные оси x_i ($i = 1, 2, 3$); τ – время; Δ – Лапласа оператор; θ – температура; a – коэффициент температуропроводности $a = \lambda/(c \cdot \gamma)$; λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; γ – удельный вес. Все они принимаются постоянными константами. Для стационарного процесса:

$$\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0.$$

Уравнение теплопроводности записано с учетом массопереноса и стационарности.

На рисунке 2 представлена расчетная схема рассматриваемого процесса. Граничные условия задачи (рисунок 2):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{\Gamma_2} &= p_1; \quad (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 1 \div 3 \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i} &= 0; \quad i = 5, 6, 7, 8; \quad \sigma_{31} = \sigma_{32}|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9, 10, 11; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i} &= 0; \quad i = 5, 6, 7, 8; \quad \sigma_{31} = \sigma_{32}|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9, 10, 11; \\ (\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma'_8} &= 0; \quad (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{\Gamma''_8} = 0; \\ v_2|_{\Gamma_5} &= v^*; \\ v_3|_{\Gamma''_8} &= V_t; \\ v_2|_{\Gamma'_8} &= V_t; \\ v_1|_{\Gamma_1} &= v_u; \\ v_1|_{\Gamma_3} &= 0; \\ v_2|_{\Gamma_i} &= 0; \quad i = 6, 7, 8; \\ v_3|_{\Gamma_i} &= 0; \quad i = 9, 10, 11. \end{aligned} \tag{5}$$

При решении уравнения теплопроводности (4) использовались граничные условия:

$$\theta|_{\Gamma_i} = \theta_i^*, i = 1 \div 10; \quad (6)$$

$$q|_{\Gamma_i} = q_i^*, i = 6,7,9,10.$$

Здесь v_u – скорость вытягивания слитка (рисунок 2); v_2^* – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана; θ_i^* – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях Γ_i ; q_i^* – заданные из экспериментальных данных тепловые потоки через поверхности Γ_i ; θ_5^* – заданная температура выхода металла из окна Γ_5 .

Численная схема и алгоритм решения системы уравнений (1...4) при граничных условиях (5, 6) подробно описан в работе [2] с использованием широко апробированного численного метода [3].

Результаты решения задачи

Результаты расчетов скоростей движения потоков жидкого металла в сечениях (Б-Б, Г-Г), из приведенных сечений на рис. 2, при различных числах оборотов вращающейся рубашки представлены на рис. 3-4.

Потоки скоростей течения металла в плоскости (x_1, x_2) для $n = 10$ об/мин (рисунок 3, а); $n = 30$ об/мин (рисунок 3, б); $n = 50$ об/мин (рисунок 3, в). Качественно картины потока в этом сечении похожи. Несколько отличается картина потоков при $n = 10$ об/мин (рисунок 3, а). Здесь наблюдаются, в отличие от $n = 30, 50$ (об/мин) двойной вихрь под погружным стаканом. С возрастанием скорости вращения рубашки возрастают пропорционально и скорости движения потоков жидкого металла (рисунок 3), увеличивается биение металла в боковые стенки в верхней части кристаллизатора, особенно при $n = 50$ об/мин. Наблюдается даже возможный выход жидкого металла в шлаковую зону (поверхность Γ_2) в стыке с поверхностью Γ_7 (рисунок 3, в). Такое явление нежелательно, так как выход металла в шлаковую рубашку вызывает бурление и заброс шлака в металл, что негативно скажется на качестве получаемого непрерывного слитка.

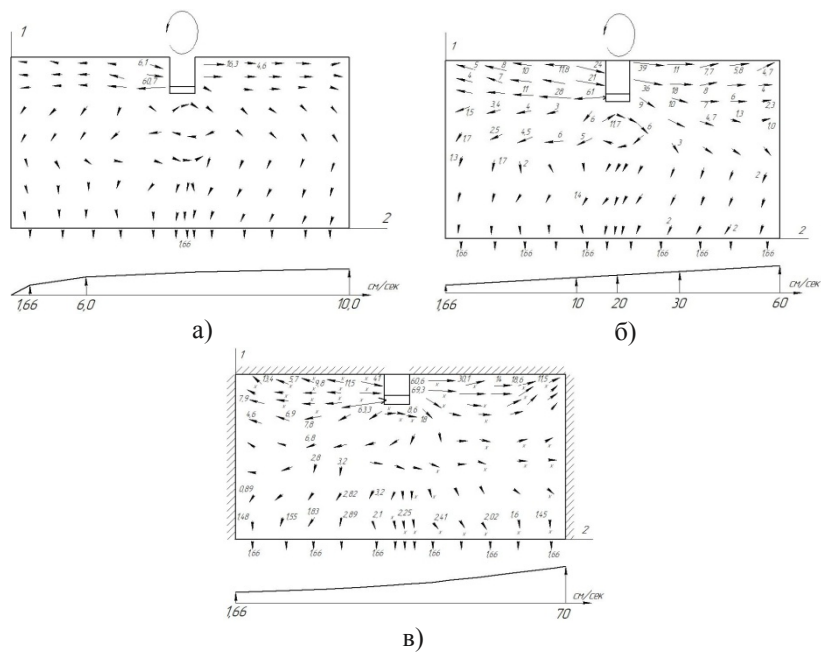


Рисунок 3. Поля скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Б-Б при следующих оборотах рубашки: $n = 10$ об/мин (а), $n = 30$ об/мин (б), $n = 50$ об/мин (в).

Дать анализ температурным потокам довольно затруднительно. По всему объему идут потоки жидкого и кристаллизующегося металла. На рисунке 3, в крестиками обозначены зоны металла выше температуры кристаллизации. Ниже уровня погружного стакана наблюдается полный хаос. Может это и не плохо с точки зрения зарождения центров кристаллизации.

Как было отмечено выше, при скорости вращения $n = 50$ об/мин металл в узких стенках кристаллизатора может проникать в область шлаковой подушки.

На рисунке 4 показано поле движения жидкого металла (сечение Г-Г). Действительно, движение жидкого металла направлено вверх, при чем это движение охватывает по высоте половину вертикальной плоскости боковой стенки кристаллизатора, ускоряясь к шлаковой рубашке, где достигает величины 10 см/сек. В этом сечении металл устремляется интенсивно вниз от шлаковой рубашки. Можно предположить, что под шлаковой рубашкой происходит

интенсивные вихревые движения металла. Это не очень полезное явление, так как может быть захват шлака в область непрерывного слитка, это негативно повлияет на его качество.

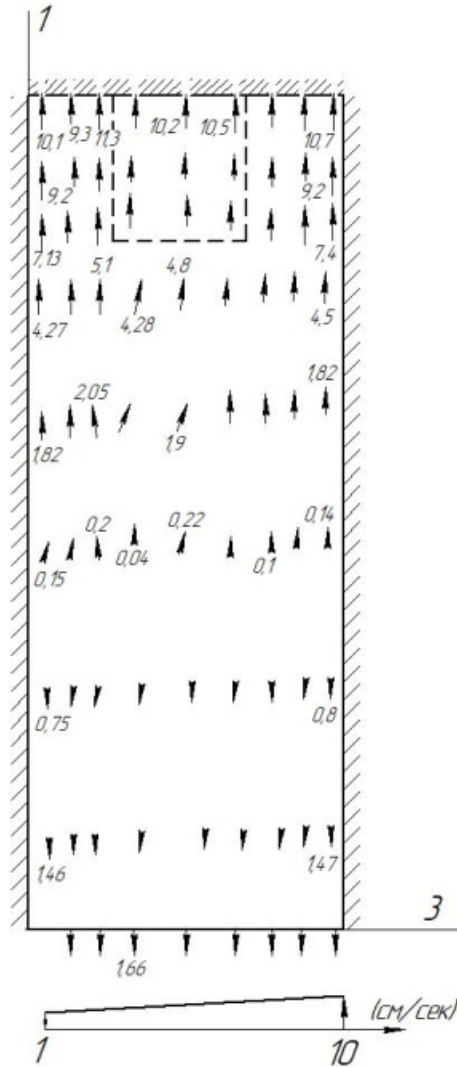


Рисунок 4. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Г-Г при $n = 50$ об/мин.

Выводы

Полученные численные результаты теоретического исследования показали что при принудительном перемешивании жидкого металла в кристаллизаторе прямоугольного сечения происходит интенсивное омывание стенок кристаллизатора, что безусловно способствует отводу тепла от жидкого металла к стенкам кристаллизатора; внутри кристаллизатора, особенно в верхней его части наблюдается ускоренное движение потоков жидкого металла; на узких стенках кристаллизатора наблюдается заброс жидкого металла (даже при $n = 30$ об/мин) в область шлаковой рубашки, что может привести к попаданию части шлака в непрерывно-литой слиток. Чтобы избежать этого явления можно продвинуть погружной стакан вместе с вращающейся рубашкой глубже в кристаллизатор, что возможно при увеличении высоты кристаллизатора.

Список литературы

1. Патент №2764446 РФ. Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки / Одинок В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Александров А.Ю., Карпенко В.А.; заявл. 20.05.2021; опубл. 17.01.2022.
2. Одинок В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Карпенко В.А. Математическое моделирование процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установке непрерывной разливки стали // Математическое моделирование и численные методы. 2023, №3, с. 63-87.
3. Одинок В.И., Каплунов Б.Г., Песков А.В., Баков А.В. Математическое моделирование сложных технологических процессов. – М.: Наука, 2008. – 176 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОСТЕКЛА

Федосов С.В.¹, Баканов М.О.², Грушко И.С.³

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия;

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Россия;

³Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

Ключевые слова: пеностекло, методы сетевого планирования, функция Харингтона, макрофизические параметры, термическая обработка

Реализация технологического процесса, как правило, сопряжена с большим количеством взаимосвязанных технологических операций, когда в работу вовлекается множество людей и процессов. В планировании и управлении сложными комплексами работ, высокоэффективными оказались сетевые методы и модели на основе построения сетевых графиков [1]. Наиболее оправдано применение сетевых методик при организации работы крупных промышленных предприятий. Такой подход позволяет системно рассматривать все технологические процессы, оценивать их надежность и эффективность. Суть метода сетевого планирования и управления сводится к применению системы методов графического и расчетного плана, а также способов и технологий контроля и оценки технологических операций, которые в совокупности позволяют составить общее представление о процессах и провести их анализ и моделирование.

Сетевой график – ключевое и системообразующее понятие метода сетевого планирования. Он представляет собой графическое изображение технологического процесса, совокупность составляющих его элементов и связей, возникающих между ними в процессе функционирования предприятия. Все технологические операции представляются наглядно и поэтапно, что позволяет оценивать их как единое целое.

Сетевые графики применяются на протяжении многих лет на предприятиях различного масштаба и профиля деятельности. Анализ показал, что все сетевые модели могут быть классифицированы по их структуре и содержанию. Так детерминированными считаются те модели, в которых последовательность и расположение элементов,

а также длительность проведения шагов процесса четко определяются и заранее известны. В число таких моделей входят:

1. Метод сетевого графика [2].

2. Гистограмма/диаграмма Ганта – это горизонтальная гистограмма на временной шкале, которая представляет план проекта (технологического процесса) во времени [3].

3. Линейка баланса (Line of balance – LOB), в технологии организации строительства используется как метод вертикального производства (Vertical production method – VPM). Это процесс управления, используемый при организации строительства, когда проект включает блоки повторяющихся видов работ (операций), таких как дороги, трубопроводы, туннели, железные дороги и высотные здания. LOB собирает, измеряет и представляет информацию, относящуюся ко времени, стоимости и завершению, и представляет ее по конкретному плану [4].

4. Линейные расписания (Linear schedules – LS), адаптированные несколькими методами, среди которых модель линейного расписания (linear scheduling model – LSM) [5].

На практике чаще всего применяются сетевые графики – CPM (Critical path method) и метод оценки и пересмотра планов – PERT (Program evaluation and review technique). Использование указанных методик в технологических процессах началось в 50-х гг. XX века [2]. При организации работы крупного промышленного предприятия они наиболее оправданы, поскольку обеспечивают оптимизацию и систематизацию управления сложными процессами. Результат применения методов – минимизация издержек при общем сокращении времени исполнения проекта.

Методы МКП/PERT также являются эффективными методами решения многих задач химической технологии [6, 7]. Например, в периодических химических процессах, где можно выразить несколько процессов, как последовательность взаимосвязанных технологических операций, позволяет определить объем капитальных вложений для оптимизации планирования средств, где появляется возможность определить стоимость технологического процесса, который может включать в себя до 1000 операций. Также метод PERT можно применять к таким задачам планирования, как оценка и прогнозирование времени окончания химических процессов в случаях, когда временные параметры отдельных операций не определены. Вместе с тем проблемы, которые могут быть решены с помощью методов МКП/PERT могут охватывать многие отрасли перерабатывающей промышленности, таких как сталелитейная,

фармацевтическая, строительная и пищевая. Кроме того, методы МКП/PERT могут быть адаптированы к процессам организации строительства предприятий химической промышленности [8].

МКП также применяется как в строительных проектах [9], так и во всех проектах, в которых необходимо произвести оптимизацию временных параметров выполнения определенных операций и проекта в целом [10, 11]. Например, в США и Великобритании представленные методы нашли широкое применение при планировании и контроле выполнения работ и технологических операций [12, 13]. Методы МКП/PERT применяются во многих проектах и странах, таких как Финляндия и Бразилия, где они широко используются в качестве инструментов планирования и контроля производства [14, 15].

Применение сетевого планирования позволяет визуализировать производственные и технологические процессы, выстроить порядок выполнения работ, а также четко поставить цели и шаги для их достижения с минимальными затратами. Инструментами такого планирования становятся математические (сетевые) модели и графики. Они позволяют построить четкий алгоритм выполнения операций и достичь поставленных производством результатов.

Использование графиков упрощает работу руководителя как на этапе планирования работ, так и их выполнения. Такой способ позволяет представить наглядно конкретные операции, а также их взаимосвязь и результаты выполнения работы. Управление становится доступным и эффективным, а использование ресурсов – рациональным [16]. Практическое применение сетевого планирования находит отражение в виде следующих направлений:

- строительно-монтажные работы в сфере возведения промышленных и бытовых объектов;
- ремонтные работы, а также реконструкция зданий и сооружений;
- научно-исследовательская и проектная деятельность в сфере машиностроения, требующая участия нескольких субъектов и выполнения сложных операций.

Методы сетевого планирования рассматриваются сегодня как наиболее прогрессивный и современный метод обеспечения работы производства, который предполагает рациональное использование трудовых и прочих ресурсов предприятия. Выгода от применения данной методики выражается в виде снижения сроков сдачи продукции до 15-20 % [16].

Основные достоинства, принципы метода сетевого планирования, а также последовательность его реализации приведены на рисунке 1.

МЕТОДЫ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ CPM - Critical Path Method		
СУЩНОСТЬ МЕТОДОВ сетевого планирования и управления The essence of the Critical Path Method	ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДОВ сетевого планирования и управления Basic principles of the Critical Path Method	ДОСТОИНСТВА МЕТОДОВ сетевого планирования и управления Advantages of the Critical Path Method
1) процесс, подлежащий планированию и управлению, представляется в виде сетевого графика, отражающего логическую и технологическую последовательность, взаимную связь между составляющими (технологическими операциями) процесса; the process to be planned and controlled is presented in the form of a network diagram reflecting the logical and technological sequence, the interconnection between the components (technological operations) of the process	1. Единство целей на всех уровнях планирования. Unity of purpose at all planning levels	сетевой график, в том числе для сложных технологических процессов, позволяет обоснованно и оперативно планировать, выбирать оптимальный вариант технологических режимов и работ, использовать резервы и корректировать график в ходе технологического процесса
2) производится детальный расчёт временных характеристик всего технологического процесса и его составляющих, выявляются резервы времени, определяются соответствие длительности процесса поставленным требованиям; a detailed calculation of the time characteristics of the entire technological process and its components is carried out, time reserves are identified, and the compliance of the process duration with the requirements set is determined	2. Ранжирование объектов планирования. Planning objects ranking	в сетевом планировании и управлении достигается высокая степень реализации системного подхода the critical path method achieves a high degree of implementation of the system approach
3) на основе анализа затраченных ресурсов производится оптимизация сети, т.е. формируется и рассчитывается такой сетевой график (план), при котором планируемый технологический процесс будет удовлетворять поставленным производственным задачам; Based on the analysis of the resources spent, the network is optimized, that is, such a network schedule (plan) is formed and calculated in which the planned technological process will satisfy the set production tasks	3. Адекватность плановых технологических показателей. Adequacy of planned technological parameters	сетевой график позволяет применять компьютерную технику и технологии. В современных условиях широкое применение в управлении методов сетевого планирования стало возможным благодаря их сопоставимости с компьютерными технологиями, обеспечившими ускорение расчетов сетевых моделей
4) в процессе управления технологическим процессом производится регулярное сравнение сетевого графика с фактическим ходом технологического процесса. in the process of process control, a regular comparison of the network schedule with the actual course of the technological process is made	4. Соответственность плана с параметрами внешней среды системы технологического управления. Consistency of the plan with the parameters of the external environment of the technological control system	сетевой график позволяет применять компьютерную технику и технологии. В современных условиях широкое применение в управлении методов сетевого планирования стало возможным благодаря их сопоставимости с компьютерными технологиями, обеспечившими ускорение расчетов сетевых моделей
	5. Вариантность плана. Variation of the plan	
	6. Сбалансированность плана. Balance of the plan	
	7. Экономическая обоснованность плана. Economic soundness of the plan	
	8. Автоматизация системы планирования. Planning system automation	
	9. Обеспечение обратной связи системы планирования. Ensuring feedback to the planning system	

Рисунок 1. Принципы, достоинства и сущность методов сетевого планирования и управления.

Производство пеностекла представляет собой сложный технологический процесс, требующий поиска оптимальных механизмов его планирования и организации. Ключевыми свойствами данной производственной системы становятся надежность, устойчивость, точность, помехозащищенность. Использование их значений и показателей оправдано при организации рационального процесса управления предприятием и производственными процессами. При этом следует понимать, что результативность будет зависеть от десятков различных параметров и факторов, которые могут быть оценены путем применения к ним методов математических вероятностей [17]. Следовательно, можно говорить как о научной, так и практической значимости исследований в области оптимизации процессов производства пеностекла.

Моделирование последовательно реализующихся технологических операций в рассматриваемой отрасли производства предполагает поиск эффективных механизмов управления, в числе

которых особенно выделяется метод сетевого планирования или СПУ. Таким образом, целью исследования является разработка рациональных технологических режимов производства пеностекла с использованием методов сетевого планирования и управления с учетом влияния на стадии предпроектной подготовки результатов моделирования воздействия температуры на пеностекло. Также необходимо произвести качественную и количественную оценку модернизированных сетевых графиков процесса производства пеностекла с учетом скорректированных временных параметров при моделировании процессов термической обработки пеностекла.

В рамках исследования ставились следующие задачи:

1. Определение признаков классификации общих этапов технологического процесса производства пеностекла в соответствии с операционными задачами;
2. Логико-математическое описание и формализация этапов технологического процесса производства пеностекла;
3. Определение показателей эффективности применения методов сетевого планирования при описании технологического процесса производства пеностекла.

Объектом исследования становится двухстадийный порошковый способ производства пеностекла. Процесс проведения эксперимента основывается на предположении о необходимости представления производственно-технологического процесса как совокупности взаимосвязанных стадий или этапов. Системообразующим фактором при этом становится общая операционная задача. В рамках данной работы выделяются следующие этапы данного процесса: проектирование технологического процесса; подготовка сырья; измельчение сырья; тепловая обработка пеностекла; подготовка готовой продукции (пеностекла). Следующий этап исследования предполагает разбивку указанных стадий на более мелкие с целью выделения алгоритмов их функционирования и определения присущих им закономерностей.

Формирование сетевой модели технологического процесса производства пеностекла осуществляется по принципу применения метода математических параметров и их сопоставления на основании данных относительно роли каждого их этапов в получении единого результата [18]. Далее производится аналогичное изучение вклада параметров в процесс при классическом планировании.

В составе первой стадии подготовки сырья были выделены следующие операции: сортировка стекла; мойка стекла; сушка;

измельчение стекла; тонкий помол стеклобоя. Время процесса рассчитывали из расчета на производство 1 м^3 пеностекла.

Подготовка сырья в рамках нашего исследования рассматривается в качестве совокупности этапов дозирования компонентов, помола пеностеклольной шихты, их гомогенизации компонентов и засыпки в форму для вспенивания.

На этапе тепловой обработки постепенно реализуются такие операции, как: нагрев шихты до температуры $800\text{--}850 \text{ }^\circ\text{C}$; вспенивание при $800\text{--}850 \text{ }^\circ\text{C}$; порообразование; отжиг до $30\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$. Наконец, завершается процесс изготовления пеностекла двумя операциями – извлечением продукции из форм и ее опилкой [19–21].

Формирование сетевого графика процесса изготовления пеностекла в ходе термической обработки производится с учетом факторов, которые определяют закономерности протекания данного процесса. К ним относятся: единство этапов производства; система и последовательность реализации этапов производства; начало этапа только после окончания предыдущего; применение принципов, которые присущи в целом технологическому процессу стеклопроизводства. В зависимости от значения временного параметра устанавливаются две предельные границы – пессимистическая (*min*) и оптимистическая (*max*). Среднее время выполнения также рассчитывается как на каждую отдельно взятую операцию, так и на этап технологического процесса в целом [22–23].

Графически рабочий сетевой график технологического процесса, описанного выше, отображен на рисунке 2. На рисунке 3 представлен сетевой график технологии производства пеностекла с учетом расчета необходимых параметров процесса, а именно среднего времени операции t_{cp} и дисперсии времени выполнения операции $\sigma^2(t)$. На рисунке 4 представлен доработанный сетевой график технологии пеностекла с учетом применения моделирования.

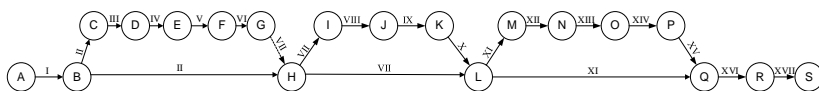


Рисунок 2. Рабочий сетевой график технологии производства пеностекла.

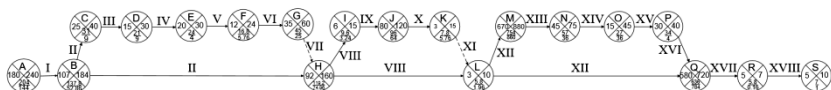


Рисунок 3. Доработанный сетевой график технологии производства пеностекла.

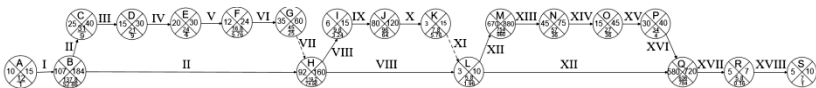


Рисунок 4. Доработанный сетевой график технологии пеностекла с учетом применения моделирования.

Для преобразования операционных этапов применяли распределение Гаусса, которое задавали плотностью вероятностей, представляющей собой индикаторную функцию для методов сетевого планирования [19, 20, 24]. Исследование технологии производства пеностекла по времени выполнены по методике, основанной на теории вероятности и нечетких функций принадлежности и учитывающей средние значения времени выполнения различных операций и дисперсии времени их выполнения [25].

На рисунке 5, а продемонстрированы плотности распределения времени выполнения операций исходного и модернизированного сетевого графика технологии производства пеностекла.

Таким образом можно сделать следующее заключение относительно данных на рисунке 4: несмотря на относительную стабильность значения временного фактора в процессе применения сетевого графика в производстве пеностекла, ярко выражена положительная динамика в рациональном распределении времени на выполнение отдельных технологических операций. В результате кривая среднего времени, характерная для применения метода сетевого планирования, смещена влево относительно кривой исходного сетевого графика. Указанные данные можно интерпретировать как количественное подтверждение отсутствия видимого и значительного влияния со стороны сетевых графиков на возможную неопределенность необходимого времени работы. Единственной стадией производственного процесса, которая оказалась в сильной зависимости от указанного параметра, стала непосредственно стадия внедрения математического моделирования

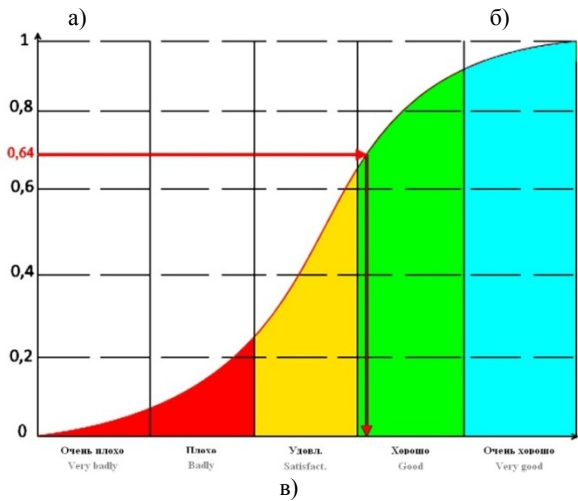
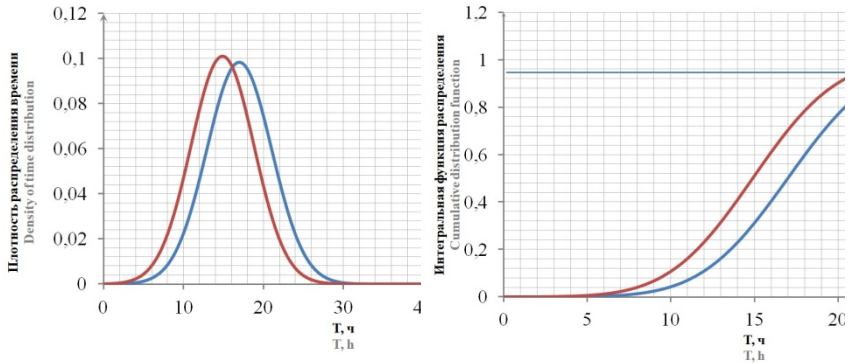


Рисунок 5. Графическое изображение результатов расчетов
 а) Плотность распределения времени выполнения операций исходного и модернизированного сетевого графика технологии производства пеностекла
 б) Интегральная функция распределения времени производства пеностекла
 в) Значения D-функции Харрингтона.

физико-технических параметров конечного продукта. Следовательно, степень эффективности применения указанных методов планирования и управления на этапе «Проектирование технологического процесса» должна оцениваться дополнительно для получения объективных данных. Количественная оценка в данном случае будет выражена вероятностью отклонения распределения времени работ двух сетевых графиков. При оценке параметров эффективности внедрения модели

производили расчет D функции Харрингтона [26-28], на рисунке 5, б представлены границы интервалов интегральной функции распределения.

На основании суммарного времени осуществления технологического процесса на производстве могут быть сформулированы выводы относительно заданной вероятности и ее значений. В выбранной постановке задачи сетевого моделирования на основе статистики распределения времени отдельных операций можно заключить, что при достоверности 0,9 – наперед заданной вероятности время реализации рассматриваемого цикла технологического процесса без применения результатов моделирования составит до 22,2 часа (см. рисунок 5, б, синяя линия) и с применением результатов моделирования – до 19,9 часов. Отсюда можно сделать вывод, что время необходимое для производства единицы продукции снижается более чем на 10 %. Представленная характеристика (%) является количественной оценкой эффективности производства по критерию времени выполнения. Для качественной оценки применим D функцию Харрингтона.

Для построения общего показателя эффективности сетевого моделирования при совершенствовании производства следует применять функцию желательности Харрингтона [29]. Построение обобщенной функции базируется на преобразовании натуральных значений частных показателей эффективности производства в безразмерную шкалу предпочтительности. Все показатели имеют физический смысл и размерность. Для объединения различных показателей, необходимо вводить для каждого из них некоторую безразмерную шкалу. Шкала должна быть одинаковой для всех объединяемых факторов, это позволяет их сравнивать. Выбор шкалы – задача, зависящая от априорной информации о частных факторах, а также от той точности, с которой определяется обобщенный признак.

Метод количественных оценок с значениями предпочтительности d от 0 до 1, представляется наиболее эффективным для построения шкалы желательности. Значение $d=0$ (или $D=0$) соответствуют абсолютно неприемлемому значению критерия, а $d=1$ ($D=1$) – самому лучшему значению, при этом последующее улучшение критерия или невозможно, или не представляет интереса.

Построенная шкала D представляет собой безразмерную шкалу, при помощи которой отклик может быть преобразован так, чтобы его можно было интерпретировать в терминах полезности или желательности для любого специфического применения (рисунок 5, в).

Анализируя результаты, представленные на рисунке 5, в, можно сделать вывод, что интегральный показатель эффективности технологического процесса производства пеностекла с учетом использования на этапе планирования технологии математического моделирования макрофизических параметров процессов высокотемпературной термической обработки пеностекла составляет значение 0,64, что соответствует уровню «хорошо» по шкале D-функции Харрингтона.

Заключение и обсуждение

Проведенное исследование показало, что применение математического моделирования макрофизических параметров процессов высокотемпературной термической обработки пеностекла на стадии разработки и создания моделей технологического процесса позволяет существенно повысить эффективность работы предприятия в среднем на 10 % и более. При этом важным инструментом достижения данной цели становится применение методов сетевого планирования и управления. Особенно значимо внедрение указанных технологий на предприятиях, технологический процесс которых включает в себя этап высокотемпературной термической обработки продукции. В указанных условиях эффективность повышается, что выражается в значениях энергоемкости, снижения издержек и себестоимости продукции.

Далее представим выводы, полученные в результате проведенной опытно-экспериментальной работы:

1. Технологический процесс производства пеностекла включает в себя набор операций, которые характеризуются временем их выполнения и последовательностью в производственном цикле, что позволяет произвести оценку каждой отдельной стадии с учетом затраченного временного параметра и объема выполненной работы на каждом участке, используя методы сетевого планирования;

2. Корректировка оценочных показателей выполнения отдельных операций при модернизации сетевого графика способствует уменьшению общего времени технологического процесса производства пеностекла, что влияет на себестоимость готового материала;

3. Измерение эффективности применения сетевых методов планирования на производстве пеностекла производится на основе значения общих временных затрат на выполнение технологических операций.

4. В качестве показателя эффективности (качественной оценки) применения методов сетевого планирования применяли функцию желательности Харрингтона, с учетом преобразования размерных показателей технологических операций в количественные оценки с интервалами значений желательности, на основе априорной информации о частных факторах процесса.

5. Значение интегрального показателя рациональности использования методов сетевых графиков в процессе производства пеностекла и моделирования макрофизических параметров процессов его высокотемпературной термической обработки составляет 0,64. Следовательно, можно говорить о целесообразности применения рассмотренной модели.

6. На основе статистики распределения временных показателей отдельных технологических операций можно заключить, что при достоверности 0,9 – наперед заданной вероятности время реализации этапа «Проектирование технологического процесса» без применения результатов математического моделирования составляет до 22,2 часа и с применением результатов математического моделирования – до 19,9 часов. На основе полученных данных можно сделать вывод, что время реализации технологического процесса снижается более чем на 10 %.

Список литературы

1. Тащиенко В. П., Шатъко Д. Б., Баканов А. А. Оптимизация технологического процесса на основе хронометража его ключевых операций //Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – №. 1 (137). – С. 12-19.
2. Malcolm D. G. et al. Application of a technique for research and development program evaluation //Operations research. – 1959. – Т. 7. – №. 5. – С. 646-669.
3. Yamin R. A., Harmelink D. J. Comparison of linear scheduling model (LSM) and critical path method (CPM) //Journal of construction engineering and management. – 2001. – Т. 112. – №. 4. – С. 476-491.
4. Ahuja H. N., Dozzi S. P., Abourizk S. M. Project management: techniques in planning and controlling construction projects. – John Wiley & Sons, 1994.
5. Harmelink D. J., Rowings J. E. Linear scheduling model: Development of controlling activity path //Journal of Construction Engineering and Management. – 1998. – Т. 124. – №. 4. – С. 263-268.
6. Kopanos G. M., Kyriakidis T. S., Georgiadis M. C. New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems //Computers & Chemical Engineering. – 2014. – Т. 68. – С. 96-106.
7. Kyriakidis T. S., Kopanos G. M., Georgiadis M. C. MILP formulations for single- and multi-mode resource-constrained project scheduling problems //Computers & chemical engineering. – 2012. – Т. 36. – С. 369-385.
8. Walton H. Experience of the Application of the Critical Path Method to Plant Construction //Journal of the Operational Research Society. – 1964. – Т. 15. – №. 1. – С. 9-16.
9. Liu L., Burns S. A., Feng C. W. Construction time-cost trade-off analysis using LP/IP hybrid method //Journal of construction engineering and management. – 1995. – Т. 121. – №. 4. – С. 446-454.

10. Hegazy T. Computerized system for efficient scheduling of highway construction //Transportation research record. – 2005. – Т. 1907. – №. 1. – С. 8-14.
11. Shi Q., Blomquist T. A new approach for project scheduling using fuzzy dependency structure matrix //International Journal of Project Management. – 2012. – Т. 30. – №. 4. – С. 503-510.
12. Galloway P. D. Survey of the construction industry relative to the use of CPM scheduling for construction projects //Journal of construction engineering and management. – 2006. – Т. 132. – №. 7. – С. 697-711.
13. Olawale Y., Sun M. Construction project control in the UK: Current practice, existing problems and recommendations for future improvement //International journal of project management. – 2015. – Т. 33. – №. 3. – С. 623-637.
14. Kemmer S. L., Heineck L. F. M., Alves T. C. L. Using the line of balance for production system design. – 2008.
15. Lucko G., Alves T. D. C. L., Angelim V. L. Challenges and opportunities for productivity improvement studies in linear, repetitive, and location-based scheduling //Construction Management and Economics. – 2014. – Т. 32. – №. 6. – С. 575-594.
16. Сафаргалиев М. Ф. Планирование производства новой продукции машиностроительного предприятия //Вестник экономики, права и социологии. – 2012. – №. 3. – С. 109-113.
17. Улитко Е.В., Лапидус А.А. Стохастическая модель технико-экономической эффективности организации строительства жилищных объектов // Строительное производство. – 2021. – №4. – С. 2-7. DOI: 10.54950/26585340_2021_4_1_2
18. Федосов С.В., Баканов М.О. Модели и методы высокотемпературной термической обработки в технологии пеностекла. – М.: Издательство «Спутник +», 2021. – 301 с. ISBN 978-5-9973-6096-2
19. Van Den Briel M. H. L., Kambhampati S. Optiplan: Unifying IP-based and graph-based planning //Journal of Artificial Intelligence Research. – 2005. – Т. 24. – С. 919-931. DOI: <https://doi.org/10.1613/jair.1698>
20. Gupta A., Singh R. K. Developing a framework for evaluating sustainability index for logistics service providers: graph theory matrix approach //International Journal of Productivity and Performance Management. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/MEQ-11-2019-0246>
21. Yatsenko E. A. et al. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials //Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – Т. 142. – №. 1. – С. 119-127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10015-3>
22. Karandashova N. S., Goltsman B. M., Yatsenko E. A. Analysis of influence of foaming mixture components on structure and properties of foam glass //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 262. – №. 1. – С. 012020. DOI:10.1088/1757-899X/262/1/012020
23. Lotov V. A., Krivenkova E. V. Kinetics of formation of the porous structure in foam glass //Glass and ceramics. – 2002. – Т. 59. – №. 3. – С. 89-93. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1019519727228>
24. Dutta P., Hazarika G. C. Construction of families of probability boxes and corresponding membership functions at different fractiles //Expert Systems. – 2017. – Т. 34. – №. 3. – С. e12202. DOI: <https://doi.org/10.1111/exsy.12202>
25. Федосов С. В., Баканов М. О. Совершенствование технологии получения пеностекла на основе методов сетевого моделирования // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 11. – С. 1551-1563. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563.
26. Топольский Н.Г., Тараканов Д.В., Михайлов Е.А. Теоретические основы поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики пожара в здании: монография / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Н.Г. Топольского. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 320 с.

27. Trautmann H., Weihs C. On the distribution of the desirability index using Harrington's desirability function //Metrika. – 2006. – T. 63. – №. 2. – С. 207-213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00184-005-0012-0>.

28. Bikbulatov E. S., Stepanova I. E. Harrington's desirability function for natural water quality assessment //Russian Journal of General Chemistry. – 2011. – T. 81. – №. 13. – С. 2694-2704. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070363211130111>.

29. Puring S. M., Vatusov D. N., Tyurin N. P. Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings //Procedia Engineering. – 2016. – T. 153. – С. 563-568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.192>.

УДК 624.01+004.942+004.032.26

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЕ НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ВИЗУАЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Згода Ю.Н.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Аспирант кафедры информационных систем и технологий
Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург
SPIN: 1887-3538, Scopus: 57219931047, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6714-500X>
e-mail: yurii.zgoda@mail.ru

Аннотация. Целью данной работы является анализ возможностей высокопроизводительного нейросетевого моделирования тонкостенных оболочечных конструкций. В рамках реализации данной цели была проведена серия вычислительных экспериментов, предполагающих визуализацию напряженно-деформированного состояния большого количества конструкций в виде 3D-графиков, а также изучены аспекты нейросетевого моделирования, связанные с сокращением длительности вычислений. Показано, что применение нейронных сетей обеспечивает существенное сокращение длительности вычислений и позволяет оперативно выполнять построение наглядных визуализаций, описывающих напряженно-деформированное состояние конструкций под воздействием внешних сил.

Ключевые слова: оболочки, нейросетевое моделирование, нейронные сети, машинное обучение, напряженно-деформированное состояние, Julia.

Введение

Среди основных направлений применения машинного обучения и нейронных сетей в архитектуре и строительстве можно выделить нейросетевое моделирование поведения строительных конструкций под воздействием внешних сил. В данной области машинное обучение обеспечивает повышение точности моделирования [1] и сокращение длительности вычислений [2]. Более того, ряд работ описывает возможность вывода эмпирических формул по результатам обучения нейросети [3]. В данной работе рассматривается нейросетевое моделирование тонкостенных оболочечных конструкций – криволинейных конструкций, у которых один из размеров (толщина) значительно меньше двух других. Ввиду высокой сложности математических моделей, описывающих поведение этого типа конструкций, их компьютерное моделирование требует длительных

ресурсоемких вычислений, в связи с чем вопрос высокопроизводительного моделирования этого типа конструкций является актуальным направлением современных исследований.

Существует два основных сценария использования нейронных сетей и глубокого обучения в моделировании нагруженных конструкций – использование нейросетей в качестве аппроксимационных функций для решения систем уравнений, описывающих поведение конструкций, а также обучение нейросети моделированию напряженно-деформированного состояния (НДС) под воздействием внешних сил. Примерами первого варианта является использование методов Physically-Informed Neural Networks (PINN) [4] и DeepRitz [5] для моделирования оболочек. Т. к. нейросеть выступает в роли аппроксимационной функции, в процессе обучения она с возрастающей точностью описывает решение конкретной расчетной задачи. Второй способ, которому посвящена данная работа, предполагает использование обучающего набора данных о поведении множества различных конструкций для создания в некотором смысле универсальной нейросети, способной моделировать поведение целого класса конструкций.

В исследованиях, посвященных нейросетевому моделированию строительных конструкций по второму подходу, для обучения нейросети применяют результаты физического или компьютерного моделирования. Использование физического моделирования позволяет разработать нейросеть, обладающую как высокой производительностью моделирования, так и высокой точностью моделирования относительно наблюдаемого в реальном мире поведения конструкции. Обучение на результатах вычислительного эксперимента позволяет повысить производительность моделирования, но не точность, т. к. в результате подобного обучения нейросеть будет аппроксимировать не поведение объектов реального мира, а математическую модель, заложенную в ПО компьютерного моделирования конструкции.

В рамках предыдущих исследований нами была разработана высокопроизводительная нейронная сеть моделирования тонкостенных цилиндрических оболочек, обученная на результатах компьютерного моделирования [6]. Предварительные исследования показали сокращение длительности вычислений с ее использованием примерно в 1 000 раз по сравнению с использованным для обучения авторским ПО OptiShellX [7]. В то же время, оценка производительности в рамках предыдущих работ производилась лишь

на тривиальных задачах наподобие построения диаграмм «нагрузка-прогиб», более сложные сценарии моделирования не рассматривались.

Целью данной работы является анализ возможностей высокопроизводительного нейросетевого моделирования тонкостенных оболочечных конструкций. В рамках реализации данной цели:

- была проведена серия вычислительных экспериментов, предполагающих визуализацию напряженно-деформированного состояния большого количества конструкций в виде 3D-графиков;

- изучены различные аспекты нейросетевого моделирования, связанные с повышением производительности вычислений.

Для проведения вычислительных экспериментов был использован компьютер на базе ОС Windows 10 19041.388, процессора AMD Ryzen 9 3900X, 64 ГБ ОЗУ и графического ускорителя Nvidia Geforce RTX 2070 Super. Для программной реализации использовался язык программирования Julia [8], версия интерпретатора 1.8.

Характеристики нейросети

Использованное для обучения нейросети ПО OptiShellX позволяет выполнять расчет с использованием геометрически-нелинейной физически-линейной модели Тимошенко-Рейснера [9]. НДС конструкции в этом случае описывается пятью двухмерными функциями U , V , W , определяющими поперечные, продольные и вертикальные перемещения соответственно, а также функциями Ψ_x , Ψ_y , описывающими углы поворота нормали в плоскостях xOz и yOz соответственно. Разработанная нейросетевая модель НДС цилиндрических оболочек позволяет выполнять расчет этих компонент в произвольной точке срединной поверхности конструкции. В качестве входных параметров, описывающих геометрию конструкции, сеть принимает следующие безразмерные параметры:

$$\bar{A} = \frac{a}{h}, \bar{B} = \frac{bR}{h}, \lambda = \frac{a}{bR}, k_n = \frac{h}{R},$$

где:

- a (метры) – линейный размер;
- b (радианы) – угол раскрытия;
- R (метры) – радиус кривизны;
- h (метры) – толщина.

Нейросеть обучалась на результатах вычислительных экспериментов с изотропными материалами, поэтому для описания конструкции достаточно двух параметров E (единица измерения – МПа) и μ (коэффициента Пуассона). Нагрузка в рамках рассматриваемой нейросетевой модели является равномерно-распределенной и прикладывается нормально к срединной поверхности.

Моделирование выполняется для срединной поверхности, поэтому координаты моделируемой точки конструкции определяются двумя безразмерными координатами x, y (диапазон изменения – от 0.0 до 1.0). Результаты моделирования с использованием нейросети также являются безразмерными, но для наглядности в рамках приведенных ниже результатов вычислительных экспериментов они были преобразованы в размерную форму.

По результатам измерений точности нейросетевого моделирования было обнаружено, что обученная нейросеть обладает погрешностью, близкой к 10% толщины конструкции. Задача построения пяти диаграмм «нагрузка-компонента НДС» для каждой из компонент в среднем решается нейросетью примерно в 1 000 раз быстрее (точные значения варьируются в зависимости от характеристик конструкции). Далее в данной работе будут рассмотрены различные сценарии применения разработанной нейросетевой модели, позволяющие эффективно использовать подобный прирост производительности.

Построение 3D-визуализаций с использованием нейросети

Рассмотрим следующую вычислительную задачу. Зафиксируем материал конструкции (сталь, $E = 2.1e5$, $\mu = 0.3$), ее толщину ($h = 0.02$ м), радиус кривизны ($R = 10$ м) и интенсивность прикладываемой равномерно-распределенной нормальной к поверхности конструкции ($q = 1.0$ МПа). Для некоторой фиксированной точки (например, геометрического центра конструкции) необходимо построить 3D-график, где по вертикальной оси откладывается вертикальный прогиб в этой точке, а по двум ортогональным осям – линейный размер a (в диапазоне от 10 до 20 м, всего 15 значений) и угол раскрытия b (в диапазоне от $\pi/2$ до π рад, всего 10 значений).

Построение подобной диаграммы с использованием классического ПО компьютерного моделирования сопряжено с рядом сложностей. Прежде всего, даже если исследователя интересуют результаты для конкретной прикладываемой нагрузки, большинство

методов моделирования конструкций предполагают ее последовательное нагружение. Следовательно, чтобы достичь прикладываемой моделируемой нагрузки интенсивностью в 1.0 МПа необходимо начать моделирование с 0.0 МПа и постепенно повышать нагрузку. Все полученные промежуточные результаты будут проигнорированы исследователем в рамках рассматриваемой задачи, но они необходимы для корректной процедуры моделирования.

Нейросетевая модель лишена подобного недостатка. Она позволяет выполнить моделирование при произвольных входных данных без необходимости в предварительном нагружении. Благодаря этому резко сокращается вычислительная сложность рассматриваемой задачи. Описанный выше 3D-график приведен на рисунке 1. Соответствующие вычисления заняли 0.3 секунды. Аналогичный расчет с использованием OptiShellX без использования GPU потребовал бы около 20 секунд на одну конфигурацию оболочек, всего необходимо выполнить 150 подобных расчетов (т. е. решение этой задачи путем использования классического компьютерного моделирования потребует примерно в 10 000 раз больше времени).

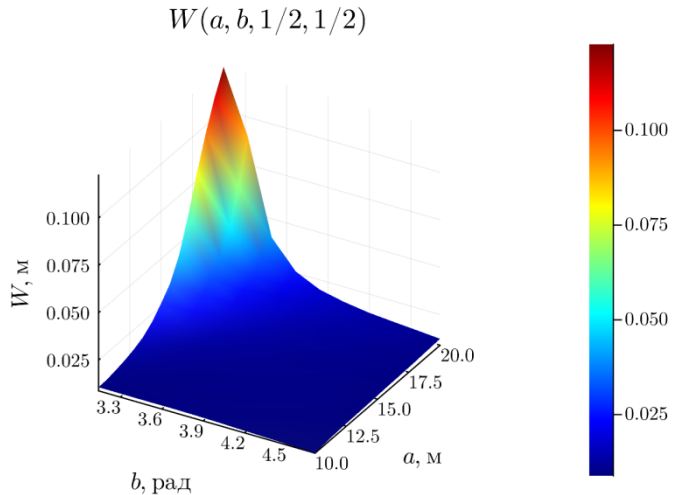


Рисунок 1. Построение трехмерного графика для вертикального прогиба в центре конструкции в зависимости от характеристик конструкции.

Однако подобного рода визуализации хоть и могут быть полезны, но не дают общего представления о поведении конструкции на всем

интервале по прикладываемой нагрузке. На рисунке 2 приведена диаграмма, в которой варьирование выполняется по радиусу кривизны (линейный размер зафиксирован на значении $a = 10.0$ м) и прикладываемой нагрузке (от 0.0 МПа до 5.0 МПа, всего 50 возможных значений). Длительность построения подобного графика – 0.11 секунды. Исходя из средней длительности одного «классического» вычислительного эксперимента в 20 секунд, получим сокращение длительности вычислений в 1 818 раз.

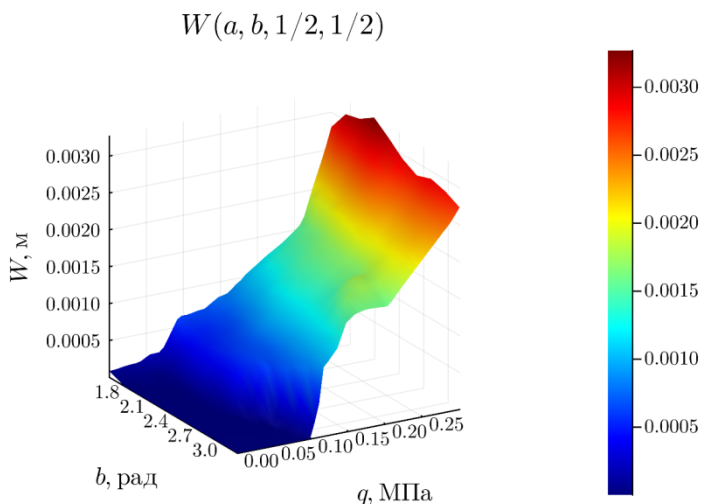


Рисунок 2. Построение трехмерного графика для вертикального прогиба в центре конструкции в зависимости от прикладываемой нагрузки и угла раскрытия.

Заключение

Как можно видеть из приведенных в рамках данной работы примеров, применение нейросетевого моделирования позволяет многократно сократить длительность вычислений. В зависимости от способа использования, нейросеть обеспечивает прирост производительности от сотен и тысяч до десятков тысяч раз. Нейросетевое моделирование лишено необходимости в последовательном нагружении, что позволяет исключить большое количество промежуточных вычислений в тех случаях, когда конструкцию необходимо исследовать начиная с ненулевого значения нагрузки.

Список литературы

1. Tahir Z. ul R., Mandal P., Adil M.T., Naz F. Application of artificial neural network to predict buckling load of thin cylindrical shells under axial compression // *Engineering Structures*. 2021. vol. 248. pp. 113221. doi:10.1016/j.engstruct.2021.113221.
2. Mallela U.K., Upadhyay A. Buckling load prediction of laminated composite stiffened panels subjected to in-plane shear using artificial neural networks // *Thin-Walled Structures*. 2016. vol. 102. pp. 158–164. doi:10.1016/j.tws.2016.01.025.
3. Hosseinpour M., Sharifi Y., Sharifi H. Neural network application for distortional buckling capacity assessment of castellated steel beams // *Structures*. 2020. vol. 27. pp. 1174–1183. doi:10.1016/j.istruc.2020.07.027.
4. Bastek J.-H., Kochmann D.M. Physics-Informed Neural Networks for shell structures // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2023. vol. 97. pp. 104849. doi:10.1016/j.euromechsol.2022.104849.
5. E W., Yu B. The Deep Ritz Method: A Deep Learning-Based Numerical Algorithm for Solving Variational Problems // *Communications in Mathematics and Statistics*. 2018. vol. 6. no. 1. pp. 1–12. doi:10.1007/s40304-018-0127-z.
6. Згода Ю.Н. Возможности глубокого обучения применительно к задаче компьютерного моделирования тонкостенных оболочечных конструкций // IV Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNt'2023): сб. докладов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. С. 68–71.
7. Згода Ю.Н. Свидетельство №2023612571. OptiShellX – программа для высокопроизводительного расчета тонкостенных оболочечных конструкций: программа для ЭВМ / Ю.Н. Згода ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».
8. Bezanson J., Edelman A., Karpinski S., Shah V.B. Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing. *SIAM Review*. 2017. vol. 59. no. 1. pp. 65–98. doi:10.1137/141000671.
9. Karpov V.V. Models of the shells having ribs, reinforcement plates and cut-outs // *International Journal of Solids and Structures*. 2018. vol. 146. pp. 117–135. doi:10.1016/j.ijsolstr.2018.03.024.

Секция 22

Компьютерные системы для поддержки организационных решений

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАЦИОНАЛЬНОГО И БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ ДОРОЖНОГО ПРОСТРАНСТВА РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Дядичев В.В.¹, Биленко Г.Р.¹, Стоянченко С.С.², Менюк С.Г.¹

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Вернадского, 4.

²Луганский государственный университет имени В.И. Даля,
291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А

Аннотация. В данной работе разработана информационно-аналитическая система управления на основе современных информационных технологий для обеспечения надлежащего транспортно-эксплуатационного состояния сети автомобильных дорог на территории Республики Крым, их развития, создания условий для непрерывного и безопасного движения транспорта, совершенствования и рационального развития дорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: база данных, дорожное пространство, сеть автомобильных дорог, информационная карта.

Введение

В современный момент службу автомобильных дорог Республики Крым нужно отнести к сложным социально-экономическим системам, целями которой является обеспечение надлежащего транспортно-эксплуатационного состояния сети автомобильных дорог общего пользования на территории Республики Крым, их развитие, создание условий для непрерывного и безопасного движения транспорта, совершенствование и рациональное развитие дорожной инфраструктуры.

За последние 20 лет интенсивность движения резко возросла. В настоящий момент только в Крыму зарегистрировано более 1000 000 единицы транспортных средств из них 200 000 грузовых. По дорогам Крыма вне зависимости от сезонности помимо крымских автомобилей постоянно перемещаются большегрузные автопоезда весом до 50–60 тонн с ненормативными нагрузками на ось, для которых автодороги просто не предназначены.

В летний, курортный сезон резко возрастает интенсивность автомобилей за счет автотуристов прибывающих на отдых со всех концов СНГ и Евросоюза. В курортный период резко возрастает интенсивность автобусного движения по направлению к объектам

туризма культурного значения, памятникам архитектуры, природного и исторического наследия полуострова.

Особенностью Крыма является то, что исторические, природные и культурные памятники находятся в основном в горной и предгорной местности, что вносит особенности для обеспечения безопасности при строительстве и содержании данных автодорог. Благоприятные климатические условия и наличие соответствующей инфраструктуры, исторических памятников архитектуры располагает к проведению в Крыму всевозможных саммитов, форумов, фестивалей и встреч на международном уровне.

Наличие развитой рекреационной структуры санаторно-курортного комплекса Крыма требует разветвленной сети автодорог с постоянной повышенной интенсивностью движения. Специфической особенностью автодорог, ведущих к объектам санаторно-курортного комплекса и достопримечательностям Крыма, является наличие значительного количества мест для стоянки автобусов и личного автотранспорта прибывающих туристов. В последнее десятилетие возросли популярность и интенсивность велосипедного туризма, что требует особого подхода к решению безопасности всех участников дорожного движения.

Проблемы согласования функционирования дорожных предприятий различных уровней и согласования дорожной системы в целом с динамикой экономического и социального состояния региона требует применения современных информационных технологий, которые бы дали возможность на уровне Главного управления службы автомобильных дорог Республики Крым эффективно вести контроль, управление и прогнозирование развития этой важной для эволюции общества сферы деятельности.

Цель данного научного исследования заключается в разработке информационно-аналитической системы управления на основе современных информационных технологий для обеспечения надлежащего транспортно-эксплуатационного состояния сети автомобильных дорог на территории Республики Крым, их развития, создания условий для непрерывного и безопасного движения транспорта, усовершенствования и рационального развития дорожной инфраструктуры.

Материал и методы исследований

Одной из общих проблем развития дорожной отрасли является обеспечение ее необходимой технической, технологической и статистической базой. Эффективным способом решения этой

проблемы является создание территориально-распределенных автоматизированных информационных систем, специально ориентированных на решение этих задач [1-4]. Учитывая это, основные стратегические направления совершенствования региональной информационной политики дорожной отрасли и обеспечения информационной безопасности Республики Крым возможны через создание новой:

- компьютерной сети дорожных предприятий федерального и муниципального уровня;

- базы данных условий движения и доступа на них транспортных средств, транспортно-эксплуатационного качества и потребительских свойств автомобильных дорог;

- базы данных государственных стандартов автомобильных дорог;

- базы данных кадрового потенциала, технологического и технического оборудования региона;

- автоматизированной системы прогнозирования качества дорожного покрытия и технического состояния автомобильных дорог в Республике Крым;

- системы информационных технологий, которая функционирует на основе: использования современных средств информационных технологий, информационных телекоммуникаций и баз данных для информационной поддержки дорожного процесса, обеспечения возможности удаленного доступа дорожных предприятий, организаций и участников дорожного движения к транспортно-эксплуатационным характеристикам и потребительским свойствам автомобильных дорог.

Для решения этих вопросов необходимо определить основные принципы управления взаимодействием дорожной, экономической и социальной сфер региона. Провести анализ динамики интенсивности дорожного движения региона. Провести расчет потребности региона в квалифицированных кадрах рабочих и специалистов. Предложенный комплекс работ позволит существенно повысить системное взаимодействие дорожной отрасли, сфер производства и оказания услуг населению, обеспечить разработку обоснованных планов развития сети дорожных предприятий [5-6].

Внедрение системы позволит повысить степень организованности процессов управления дорожными предприятиями, сократить время реакции на управляющие действия руководящих органов, уменьшить количество фактических ошибок в исходных документах. Благодаря иерархической структуре система легко должна масштабироваться как

в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Аналитическая информация, генерируемая системой, должна соответствовать требованиям руководящих органов.

Результаты

В результате проведения исследований по разработке корпоративной информационно-аналитической системы управления дорожной отраслью с комплексом программ была создана информационная система для анализа и управления всеми дорожными предприятиями Министерством транспорта Республики Крым с формированием внешней отчетности. В результате исследований были:

- разработаны новые принципы построения информационных систем в дорожном пространстве республики Крым;
- предложена уникальная концептуальная модель информационной системы для обеспечения рационального развития дорожной отрасли Республики Крым;
- проведена апробация фреймворков построения корпоративных информационных систем (рисунок 1);

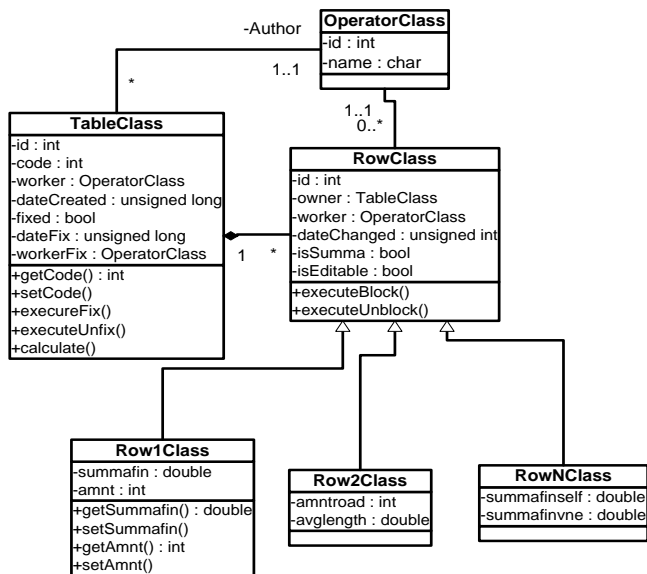


Рисунок 1. Диаграмма класса программного комплекса информационно-аналитической системы.

– разработано уникальное программное обеспечение распределенной информационной системы с созданием информационной карты дорожного пространства Республики Крым (рисунок 2);



Рис.2. Общий вид ГИС.

– получено свидетельство о государственной регистрации программы для управления и информационного обеспечения производственного процесса дорожного пространства Республики Крым и свидетельство о государственной регистрации базы данных дорожного пространства Республики Крым.

Выводы

Исходя из вышесказанного, проблемой, которая была решена, является анализ стратегического развития дорожной отрасли Республики Крым, организационных возможностей и параметров системы управления для реализации широкого спектра дорожных проектов на основе внедрения современных информационных технологий. Созданы условия для обеспечения безопасного развития дорожного пространства Республики Крым на основе разработки и исследования информационных сервисов для дорожной отрасли региона, кадровой, технологической, технической, статистической и картографической базы, путем взаимодействия и синхронизации деятельности всех структур дорожной отрасли Республики Крым.

Список литературы

1. Машнин Т.С. Bootstrap: Быстрое создание современных сайтов. – М.: Издательские решения, 2016. — 145 с.

2. Морето С. Bootstrap в примерах. / Пер. с англ. Рагимов Р. Н. / Науч. ред. Киселев А. Н. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 314 с.: ил.
3. Перепелица Ф.А. Эффективная разработка веб-сайтов Bootstrap. – СПб: Университет ИТМО, 2015.– 71 с.
4. Bootstrap. Документация на русском языке. [электронный ресурс]. URL: <https://bootstrap-4.ru> (дата обращения: 17.01.2022).
5. Build fast, responsive sites with Bootstrap. [электронный ресурс]. URL: <https://getbootstrap.com> (дата обращения: 17.01.2022).
6. Kyrnin J. Bootstrap in 24 Hours.– SAMS, IndianapolisIndiana, 2018.– 415 p.

Секция 23

Разработка математического и программного обеспечения для моделирования нелинейных, нестационарных и неоднородных процессов

УДК 517.95

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СВОЙСТВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Петухова В.В.¹, Огородников И.Н.²

Уральский федеральный университет, кафедра экспериментальной физики

Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

¹студентка магистратуры, ²д. ф.-м.н. профессор

E-mail: ¹petukhova.viktoria@bk.ru, ²i.n.ogorodnikov@urfu.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрена технология литья в песчаную форму, изготовленную методом 3D-печати. Компьютерное моделирование технологии литья проводилось с помощью пакета программ LVMFlow, где решалась прямая задача теплопроводности на расчетной сетке методом контрольных объемов. Свойства неметаллического материала песчаной формы являются коэффициентами нелинейного уравнения теплопроводности. Эти свойства неизвестны и нестабильны, так как влажность формовочного материала быстро меняется после изготовления формы в зависимости от ряда неизученных параметров. Свойства материала песчаной формы уточнялись путем решения обратной задачи теплопроводности. Для решения обратной задачи был выбран метод Левенберга-Марквардта. Разработан алгоритм численного решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности, который реализован в программной среде SciLab.

Ключевые слова: обратная задача, уравнение теплопроводности, технологические процессы, литейные формы, аддитивные технологии.

Abstract. In this paper, the technology of casting into a sand mold made by 3D printing is considered. The casting technology was simulated using the LVMFlow software package, where the direct heat conduction problem was solved using the controlled volume method. The material properties of the sand mold are the coefficients of the non-linear heat equation. These properties are unknown and unstable, since the moisture content of the material changes rapidly after mold preparation, depending on a number of unexplored parameters. The properties of the sand mold material were refined by solving the inverse heat conduction problem. To solve the inverse problem, the Levenberg-Marquardt method was chosen. An algorithm for solving the inverse problem of heat conduction by the Levenberg-Marquardt method has been developed. The developed algorithm was implemented in the SciLab software environment.

Keywords: inverse problem, heat equation, technological processes, casting molds, additive technologies.

Введение

Компьютерное моделирование технологических процессов [1] является приоритетным направлением развития инженерного программного обеспечения в рамках импортозамещения критически важных сегментов в производстве, прежде всего в машиностроении. Математической основой для компьютерной симуляции технологических процессов, как правило, являются дифференциальные уравнения в частных производных. В случае тепловых воздействий, например, в технологиях литья или сварки, при моделировании решается уравнение теплопроводности, коэффициентами которого являются теплофизические свойства материалов [2]. В нелинейном уравнении теплопроводности коэффициенты представлены функцией температуры и становятся источником недоуверенного прогнозирования температурных полей, когда материал нестабилен по составу и структуре [3].

Компьютерное моделирование литейных технологий направлено на анализ дефектов [4] и напряженных состояний [5], которые могут повлиять на итоговое качество деталей [6]. При компьютерном моделировании технологий литья входными данными являются свойства литейных сплавов и формовочных материалов, из которых изготавливается оснастка. К формовочным материалам относятся песчаные смеси, составляемые из песка и связующих материалов. Специфика приготовления песчаных смесей в литейном производстве не всегда позволяет достоверно получить необходимые данные о свойствах материалов в прямых измерениях.

Коэффициенты уравнения теплопроводности для конкретных технологических процессов могут быть уточнены решением обратной задачи теплопроводности [7]. Одним из эффективных методов решения обратных задач является метод Левенберга-Марквардта [8], который применяется в технологиях глубокого обучения сверточных нейронных сетей.

Целью данной работы являлась разработка алгоритма для уточнения коэффициентов нелинейного уравнения теплопроводности с применением метода Левенберга-Марквардта.

Решение прямой задачи теплопроводности

В данной работе рассмотрен технологический процесс литья алюминиевого сплава АК7ч в песчаную форму, изготовленную способом 3D-печати. Компьютерное моделирование технологии литья выполнено в программном комплексе LVMFlow (разработчик – НПО МКМ, г. Ижевск), где на расчетной сетке решается прямая задача

теплопроводности методом контрольных объемов. База данных LVMFlow не содержит свойства всех используемых на предприятиях материалов. В частности, в списке отсутствуют новые материалы, в том числе неметаллические формовочные материалы, которые применяются для 3D-печати литейных форм. Неизвестными и нестабильными являются свойства песчаных смесей, в которых содержание влаги и химический состав связующих веществ быстро меняется после приготовления в зависимости от ряда неизученных параметров.

С целью разработки и исследования алгоритма решения обратной задачи теплопроводности сформирована вычислительная модель технологического процесса в среде LVMFlow. В вычислительной модели анализируется температурное поле при кристаллизации цилиндрического образца, в центре которого расположен сенсор температуры (рисунок 1). В точке сенсора записывается температурная кривая с начального момента времени после заполнения литейной формы расплавом.

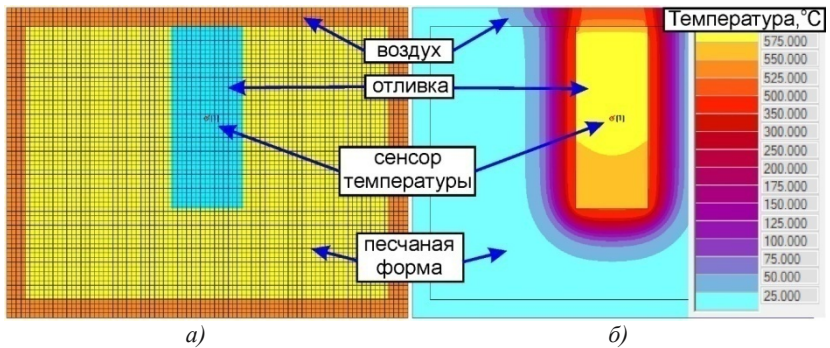


Рисунок 1. Расчетная сетка (а) и расчетное распределение температуры (б) в отливке и песчаной форме с цилиндрической геометрией при кристаллизации сплава АК7ч в момент времени 100 с.

На вычислительной модели исследовано влияние входных данных на смещение температурной кривой. Оказалось, что теплофизические свойства песчаной смеси значительно влияют на сдвиг расчетной температурной кривой.

Решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности

Свойства песчаной смеси можно уточнить решением коэффициентной обратной задачи теплопроводности. Для решения обратной задачи выбран метод Левенберга-Марквардта, поскольку метод не требует введения данных о производных по координате, и алгоритм решения не привязан к пространственной геометрии отливки и технологической оснастки.

Разработан алгоритм численного решения обратной задачи теплопроводности методом Левенберга-Марквардта. Алгоритм совмещает расчетную температурную кривую с экспериментальной, изменяя вектор теплофизических свойств песчаной смеси. Таблично заданные свойства являются входными данными, уточняемые значения свойств объединяются в общий вектор. Разработанный алгоритм имеет ряд особенностей, которые обеспечивают сходимость решения и обратимость матрицы Якоби. В частности, алгоритм исключает из вектора свойств сингулярные точки.

Разработанный алгоритм реализован в программной среде SciLab, где имеется достаточный инструментарий для матричных вычислений. Эффективность работы алгоритма проверена на тестовой задаче. Для проверки сходимости выполнен условный эксперимент и получена квази-экспериментальная температурная кривая в точке сенсора (рисунок 2). Условный эксперимент заключается в компьютерном моделировании технологии литья в программе LVMFlow, причем для литейной формы выбраны свойства кварцевого песка из базы данных LVMFlow. Кварцевый песок является основным компонентом песчаной смеси и вносит существенный вклад в суммарную теплопроводность формовочного материала.

Далее в тестовой задаче получена исходная расчетная кривая, которая записана при компьютерном моделировании в точке сенсора температуры для редуцированного вектора свойств формовочного материала. В исходной компьютерной модели удельная теплоемкость и теплопроводность заданы одним произвольным значением на всем температурном интервале. Исходная температурная кривая значительно отличается от квази-экспериментальной, как показано на рисунке 2.

Выполнены 2 итерации уточнения свойств, в которых алгоритм правильно смещал расчетную температурную кривую к квази-экспериментальной. Исходный коэффициент качества расчетной кривой равен 19 %, после второй итерации снизился до 3.8 %. То есть результаты тестовой задачи подтверждают, что разработанный

алгоритм обеспечивает численное решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности и позволяет восстановить неизвестные свойства формовочного материала.

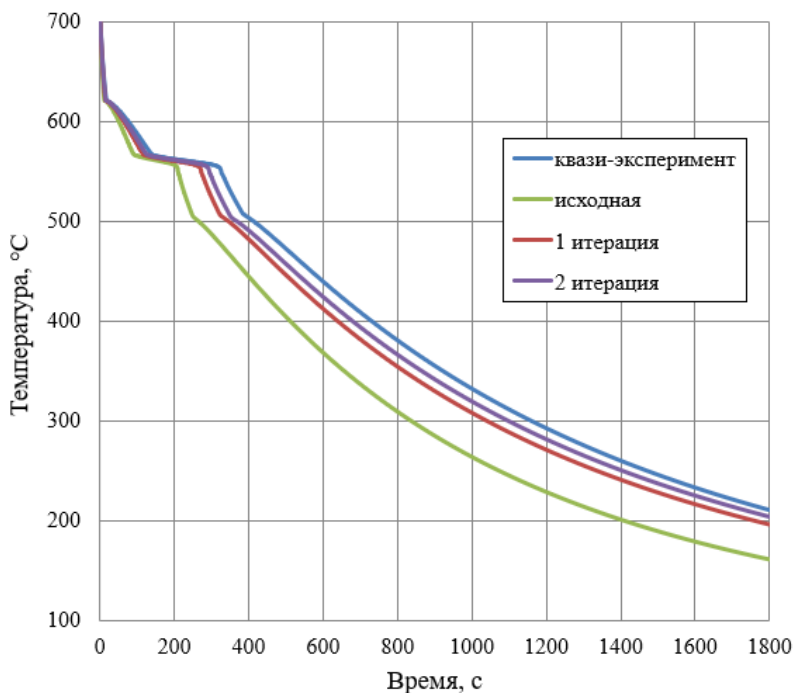


Рисунок 2. Смещение температурной кривой в тестовой задаче по восстановлению теплофизических свойств формовочного материала.

Заключение

Разработан и проверен в вычислительных экспериментах алгоритм для уточнения теплопроводности и удельной теплоемкости материалов, из которых изготавливается литейная оснастка, в том числе способом 3D-печати. Алгоритм основан на решении некорректной обратной задачи с применением оптимизационного метода Левенберга-Марквардта. Разработанный алгоритм не обращается к пространственным координатам и поэтому легко адаптируется как к простым тестовым геометриям, так и к сложным геометриям крупногабаритных отливок ответственного назначения.

Результатом применения алгоритма является уточненная по входным данным вычислительная модель технологического процесса.

Список литературы

1. Мартыненко С. В., Огородникова О. М. Компьютерное моделирование технологии изготовления отливки Рама Боковая с использованием программы LVMFLOW // Литейное производство. – 2022. – № 7. – С. 23-28.
2. Петухова В. В., Огородников А. И. Решение обратной задачи теплопроводности в компьютерном моделировании технологических процессов // Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2022: Тезисы докладов VIII Международной молодежной научной конференции (Екатеринбург, 16-20 мая 2022 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2022, С.942-943.
3. Огородникова О. М. Напряженно-деформированное состояние металла в эффективном интервале кристаллизации // Литейное производство. – 2012. – № 9. – С. 21-24.
4. Огородникова О. М. Формирование высокотемпературных дефектов в двухфазных металлических структурах // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54, № 1–3. – С. 144.
5. Огородникова О. М., Мартыненко С. В., Проничев И. М. Компьютерное моделирование литой детали «Рама боковая» с учетом усадочной пористости // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 2 (310). – С. 36-40.
6. Огородникова О. М. Консолидированный компьютерный анализ отливки, технологии литья и литейного сплава // Литейное производство. – 2015. – № 2. – С. 32-34.
7. Огородников И. Н. Введение в обратные задачи физической диагностики / Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2017. 128 с.
8. Огородникова О. М. Применение алгоритма Левенберга–Марквардта в компьютерном моделировании литейных дефектов // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 63–68.