

ISSN (Print) 2306-3173

ISSN (Online) 2413-1601

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

AUTOMATION
OF TECHNOLOGIES AND
PRODUCTION

№ 1(11), 2016



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (11) март 2016 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и качеством продукции, практическому применению современных методов управления и обучения сотрудников предприятий. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований. Приоритетным направлением журнала является освещение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы автоматизации, проектных институтов и вузов, специализирующихся в области информационных технологий.

Основные направления журнала: автоматизированные системы управления технологическими процессами; системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции; математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов; технические средства для автоматизации технологических процессов и производств; автоматизированные технологии в образовании; информационные системы.

Редакция и редакционный совет

Редакционный совет

Председатель редакционного совета:

Лисиенко Владимир Георгиевич - Вице-президент Академии инженерных наук, президент регионального Уральского отделения Академии инженерных наук, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Заместитель председателя редакционного совета:

Парсункин Борис Николаевич - доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Члены редакционного совета:

Сарваров Анвар Сабулханович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)
Радионов Андрей Александрович - доктор технических наук, профессор (ЮУрГУ)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)
Вдовин Константин Николаевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)
Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ)
Дмитриенко Валерий Дмитриевич - доктор технических наук, профессор (НТУ «ХПИ»)
Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (ЗАО КонСом)

Редакция

Главный редактор:

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук

Заместитель главного редактора,

ответственный редактор:

Рябчиков Михаил Юрьевич – кандидат технических наук

Технический редактор:

Рябчикова Елена Сергеевна – кандидат технических наук

Контакты

Главный редактор: Парсункин Борис Николаевич
Тел.: (3519) 29-85-58

Редакционная коллегия: Андреев Сергей Михайлович
Тел.: (3519) 29-84-32
E-mail: atp@magtu.ru

Рябчиков Михаил Юрьевич
Тел.: +79028910112

E-mail: mg_mgn@mail.ru

Дизайн: Рябчикова Елена Сергеевна

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Выходит в свет 04.2016. Тираж 100 экз. Цена свободная.

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов

А.Ю. Заковоротный
Разработка дискретной многослойной ассоциативной памяти с управляющими нейронами..... 4

О.М. Пигнастый, Р.О. Корсун
Построение кинетического уравнения производственного процесса..... 10

В.В. Веренев, А.Ю. Путники, Н.И. Подобедов
Изучение переходных процессов при непрерывной прокатке путем опытно-промышленных измерений и математического моделирования..... 17

Системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции

Н.П. Деменков, У Сяоган, Ху Чень
Многоступенчатый метод зарядки литий-ионного аккумулятора..... 25

А.Т. Хабибулина
Применение функции Ляпунова в квадратичной форме для анализа статической устойчивости Сырдарьинской ТЭС..... 31

А.Ю. Сологубов, С.М. Андреев
Исследование асинхронной последовательной передачи данных при отклонении частот передатчика и приемника..... 34

Т.А. Алиев, Н.Э. Рзаева
Робастные технологии определения оценок корреляционных функций случайных зашумленных сигналов..... 41

Информационные системы в автоматизированном производстве

И.В. Некрасов
Сложность и критерии принадлежности вычислительных задач к области «Big Data»..... 50

С.С. Нежинских
Применение технологии самоорганизующихся нейронных сетей в задаче медицинской диагностики..... 56

Информационные системы в автоматизированном производстве

Е.А. Рафальская
Информационная технология многосценарного обучения как средство эффективного управления образовательным процессом..... 63

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев
Способ энергосберегающего нечёткого управления процессом горения в тепловых установках..... 66

К.В. Лицин, В.В. Орехов, Т.М. Сарманов
Сравнительный анализ системы управления векторно-импульсного пуска при наличии промежуточных трансформаторов и без них..... 74

А.В. Жаданос, И.В. Дервянко, О.Н. Кукушкин
Исследование теплоэнергетических процессов внепечной обработки стали для разработки автоматизированной информационной системы.... 77

В.Ю. Шелухин, М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова, Е. Гибаева
Управление очисткой газов агломерационных машин с использованием модели процесса..... 83

Проектно-конструкторская деятельность студентов в области автоматизированных систем

А.Г. Рыбаков, Е.П. Кильдюшкина, Н.Ю. Шкуропатский, Ю.Ф. Муратова, Е.С. Алейникова
Разработка микропроцессорной системы автоматического управления роботехническим комплексом для игры в боулинг..... 88

И.М. Ячиков, Е.О. Кряжев
Программно-аппаратный комплекс для измерения тепловых параметров системы охлаждения лабораторного высокочастотного индуктора..... 94

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

Количество авторов – не более 5.

Размер страницы: – А4. Все поля – 20 мм.

Стили: УДК: TimesNewRoman, обычный, размер 12 пт, выравнивание по левому краю. **Заголовок статьи:** TimesNewRoman, полужирный, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Фамилия, инициалы авторов:** TimesNewRoman, полужирный курсив, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Сведения об организации и электронный адрес:** TimesNewRoman, курсив, размер 11 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. Наличие эл. адреса хотя бы одного из авторов является обязательным. **Основной текст:** TimesNewRoman, обычный, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, отступ первой строки абзаца 1,25 см, выравнивание по ширине. **Стиль для подзаголовков** (Введение, Актуальность работы, Основные проблемы и решения, Выводы, Заключение и т. д.): TimesNewRoman, полужирный курсив, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по левому краю. Наличие подзаголовков не обязательно.

Рисунки: Размер рисунков не должен превышать размеров одной страницы; не допускается выполнение рисунков средствами MS Word; рекомендуется использование векторных форматов; не допускается обтекание рисунков текстом с группировкой подписи и рисунка в одно полотно (надпись); файлы рисунков необходимо также приложить отдельно; на все рисунки по тексту должны быть выполнены ссылки по шаблону – рис. номер; подпись рисунка строится по шаблону: Рис. Номер. Наименование рисунка.

Таблицы: Перед таблицей должна быть выполнена ссылка по формату – табл. номер. Все таблицы нумеруются и, при необходимости, именуется: шрифт TimesNewRoman, размер 11 пт, курсив. Выравнивание таблиц – по центру.

Список литературы: Список оформляется согласно ГОСТ 7.1–2003. Ссылки на использованные источники даются по тексту и обозначаются цифрами в квадратных скобках (например: [1]).

Количество ссылок на источники: не рекомендуется менее 4-х.

Самоцитирование: не рекомендуется более 25% от общего числа ссылок.

Оформление формул: Формулы выполняются в редакторе MS Equation 3.0 и выравниваются по центру. Нумерация формул необходима, если по тексту есть ссылки на эти формулы. Номера формул (в круглых скобках) выравниваются по правому краю.

Размерности величин выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

Пример оформления

Предоставление материалов

УДК 669.1:622

пустая строка

Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости
М.Ю. Рябчиков¹, В.В. Гребенникова², Е.С. Рябчикова³
^{1,2,3} ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Control of iron ore sinter properties with reducibility index model
M.Y. Ryabchikov¹, V.V. Grebennikova², E.S. Ryabchikova³
^{1,2,3} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
¹mail@mail.ru

пустая строка

Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом.

Ключевые слова: *ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова.*

Abstract, italic. Abstract, italic.

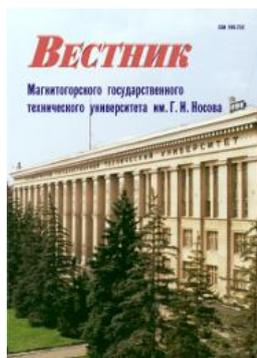
Keywords: *keywords; keywords; keywords; keywords; keywords.*

пустая строка

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: atr@magtu.ru текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования. Контактный тел.: +79028910112 (Рябчиков Михаил Юрьевич, личный e-mail: mr_mgn@mail.ru).

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор. Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции. При перепечатке ссылка на «Автоматизированные технологии и производства» обязательна.

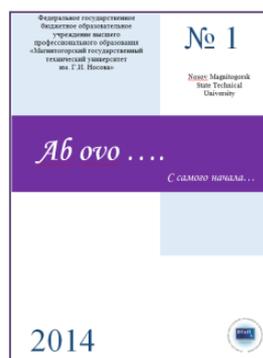
Другие рекомендуемые периодические издания



Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК: 004.89:519.71

РАЗРАБОТКА ДИСКРЕТНОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ С УПРАВЛЯЮЩИМИ НЕЙРОНАМИ

А.Ю. Заковоротный

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
г. Харьков, Украина

DEVELOPING DISCRETE MULTILAYER ASSOCIATIVE MEMORY WITH CONTROL NEURONS

A.Y. Zakovorotnyi

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine

arcade@i.ua

Аннотация. Впервые на основе двунаправленной ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы функционирования двунаправленной многослойной дискретной нейросетевой ассоциативной памяти с управляющими нейронами, которая способна восстанавливать по входной информации, подаваемой на любой из двух ее входных слоев нейронов, цепочки ассоциаций и корректировать результаты с помощью управляющих нейронов. Это становится возможным благодаря тому, что архитектура классической двунаправленной ассоциативной памяти перестраивается путем замены одного из сенсорных слоев нейронов на N слоев, которые последовательно связаны друг с другом парами двунаправленных взвешенных связей, и добавлением N управляющих слоев нейронов.

Ключевые слова: двунаправленная ассоциативная память, многослойная дискретная нейросетевая ассоциативная память с управляющими нейронами, цепочки ассоциаций.

Abstract. For the first time on the basis of bidirectional associative memory proposed architecture and algorithms of discrete multilayer bidirectional associative memory neural networks with control neurons, which is capable of reducing the input of the information supplied on any of its two input layers of neurons, the chain of associations and adjust the results with the control neurons. This is possible thanks to the fact that the architecture of classical bidirectional associative memory is reconstructed by replacing one of the layers of sensory neurons at the N layers are sequentially linked to one another in pairs suspended bidirectional communications and control by N layers of neurons.

Keywords: bidirectional associative memory, discrete multilayer neural associative memory with control neurons, the chain of associations.

Постановка проблемы и анализ литературы

Для решения задач нахождения ассоциативных образов в настоящее время существует множество разнообразных методов и алгоритмов [1 – 6]. В связи с этим в теории искусственного интеллекта предпринимаются попытки создания универсальных подходов, позволяющих решать широкие классы задач поиска и запоминания ассоциативной информации. Один из таких подходов связан с использованием искусственных нейронных сетей. Их эффективное применение для решения различных задач во многом основывается на том, что традиционные трудности решения разнообразных задач облегчены применением универсальных алгоритмов обучения нейронных сетей на обучающих выборках [7 – 9].

Обычная нейронная сеть, например, перцептрон [5, 7] реализует отображение $y^k = f(x^k)$, где $y^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k)$ – выходной вектор нейронной сети для k -го входного вектора сети $x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$, $k = \overline{1, p}$; p – число пар векторов (x^k, y^k) , $x^k \in R^n$, $y^k \in R^m$, и может рассматриваться как ассоциативная память, которая входному вектору x^k вставляет в соответствие выходной вектор y^k . Однако нейронные сети типа перцептрона, Хебба и другие [8, 9] не могут вектору y^k поставить в соответствие ассоциативный вектор x^k .

Этот недостаток преодолён в нейронной сети двунаправленная ассоциативная память (ДАП) [10 – 14]. Двухнаправленная ассоциативная память состоит из двух слоев нейронов, связанных парами двухнаправленных взвешенных связей. Изображения (или n -мерные либо m -мерные входные вектора) могут подаваться соответственно на входы X - или Y -элементов. При этом не предполагается подача изображений на оба слоя элементов одновременно. Если весовая матрица для сигналов, посылаемых из X -слоя элементов в Y -слой, есть

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1k} & \dots & w_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{j1} & \dots & w_{jk} & \dots & w_{jm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & \dots & w_{nk} & \dots & w_{nm} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

то весовая матрица для сигналов от Y -элементов в X -слой имеет вид $W_1 = W^T$.

Сеть способна запоминать пары ассоциированных друг с другом образов $S^p = (s_1^p, \dots, s_n^p)$, $T^p = (t_1^p, \dots, t_m^p)$ из некоторых заданных множеств образов $S = \{S^1, \dots, S^p, \dots, S^L\}$, $T = \{T^1, \dots, T^p, \dots, T^L\}$, где L – число ассоциированных пар.

Процесс обучения ДАП с биполярными нейронами состоит в предварительной настройке весов связей между X - и Y -нейронами, задаваемых элементами матрицы (1) в соответствии с формулой:

$$w_{ij} = \sum_{p=1}^L S_i^p T_j^p, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Динамика ДАП в режиме определения ассоциативных изображений является итерационной. Процесс изменения выходных сигналов нейронов каждого слоя ДАП осуществляется синхронно, при этом сигналы посылаются из слоя в слой последовательно, а не одновременно в обоих направлениях. При биполярных входных векторах функции активации $f_p(U_{\text{вх.}p})$ для элементов X - и Y -слоя задаются выражением:

$$U_{\text{вых.}p}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) > \theta_p, \\ U_{\text{вых.}p}(t), & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) = \theta_p, \\ -1, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) < \theta_p, \end{cases} \quad (3)$$

где θ_p – порог p -го элемента ДАП, $p = 1, \dots, n, n+1, \dots, n+m$.

Из выражения (3) следует, что если входной сигнал элемента точно равен пороговому значению, то функция активации оставляет на выходе нейрона предшествующее значение выходного сигнала. В связи с этим начальная активация нейронов обычно производится нулевыми входными сигналами. Функционирование сети может начинаться с задания изображения (входных сигналов) для любого из слоев ДАП. Алгоритм работы двоичной сети при первом предъявлении изображения S^k слою X -элементов предполагает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Иницируются веса связей, определяемые с помощью соотношения (2), для множества из L пар ассоциированных друг с другом двоичных изображений (S^p, T^p) , $p = \overline{1, L}$. Задается начальное время: $t = 0$.

Иницируются нулевыми входными сигналами все нейроны ДАП:

$$U_{\text{вх.}Xi}(0) = 0, U_{\text{вых.}Xi}(0) = f_i(U_{\text{вх.}Xi}) = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}Yj}(0) = 0, U_{\text{вых.}Yj}(0) = f_j(U_{\text{вх.}Yj}) = 0, \quad j = \overline{1, m}.$$

Шаг 2. Для заданного изображения $S^k = (s_1^k, \dots, s_n^k)$ выполняются шаги 3 – 7.

Шаг 3. Задаются входные сигналы нейронов X -слоя:

$$U_{\text{вх.}Xi}(0) = s_i^k, \quad i = \overline{1, n}.$$

Задается время $t = t + 1$ и вычисляются выходные сигналы X -элементов:

$$U_{\text{вых.}Xi}(t+1) = f_i(U_{\text{вх.}Xi}(t)), \quad i = \overline{1, n}.$$

Шаг 4. До тех пор, пока не установятся выходные сигналы всех X - и Y -нейронов, выполняются шаги 5 – 7 алгоритма.

Шаг 5. Адаптируется активность элементов Y -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы Y -элементов:

$$U_{\text{вх.}Yj}(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} U_{\text{вых.}Xi}(t+1), \quad j = \overline{1, m};$$

$$U_{\text{вых.}Yj}(t+1) = f_j(U_{\text{вх.}Yj}(t+1)), \quad j = \overline{1, m}.$$

Выходные сигналы Y -нейронов посылаются на входы элементов X -слоя.

Шаг 6. Адаптируется активность элементов X -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы X -элементов:

$$U_{\text{вх.}Xi}(t+2) = \sum_{j=1}^m w_{ji} U_{\text{вых.}Yj}(t+2), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вых.}Xi}(t+2) = f_i(U_{\text{вх.}Xi}(t+2)), \quad i = \overline{1, n}.$$

Выходные сигналы X -нейронов посылаются на входы элементов Y -слоя. Вычисляются входные $U_{\text{вх.}Yj}(t+3)$, $j = \overline{1, m}$ и выходные сигналы $U_{\text{вых.}Yj}(t+4)$ элементов Y -слоя.

Шаг 7. Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы X -нейронов $U_{\text{вых.}Xi}(t+3)$ и $U_{\text{вых.}Xi}(t+1)$, $i = \overline{1, n}$, а также Y -нейронов $U_{\text{вых.}Yj}(t+2)$ и $U_{\text{вых.}Yj}(t+4)$, $j = \overline{1, m}$, полученные на текущей и предшествующих итерациях. Если не выполняется хотя бы одно из $(n+m)$ равенств

$$U_{\text{вых.}Xi}(t+3) = U_{\text{вых.}Xi}(t+1), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вых.}Yj}(t+2) = U_{\text{вых.}Yj}(t+4), \quad j = \overline{1, m},$$

то осуществляется переход к шагу 5 алгоритма, иначе – переход к шагу 8.

Шаг 8. Останов.

ДАП может запоминать пары ассоциативных изображений, а при подаче представителя пары на соответствующий вход – выдавать ассоциативное изображение. Однако ДАП не может запоминать цепочки ассоциаций и корректировать результаты с помощью управляющих нейронов.

Цель статьи

Разработка нейросетевой двунаправленной многослойной ассоциативной памяти, которая, с одной стороны, обладает возможностью запоминания и восстановления цепочек ассоциативных изображений, а с другой стороны, возможность изменять цепочки ассоциаций с помощью управляющих нейронов.

Разработка нейросетевой многослойной ассоциативной памяти

Задача решается благодаря тому, что архитектура ДАП перестраивается путем замены одного из сенсорных слоев нейронов например, слоя Y -элементов, на N слоев (рис. 1), которые последовательно связаны друг с другом парами двунаправленных взвешенных связей и добавлением N управляющих слоев нейронов R^i ($i = \overline{1, N}$). При этом каждая пара соседних слоев нейронов фактически является двунаправленной ассоциативной памятью. В результате этого возникает возможность любому вектору $Z_{\text{вх.}}^i = (Z_{1\text{вх.}}^i, Z_{2\text{вх.}}^i, \dots, Z_{q_i\text{вх.}}^i)$ некоторого слоя сети Z^i ($i = \overline{1, N}$) поставить в соответствие ассоциативный вектор $Z_{\text{вых.}}^{i+1}$ на выходе Z^{i+1} -слоя, а вектор $Z_{\text{вх.}}^i$ рассматривать как ассоциацию входному вектору предшествующего слоя нейронной сети. При этом, с помощью слоев управляющих нейронов R^i ($i = \overline{1, N}$), можно осуществлять коррекцию векторов $Z_{\text{вх.}}^i$ ($i = \overline{1, N}$), составляющих цепочку ассоциативных изображений.

Все это дает возможность говорить о том, что любой вектор на входе X -слоя нейронной сети порождает цепочку их N двунаправленных ассоциаций, где каждый вектор Z^i ($i = \overline{1, N-1}$) входит в две ассоциации, которые можно корректировать с помощью соответствующих управляющих нейронов [15].

Память состоит из сенсорного слоя нейронов X_i ($i = \overline{1, n}$) и N слоев Z -элементов $Z^1(Z_1^1, \dots, Z_{g_1}^1), \dots, Z^N(Z_1^N, \dots, Z_{g_N}^N)$ с управляющими слоями нейронов R^i ($i = \overline{1, N}$). Каждый нейрон входного слоя X_i ($i = \overline{1, n}$) связан с каждым нейроном Z^1 -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{iq_1}^{11}, W_{q_1i}^{12}$ ($i = \overline{1, n}; q_1 = \overline{1, g_1}$), каждый нейрон Z^1 -слоя связан с каждым нейроном Z^2 -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{q_1q_2}^{21}, W_{q_2q_1}^{22}$ ($q_1 = \overline{1, g_1}; q_2 = \overline{1, g_2}$) и с каждым нейроном R^1 ($h_1 = \overline{1, p_1}$) из управляющего R^1 -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{h_1q_1}^{13}, W_{q_1h_1}^{14}$ ($h_1 = \overline{1, p_1}; q_1 = \overline{1, g_1}$). По аналогии каждый Z^k -слой сети ($k = \overline{3, N}$) связан с предыдущим слоем Z^{k-1} парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{q_{k-1}q_k}^{k1}, W_{q_kq_{k-1}}^{k2}$ ($q_{k-1} = \overline{1, g_{k-1}}; q_k = \overline{1, g_k}$) и с нейронами R^{k-1} ($h_{k-1} = \overline{1, p_{k-1}}$) из управляющего R^{k-1} -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами:

$$W_{h_{k-1}q_{k-1}}^{(k-1)3}, W_{q_{k-1}h_{k-1}}^{(k-1)4} (h_{k-1} = \overline{1, p_{k-1}}; q_{k-1} = \overline{1, g_{k-1}}).$$

Каждый Z^k -слой ($k = \overline{2, N-1}$) связан со следующим $Z^{(k+1)}$ -слоем парами двунаправленных взвешенных связей $W_{q_kq_{k+1}}^{(k+1)1}, W_{q_{k+1}q_k}^{(k+1)2}$ ($q_k = \overline{1, g_k}; q_{k+1} = \overline{1, g_{k+1}}$).

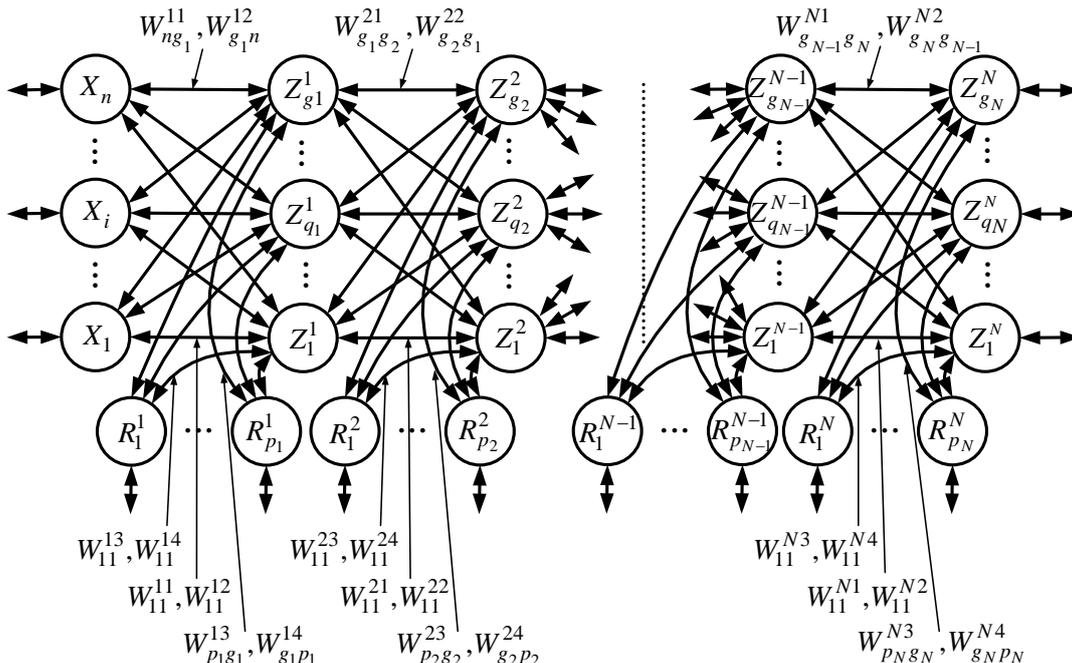


Рис. 1. Нейросетевая многослойная ассоциативная память

Каждый нейрон выходного слоя $Z_{q_N}^N$ ($q_N = \overline{1, g_N}$) связан с каждым нейроном $Z_{q_{N-1}}^{N-1}$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей $W_{q_{N-1}q_N}^{N1}$, $W_{q_Nq_{N-1}}^{N2}$ ($q_{N-1} = \overline{1, g_{N-1}}$; $q_N = \overline{1, g_N}$) и с нейронами $R_{h_N}^N$ ($h_N = \overline{1, p_N}$) из управляющего R^N -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{h_Nq_N}^{N3}$, $W_{q_Nh_N}^{N4}$ ($h_N = \overline{1, p_N}$; $q_N = \overline{1, g_N}$).

Разработанная сеть функционирует в соответствии с двумя алгоритмами: обучения и распознавания. Алгоритм обучения сводится к определению обучающего набора изображений и определения матриц весов связей между слоями нейронов: X_i , Z^1 , Z^2 , ..., Z^N , с помощью соотношений вида (1) и (2) [16, 17]. Поскольку любые два Z -слоя нейронов Z^1 и Z^2 , Z^2 и Z^3 , ..., Z^{N-1} и Z^N , имеют архитектуру двунаправленной ассоциативной памяти, то их функционирование аналогично классическому алгоритму функционирования ДАП. Последовательное применение классического алгоритма ДАП к слоям нейронов Z^1 и Z^2 , Z^2 и Z^3 , ..., Z^{N-1} и Z^N позволяет получать всю цепочку ассоциативных изображений $S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$, где S^V – входное изображение, S^{Vd} ($d = 1, 2, \dots, N$) – изображения на выходах нейронов, соответственно слоев X , Z^1 , Z^2 , ..., Z^N нейронов. Предложенная многослойная ассоциативная память является двунаправленной. Поэтому, если на входы Z^N нейронов подать изображение S^{VN} , то будет получена цепочка ассоциативных изображений $S^{V(N-1)}, S^{V(N-2)}, \dots, S^{V1}, S^V$. Процессы функционирования предложенной нейронной сети в этом случае аналогичны процессам функционирования сети при подаче изображения S^V на входы слоя X -нейронов. При этом добавление в структуру новой многослойной нейросетевой памяти N слоев управляющих нейронов дает возможность построения ассоциаций с учетом дополнительной информации. Это становится возможным благодаря тому, что управляющие нейроны связаны с соответствующими слоями нейронной сети и при появлении информации на входах слоев, могут её корректировать с учетом информации на входах управляющих нейронов.

В алгоритме функционирования многослойной двунаправленной ассоциативной памяти с управляющими нейронами в режиме определения цепочки ассоциаций приняты следующие обозначения:

n – число нейронов в сенсорном слое нейронов;

g_1, g_2, \dots, g_N – число элементов соответственно в слоях Z^1, Z^2, \dots, Z^N нейронной сети, $g_1 = g_2 = \dots = g_N$;

$S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$ ($V = \overline{1, L}$) – цепочка ассоциативных изображений;

$SR^{V1}, SR^{V2}, \dots, SR^{VN}$ ($V = \overline{1, L}$) – множества управляющих векторов;

SR^{Vk} – множество управляющих нейронов для k -

слоя Z -нейронов ($k = \overline{1, N}$);

L – число цепочек ассоциативных изображений, которые запоминаются;

V – номер цепочки ассоциативных изображений;

$t_0^1, t_1^1, t_2^1, \dots$ – последовательные моменты времени при получении ассоциативных изображений; $t_k^1 = t_0^1 + \Delta t$ или в общем виде $t_k^1 = t_{(k-1)}^1 + \Delta t$;

Δt – время, необходимое для получения выходного сигнала нейронов с помощью функции активации;

f_V – функция активации V -го элемента.

Алгоритм работы многослойной двунаправленной ассоциативной памяти при подаче изображения на первый сенсорный вход, предусматривает выполнение шагов, аналогичных шагам при функционировании ДАП:

Шаг 1. Иницируются веса связей $W_{iq_1}^{11}, W_{q_1i}^{12}$ ($i = \overline{1, n}$; $q_1 = \overline{1, g_1}$). Задается начальное время: $t = t_0^1$. Иницируются нулевыми входными сигналами все нейроны сети:

$$U_{\text{вх.}X_i}(0) = 0; U_{\text{вых.}X_i}(0) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}) = 0; i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}Z_{q_r}^r}(0) = 0; U_{\text{вых.}Z_{q_r}^r}(0) = f_{q_r}(U_{\text{вх.}Z_{q_r}^r}) = 0; q_r = \overline{1, g_r}; r = \overline{1, N};$$

$$U_{\text{вх.}R_{h_r}^r}(0) = 0; U_{\text{вых.}R_{h_r}^r}(0) = f_{h_r}(U_{\text{вх.}R_{h_r}^r}) = 0; h_r = \overline{1, p_r}; r = \overline{1, N}.$$

Шаг 2. Для изображения $S^V = (S_1^V, \dots, S_n^V)$ из произвольной цепочки обучающих изображений $S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$ ($V = \overline{1, L}$), выполняются шаги 3 – 7.

Шаг 3. Задаются входные сигналы нейронов X -слоя и управляющего R^1 -слоя сети:

$$U_{\text{вх.}X_i}(t_0^1) = S_i^V, i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_0^1) = SR_{h_1}^V, h_1 = \overline{1, p_1}.$$

В интервале времени $[t_0, t_1^1 = t_0^1 + \Delta t]$ вычисляются выходные сигналы нейронов X - и R^1 -слоя элементов:

$$U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}(t_0^1)), i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1) = f_{h_1}(U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_0^1)), h_1 = \overline{1, p_1}.$$

Шаг 4. Пока не установятся выходные сигналы всех X - и Z^1 -нейронов, выполняются шаги 5 – 7.

Шаг 5. Адаптируется активность элементов Z^1 -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы Z^1 -элементов:

$$U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_1^1) = \sum_{i=1}^n W_{iq_1}^{11} U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1) + \sum_{h_1=1}^{p_1} W_{h_1q_1}^{13} U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1),$$

$$i = \overline{1, n}; q_1 = \overline{1, g_1}; h_1 = \overline{1, p_1};$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1) = f_{q_1}(U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_1^1)); q_1 = \overline{1, g_1}.$$

Выходные сигналы Z^1 -нейронов посылаются на входы элементов X - и R^1 -слоев.

Шаг 6. Адаптируется активность элементов X - и R^1 -слоев. Вычисляются входные и выходные сигналы нейронов X - и R^1 -слоев:

$$U_{\text{вх.}X_i}(t_2^1) = \sum_{q_1=1}^{g_1} W_{q_1 i}^{12} U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1), \quad i = \overline{1, n}; \quad q_1 = \overline{1, g_1};$$

$$U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}(t_2^1)), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_2^1) = \sum_{q_1=1}^{g_1} W_{q_1 h_1}^{14} U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1), \quad h_1 = \overline{1, p_1};$$

$$q_1 = \overline{1, g_1};$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1) = f_i(U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_2^1)), \quad h_1 = \overline{1, p_1}.$$

Выходные сигналы нейронов X - и R^1 -слоев посылаются на входы элементов Z^1 -слоя:

$$U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_3^1) = \sum_{i=1}^n W_{i q_1}^{11} U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1) + \sum_{h_1=1}^{p_1} W_{h_1 q_1}^{13} U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1),$$

$$q_1 = \overline{1, g_1}; \quad i = \overline{1, n}; \quad h_1 = \overline{1, p_1};$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_4^1) = f_{q_1}(U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_3^1)); \quad q_1 = \overline{1, g_1}.$$

Шаг 7. Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы нейронов X -слоя $U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1)$ и $U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1)$, $i = \overline{1, n}$, выходные сигналы управляющих нейронов R^1 -слоя $U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1)$ и $U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1)$, $h_1 = \overline{1, p_1}$, а также выходные сигналы нейронов Z^1 -слоя $U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1)$ и $U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_4^1)$, $q_1 = \overline{1, g_1}$, которые получены на текущей и предыдущей итерациях. Если не выполнено хотя бы одно равенство

$$U_{\text{вых.}X_i}(t_3^1) = U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_3^1) = U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1), \quad h_1 = \overline{1, p_1};$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1) = U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_4^1), \quad q_1 = \overline{1, g_1},$$

то переход к шагу 5 алгоритма, иначе – на выходе Z^1 -слоя получено изображение S_1^{V1} , которое является входным изображением для Z^2 -слоя ассоциативной памяти и осуществляется переход к шагу 8.

Для получения последующих изображений выполняются шаги 8 – 15 алгоритма, когда на каждом из слоев Z -нейронов получается одно изображение из цепочки ассоциаций, где $k = \overline{1, N}$.

Шаг 8. Иницируются веса связей $W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1}$, $W_{q_{(k+1)} q_k}^{k2}$ ($q_k = \overline{1, g_k}$; $q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}$) и задается начальное время для определения изображения на выходе Z^k -слоя нейронов ($k > 1$): t_0^k .

Шаг 9. Для изображения $S_k^V = (S_{k1}^V, \dots, S_{kn}^V)$, полученного на слое Z^k -нейронов, выполняются шаги 10 – 14.

Шаг 10. В интервале времени $[t_0^k, t_1^{(1+k)}]$ вычисляются выходные сигналы нейронов Z^k - и R^k -слоя элементов:

$$U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}) = U_{\text{вх.}Z_{q_k}^k}(t_r^k); \quad q_k = \overline{1, g_k},$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}) = U_{\text{вх.}R_{h_k}^k}(t_r^k), \quad h_k = \overline{1, p_k}.$$

где t_r^k ($r \in \{4, 6, 8, \dots\}$) – момент времени получения выходного сигнала на слое Z^k -элементов на предыдущей итерации.

Шаг 11. Пока не установятся выходные сигналы всех Z^k - и $Z^{(k+1)}$ -нейронов, выполняются шаги 12 – 14.

Шаг 12. Адаптируется активность элементов $Z^{(k+1)}$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы $Z^{(k+1)}$ -элементов:

$$U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_1^{(1+k)}) = \sum_{q_k=1}^{g_k} W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1} U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}) + \sum_{h_k=1}^{p_k} W_{h_k q_{(k+1)}}^{k3} U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad h_k = \overline{1, p_k};$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}) = f_{q_{(k+1)}}(U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_1^{(1+k)})),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}; \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

Выходные сигналы $Z^{(k+1)}$ -нейронов посылаются на входы элементов Z^k - и $R^{(k+1)}$ -слоев.

Шаг 13. Адаптируется активность элементов Z^k - и $R^{(k+1)}$ -слоев. Вычисляются входные и выходные сигналы нейронов Z^k и $R^{(k+1)}$ -слоев.

$$U_{\text{вх.}Z_{q_k}^k}(t_2^{(1+k)}) = \sum_{q_{(k+1)}=1}^{g_{(k+1)}} W_{q_{(k+1)} q_k}^{k2} U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}),$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = f_i(U_{\text{вх.}Z_{q_k}^k}(t_2^{(1+k)})),$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$U_{\text{вх.}R_{h_k}^k}(t_2^{(1+k)}) = \sum_{q_{(k+1)}=1}^{g_{(k+1)}} W_{q_{(k+1)} h_k}^{k4} U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}),$$

$$h_k = \overline{1, p_k}; \quad q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = f_i(U_{\text{вх.}R_{h_k}^k}(t_2^{(1+k)})), \quad h_k = \overline{1, p_k}.$$

Выходные сигналы нейронов Z^k - и R^k -слоев посылаются на входы элементов $Z^{(k+1)}$ -слоя:

$$U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_3^{(1+k)}) = \sum_{q_k=1}^{g_k} W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1} U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) + \sum_{h_k=1}^{p_k} W_{h_k q_{(k+1)}}^{k3} U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad h_k = \overline{1, p_k};$$

$$U_{\text{вых.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)}) = f_{q_{(k+1)}}(U_{\text{вх.}Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_3^{(1+k)}));$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}; \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

Шаг 14. Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы нейронов Z^k -слоя $U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)})$ и $U_{\text{вых.}Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)})$, $q_k = \overline{1, g_k}$, выходные сигналы управляющих нейронов R^k -слоя $U_{\text{вых.}R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)})$

и $U_{\text{ВЫХ.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)})$, $h_k = \overline{1, p_k}$, а также выходные сигналы нейронов $Z^{(k+1)}$ -слоя $U_{\text{ВЫХ.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)})$ и $U_{\text{ВЫХ.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)})$, $q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}$, которые получены на текущей и предыдущей итерациях. Если не выполнено хоть одно равенство:

$$U_{\text{ВЫХ.}Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = U_{\text{ВЫХ.}Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}), \quad q_k = \overline{1, g_k};$$

$$U_{\text{ВЫХ.}R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = U_{\text{ВЫХ.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}), \quad h_k = \overline{1, p_k};$$

$$U_{\text{ВЫХ.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}) = U_{\text{ВЫХ.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)}),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}},$$

то переход к шагу 12 алгоритма, если $k+1 < N$, то $k = k+1$ и переход к шагу 8, иначе – к шагу 15 алгоритма.

Шаг 15. Останов.

В [16] приведен пример обучения новой многослойной сети с биполярными нейронами для запоминания двух цепочек ассоциативных изображений с учетом управляющей информации.

Разработано программное обеспечение, моделирующее архитектуру и алгоритмы функционирования многослойной дискретной двунаправленной ассоциативной памяти с управляющими нейронами. Программа позволяет в процессе работы нейронной сети восстанавливать по входной информации, подаваемой на входы X - или Z^N -нейронов цепочки ассоциативных изображений. Программа также позволяет корректировать ассоциативные данные с учетом дополнительной информации, хранящейся в управляющих нейронах при восстановлении цепочки изображений ассоциативных входной информации с X -слоя нейронов.

Выводы

Таким образом, впервые на основе двунаправленной ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы функционирования новой двунаправленной многослойной дискретной нейронной сети, которая способна восстанавливать по входной информации подаваемой на любой из двух ее входов цепочки ассоциативных изображений и изменять цепочки ассоциаций с учетом дополнительной информации, подаваемой на управляющие нейроны. На архитектуру и алгоритмы функционирования нейросетевой памяти получен патент Украины на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский, В.И.** Нейронні мережі в системах автоматизації / В.И. Архангельский, І.М. Богаенко, Г.Г. Грабовський, М.О. Рюмшин. – К.: Техніка, 1999. – 364 с.
2. **Каллан, Р.** Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.
3. **Дмитриенко, В.Д.** Основы теории нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИ-ИММАП, 2001. – 159 с.

4. **Комашинский, В.И.** Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
5. **Бодянский, Е.В.** Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 372 с.
6. **Галушкин, А.И.** Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае: в 2 т. / А.И. Галушкин. Т. 1. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 367 с.
7. **Барский, А.Б.** Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
8. **Осовский, С.** Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
9. **Дмитриенко, В.Д.** Нейросетевое устройство направленных ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, И.П. Хавина // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия История, политология, экономика, информатика. – № 7 (78). – Вип. 14/1. – Белгород, 2010. – С. 110-119.
10. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
11. **Яхьяева, Г.Э.** Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие / Г.Э. Яхьяева. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.
12. **Галушкин, А.И.** Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.
13. **Рутковский, Лешек.** Методы и технологии искусственного интеллекта / Лешек Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.
14. **Дмитриенко, В.Д.** Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд. центр НТМТ, 2013. – 248 с.
15. **Дмитрієнко, В.Д.** Пристрій багатослоєвої двонаправленої асоціативної пам'яті з керуючими нейронами / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко // Патент на винахід 108712 Україна, МПК G06G 7/60. Заявник та володар патенту НТУ "ХПИ". – № а 2014 04330; Заявлено 22.04.2014; Опубліковано 25.05.2015; Бюл. № 10.
16. **Дмитрієнко, В.Д.** Пристрій багатослоєвої двонаправленої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко // Патент на винахід 108947 Україна, МПК G06G 7/60. Заявник та володар патенту НТУ "ХПИ". – № а 2014 02402; Заявлено 11.03.2014; Опубліковано 25.06.2015; Бюл. № 12.
17. **Дмитриенко, В.Д.** Многослойная нейросетевая память, хранящая цепочки ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, Р.П. Мигущенко, А.Ю. Заковоротный, В.А. Бречко / Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Х.: НТУ "ХПИ". – № 33 (1142). – 2015. – С. 57-67.

ПОСТРОЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

О.М. Пигнастый, Р.О. Корсун

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

THE CONSTRUCTION A KINETIC EQUATION OF THE PRODUCTION PROCESS

O.M. Pihnastyi, R.O. Korsun

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

pom7@bk.ru

Аннотация. В статье обсуждаются методы построения кинетического уравнения технологического процесса. Представлена модель взаимодействия предметов труда с технологическим оборудованием, положенная в основу вывода кинетического уравнения. Рассмотрены численные характеристики, описывающие состояние производственной линии.

Ключевые слова: кинетическое уравнение, производственная линия, массовое производство, незавершенное.

Abstract. The paper discusses methods of constructing the kinetic equation of the technology process. The article presents a model of the interaction of objects of labor with technological equipment, which is the basis for the derivation of the kinetic equation. To describe the state of the production line introduced numerical characteristics.

Keywords: kinetic equation, the production line, mass production, work in progress, balance equations, quasi-static process, stochastic process.

Problem statement and analysis of recent publications

Modeling complex dynamic production processes is an effective method of research [1,2]. One of widespread classes form the production systems, in which character of the observable production processes has stochastic nature [2, 3, 4, 5, 6]. Regularities of inherent equilibrium states in production systems in many ways similar to those that take place in the physical (thermodynamic) systems [7, 8]. They appeared so deep and useful, that were proclaimed as some general principles for the thermodynamics and production systems: Le Chatelier-Samuelson, Carnot-Hicks [9]. On the basis of the principles of the functioning of modern mass production it can be represented as a stochastic process, during which the manufacturing system changes from one state to another [6,10]. The production process state is determined by the state of the overall number N of items of work [6]. In transition of the object of labor from one state to another, there is a transformation of resources (raw material, materials, living labor) in the prepared product as a result of purposeful influence of equipment. State j -th object of labor in the phase space will be described by state parameters

$$\vec{S}_j = (S_{j,1}, S_{j,2}, \dots, S_{j,\alpha}, \dots, S_{j,A}),$$

$$\vec{\mu}_j = (\mu_{j,1}, \mu_{j,2}, \dots, \mu_{j,\alpha}, \dots, \mu_{j,A}),$$

where $S_{j,\alpha}$ (USD) value of the transferred α - of the technological resource or part thereof for the j -th subject of work, $\mu_{j,\alpha}$ (USD / hour), the intensity of the transfer value of α - of the resource to the j -th subject of work, $0 < j \leq N$, $0 < \alpha \leq A$ [6]. The state of parameters of production process in some moment of time will be defined, if the parameters of the state of the object of labor are defined $(\vec{S}_1, \vec{\mu}_1, \dots, \vec{S}_N, \vec{\mu}_N)$

and the objective function $J(t, \vec{S}_j, \vec{\mu}_j)$ [11,12], and at any other time it is found from the equations of states of objects of labor [6,12]. However, if the number of objects of labor N is much greater than unity, then decide System of N_0 equations second order is practically impossible [13, 14]. The last clarification requires a transition from the object-process description (micro-description) to aggregated streaming (macroscopic) description with the elements of probabilistic nature. The main difficulty in this specification is to highlight the characteristics of the parameters of states [15] objects of labor [1,6], which could be measured in the study of the actual production processes [12, 13]. Instead of considering the state of the production process with the parameters of the state of the objects of labor $(\vec{S}_1, \vec{\mu}_1, \dots, \vec{S}_N, \vec{\mu}_N)$, we will enter normalized discrete phase function of distribution of number N objects of labor in the phase space (t, S, μ) [6,16].

Each point in the space of states [15, 16, 17] will set the state of the object of labor. It is reasonable to expect that at large N ($N \approx 10^6$ [18], [13]) function is well approximated by a continuous phase distribution function of the objects of labor $\chi(t, \vec{S}, \vec{\mu})$ by the states [6, 16, 19, 20]. If the production system produces the K kinds of products [21, p.445], $K=10$, then it will be required to get a distributing function for every k -th species $\chi_k(t, \vec{S}, \vec{\mu})$, ($k=1..K$). Before considering the multi-axis (multiresource, $0 < \alpha \leq A$) model of the production process, in interoperational reserves of which there are parties of K of types of interactive with each other and with an equipment wares), we examine patterns of processing batches N objects of the labor of one kind ($N \gg 1$). We suppose that processing occurs over successive the M operations generalized production line

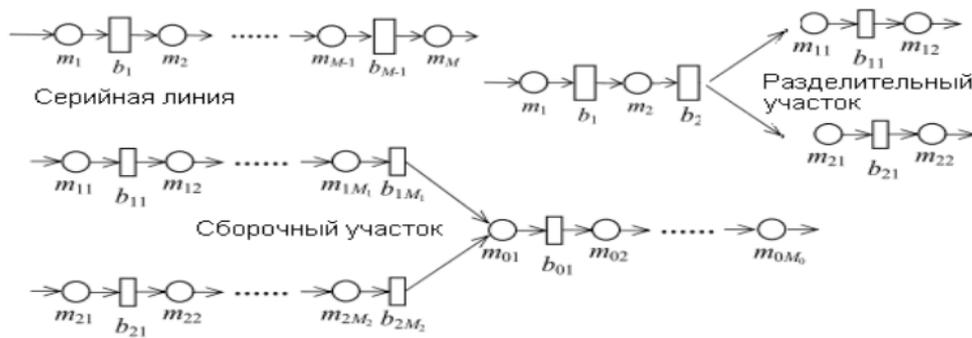


Fig. 1. Scheme of flows of objects of labor (m - equipment and -buffer), [23]

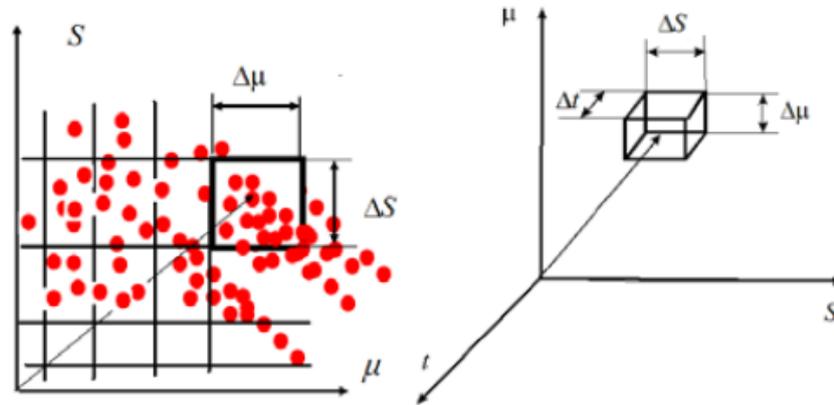


Fig. 2. The unit cell of phase technological space

(fig. 1), ($M \gg 1$) [23]. The obtained patterns are common for both single-threaded and multi-threaded lines with a wide variety of resources [10, 23].

The construction of a kinetic equation of the production system

We will break up phase space on such number of cells, that sizes of cell $\Delta\Omega = \Delta S * \Delta\mu$ will contain into itself the large number of the objects of labor (fig. 2). It is possible to conduct the estimation of amount of wares in a cell $\Delta\Omega = \Delta S * \Delta\mu$. For the process, which consists of $M \approx 100$ [13], $M \approx 250$ [23, p.4589], $M \approx 300$ [21, p. 445] operations with the number of items of work in progress $N \approx 10^5$ [25], $N \approx 10^4$ [13], m-th operation in the reserve contains the average number of items of work $(M/N) \approx 10^3$. Influence of the number of operations M on the accuracy of calculations is investigated in [6, p.23], where an analysis of the calculation results obtained using DES- and PDE-models for $M = 50$ ($N \approx 10^4$), operations with satisfactory accuracy. Along with $M=50$ a comparative analysis is executed for $M = 10$ operations. It is shown that this amount can be used for a rough approximation. Instead of fixing the exact parameters of objects of labor, we will approximately describe the state of the production process using the number of objects of labor in cells $\Delta\Omega$ with the coordinates of the parameters of the object of labor, $S_j \in [S, S + \Delta S], \mu_j \in [\mu, \mu + \Delta\mu]$ (fig. 2).

If the cell size is small enough, the approximate description will carry the equally detailed information as accurate does. For the technological process, consisting of

several hundred operations it is reasonable to go to the continuous description of the parameters, that describe the operation, considering along with [23] the main limit when $N \rightarrow \infty$ and the limiting case of $M \gg 1$. Due to the fact that the product of $\chi(t, S, \mu) * d\Omega$ is the number of items of work in the cell $d\Omega$ phase space with coordinates $S_j \in [S, S + \Delta S], \mu_j \in [\mu, \mu + \Delta\mu]$, the integration over the volume Ω of the phase space (S, μ), gives the total number N of items of work that are in progress [6, 19]:

$$\int_0^{S_d} \int_0^{\infty} \chi(t, S, \mu) d\mu dS = N, \quad \Omega = \int_0^{S_d} \int_0^{\infty} d\mu dS, \quad (1)$$

where S_d (USD) - the cost of the product. The limits of integration $S = 0$ and $S = S_d$ specify the range of change in the coordinates $S, S \in [0, S_d]$ which determines the position of the object of labor along the technological route. We will accept (1) as a condition for the normalization of the phase distribution function $\chi(t, S, \mu)$ items of work over the states [6, 16, 19, 20], which is the law of conservation of articles in the production process [6]. We introduce a numerical characteristics

$$\int_0^{\infty} \mu^k * \chi(t, S, \mu) d\mu = [\chi]_k \quad (2)$$

that reflect the essential features of the distribution of the states of the objects of labor that are in progress. Features (2) for the distribution function $\chi(t, S, \mu)$, we will define as moments of k-th order [20, s.906]. Often the problem can be solved using numerical characteristics, leaving aside the laws of distribution.

Numerical characteristics and method of moments associated to them play an important role in the construction of many of the statistical theory of dynamical systems [6]. Essential value in the models of the production process are the zero $[\chi]_0 = [\chi]_0(t, S)$ and the first $[\chi]_1 = [\chi]_1(t, S)$ moments of the distribution function of the states of the objects of labor [19] which determine density of distribution on the positions of objects of labor and the rate of processing operations on objects of labor [26, c.37]. The change of the distribution function $\chi(t, S, \mu)$ of the states of the objects of labor is due to the stochastic nature of the interaction of objects with the equipment and with each other [23, c.4591]. This interaction is characterized by function $G(t, S, \mu)$

$$\frac{d\chi(t, S, \mu)}{dt} = G(t, S, \mu) \quad (3)$$

which takes into account spatial layout of equipment the laws of impact of equipment on the subject of work for the purpose of transfer of resources and mechanisms of interaction of objects of labor with each other. The interaction of objects of labor with each other is determined by the processing priorities (processing rules FIFO, LIFO ...), and restrictions on the technological modes. The total derivative in (3) means differentiation along the phase trajectory of the object of labor. If the motion of the object of labor in the state space is deterministic and defined by the Euler equations for the objective function of the production system [11, 12], the equation (3) by virtue of the Liouville theorem becomes the identity $G(t, S, \mu) = 0$. We write a total derivative $\chi(t, S, \mu)$ in the form

$$\frac{d\chi(t, S, \mu)}{dt} = \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial t} + \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial S} * \mu + \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial \mu} * \frac{d\mu}{dt} \quad (4)$$

and represent the equation (3) as follows:

$$\frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial t} + \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial S} * \mu + \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial \mu} * \frac{d\mu}{dt} = G(t, S, \mu). \quad (5)$$

Equation (5) μ has the averaged intensity of transfer resources on all subjects of labor $d\Omega$ in the cell with coordinates $S_j \in [S, S + \Delta S]$, $\mu_j \in [\mu, \mu + \Delta\mu]$ [6]. Replace $\frac{d\mu}{dt}$ in (5) with the equations defining the normative trajectory of the object of labor in the cell $d\Omega$ [6,11,12, 16, 20],

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{[\chi]_{1\psi}(t, S)}{[\chi]_0(t, S)} \right) + \\ &+ \frac{[\chi]_{1\psi}(t, S)}{[\chi]_0(t, S)} \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{[\chi]_{1\psi}(t, S)}{[\chi]_0(t, S)} \right) = f(t, S), \\ \mu &= \frac{dS}{dt}, \end{aligned} \quad (6)$$

where $[\chi]_{1\psi}(t, S)$ - the pace of processing of objects of labor equipment at the point of the technological route with coordinate S . Equation (6) connects the release of products in place technological route, specified by the coordinate S and the amount of necessary costs of technological resources to

transform the object of labor. The ratio of the form (6) which provides the connection with the cost of manufacture can be determined as a function of the generalized manufacturing equipment located in the designated area of a technological route. The kinetic equation of technological process allows us to describe the evolution of the transition state of the production process to the equilibrium state:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial t} + \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial x} * \mu + \\ + \frac{\partial\chi(t, S, \mu)}{\partial \mu} * f(t, S) = G(t, S, \mu), \\ \chi(x, S, 0) = \chi(x, S, \infty) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

The kinetic equation of the form (7) is used in [26] (2003) in the construction of balance models of production lines. At the same time the US Ringhofer in the study of the production processes of the company "INTEL" got a kinetic equation for quasi-static description of the production lines

$$\frac{\partial\chi(x, r, t)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial\chi(x, r, t)}{\partial x} = G(r, x, t) \quad (8)$$

where the coordinates of the phase space x, r - the degree of incompleteness of manufacture of the product (corresponding position), and the effective time of processing. Construction of kinetic equations is one of the major problems of statistical theory of production lines management systems [6,19,28]. The kinetic equation (7), (8) takes on real sense after the establishment of the form of function $G(t, S, \mu)$. At motion of the object of labor on a technological route, an equipment has an impact on the object of labor, changing it qualitatively and quantitatively. The stochastic process impact of equipment on the object of labor is described by a distribution density $\psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi)$ of a random variable μ_ψ , where $\tilde{\mu}_\psi$ and μ_ψ - the intensity of the transfer of resources to the object of labor before and after exposure [27]. The cross-section random process for regulatory trajectory, that characterizes the rate of transfer of resources at time t at the point of a technological route with the coordinate S is a random variable [12] μ_ψ with the distribution density $\psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi)$. The probability that the result of the impact of the equipment on the object of labor the value μ_ψ would be in range $(\mu_\psi; \mu_\psi + d\mu_\psi)$ is the value $\psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi) d\mu_\psi$, and the total probability of transition to any state is unity:

$$\int_0^{\infty} \psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi) d\mu_\psi = 1. \quad (9)$$

For regulatory technological trajectory that characterizes the change of state of object of labor by treating the transition from one generalized operation to another, the mathematical expectation of the intensity of the transfer of resources $\langle \mu_\psi \rangle$ for labor can be calculated:

$$\int_0^{\infty} \mu_\psi * \psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi) d\mu_\psi = \langle \mu_\psi \rangle. \quad (10)$$

Function $\psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi)$ is determined by the design and technological documentation or as a result of the experimental study [24] the state of object of labor in the transition from one operation to another. Fig. 3 shows

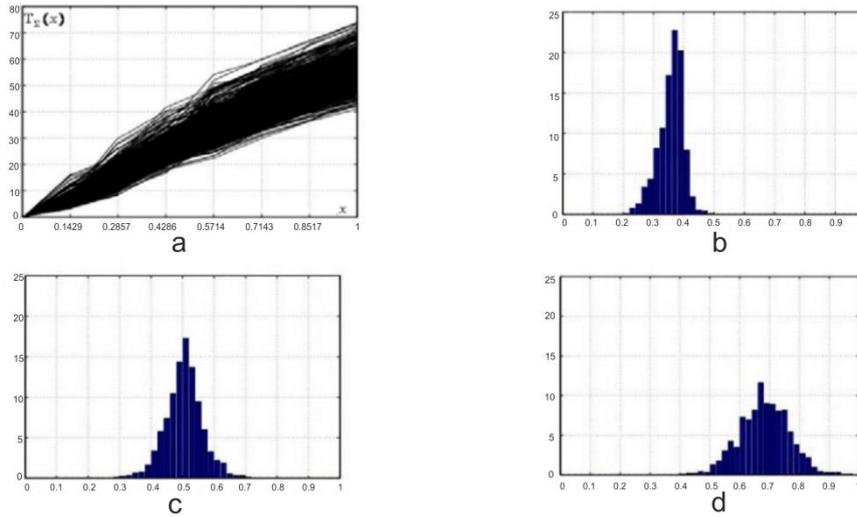


Fig. 3. Experimental results [24]: a – trajectory $T_{\Sigma}(x)$; b, c, d – a histogram of the distribution of the objects of labor

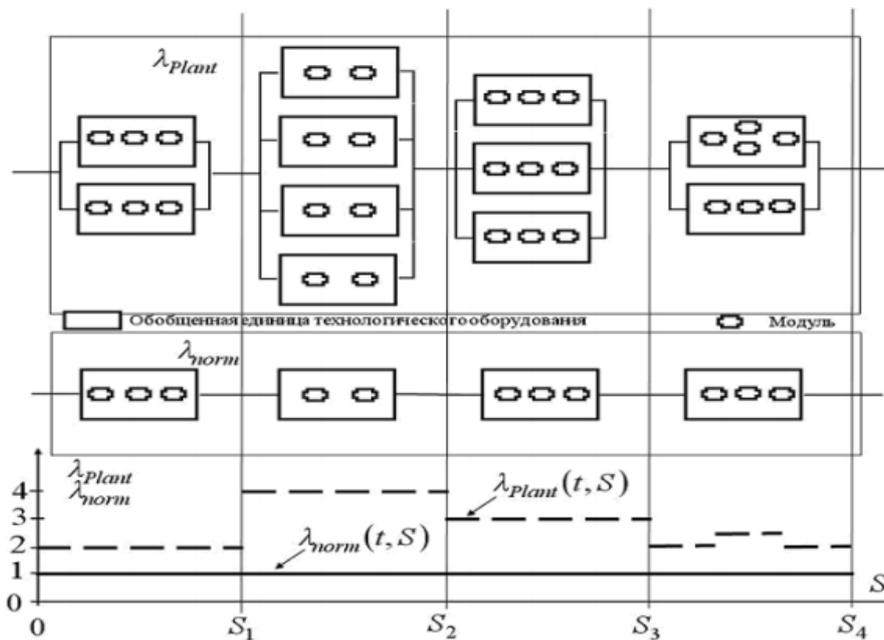


Fig. 4. The density of the arrangement of equipment $\lambda_{norm}(t, S), \lambda_{plant}(t, S), \Delta S_m = 1$

the experimental technological trajectories $T_{\Sigma}(x)$, for a party of 920 subjects of work in the phase space (x, r) , which show the dependence of the total effective processing time of the object of labor from the place of treatment in the technological route. Fig. 3 shows the histograms of the distribution of the objects of labor on technological positions for different periods of time (b – $t = 20$, c – $t = 30$, d – $t = 40$) since the beginning of processing of party of wares. Measurements were carried out on the production line for the production of semiconductor products of the company "INTEL" [24] to examine the impact of vibrations of the effective time duration of processing on the duration of the production cycle. This experimental data is sufficient to construct the table function $\psi(t, S, \tilde{\mu}_{\psi}, \mu_{\psi})$ which is approximated by a smooth continuous function. At its construction, we consider the technological process which consists of a sequence of generalized operations. In the design of production lines to provide the required performance are using a series-parallel arrangement of generalized items of equipment (fig. 1) [23]. To account for the number of generalized equipment within

the range of the generalized operation $[S_{m-1}, S_m]$ – we introduce the notion of density of equipment $\lambda_{plant}(t, S)$ along the technological route $[0, S_d]$. This is because each generalized equipment unit consists of a plurality of sections, modules, components, subassemblies and others separately provided parts of common equipment distributed along a path of processing the object of labor within the generalized trajectory. The dependence on t in the function $\lambda_{plant}(t, S)$, suggests the possibility of changing the amount of equipment in the time interval of the production cycle, for example, due to the on / off of reserve equipment units. Then the number of generalized items of equipment at time t within the interval of generalized operation $[S_{m-1}, S_m]$ (fig.4) can be defined as

$$\frac{1}{N_m} \int_0^{\infty} \mu_{\psi} \psi(t, S, \tilde{\mu}_{\psi}, \mu_{\psi}) d\mu_{\psi}. \quad (11)$$

If the m -th generalized operation corresponds to only one generic unit of equipment, respectively the integral (11) is equal to one.

Often, one generalized equipment can be represented in the form of successive modules, each of which in order to improve the performance of the operation has the ability to duplicate. Suppose that up within the module is done the ratio

$$\int_{S_{b-1}}^{S_b} \lambda_{norm}(t, S) dS = P_{mB}, [S_{b-1}, S_b] \in [S_{m-1}, S_m],$$

$$\int_{S_{m-1}}^{S_m} \lambda_{norm}(t, S) dS = 1.$$

Then, for the m-th generalized operation with additional number n of modules rightly:

$$\int_{S_{m-1}}^{S_m} \lambda_{plant}(t, S) dS = 1 + n * P_{mB} \quad (\text{fig.4}) \quad \text{where} \quad \lambda_{plant}(t, S) dS -$$

the number of units of a generalized equipment on the segment $[S, S + dS]$. In unit time a volume element $\Delta\Omega = \Delta S * \Delta\mu$, $S \in [S, S + dS]$, $\mu \in [\mu, \mu + d\mu]$ was visited by $\chi(t, S, \mu) * \mu * d\mu$ objects of labor on average, which have experienced with the $\{\lambda_{plant}(t, S) * dS\} * \{\chi(t, S, \mu) * \mu * d\mu\}$ acts of impact of equipment at the objects of labor. The probability that the result of the impact of the equipment on the subject of work value of a random variable μ will be in the range of $(\tilde{\mu}, \tilde{\mu} + d\tilde{\mu})$ there is the value $\varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu}) * d\tilde{\mu}$ and the total probability of transition to any state will be.

$$\int_0^{\infty} \varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) d\tilde{\mu} = 1. \quad (12)$$

Thus, the number of objects of labor that are experienced per unit time the impact of the technological equipment and took random value in the range of $(\tilde{\mu}, \tilde{\mu} + d\tilde{\mu})$ is the product of the transition probabilities $\varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu}) * d\tilde{\mu}$ on the total number of objects of labor $\lambda_{plant}(t, S) * dS * \chi(t, S, \mu) * \mu * d\mu$, experienced the impact of the equipment.

$$\varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu}) * d\tilde{\mu} * \lambda_{plant}(t, S) * dS * \chi(t, S, \mu) * \mu * d\mu. \quad (13)$$

The distribution density $\varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu})$ of a random variable μ can be expressed through the density distribution $\psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi)$ of random variables μ_ψ . With a uniform transfer of resources for all N_m objects of labor, are in-process backlog of m-th generalized operation, the random variables μ and μ_ψ associated functional dependence [28, p.783], [29, p.117], [29, p.821]:

$$\mu = \mu_\psi * N_m^{-1} \quad (14)$$

which assumes a linear law of increasing processing time of the party of objects labor with increase of the size of the queue N_m . The distribution density $\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu)$ of the random variable μ can be written as:

$$\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) = N_m * \psi(t, S, N_m * \tilde{\mu}, N_m * \mu). \quad (15)$$

The moments of a random variable μ we write through the moments of a random variable:

$$[\varphi]_0 = \int_0^{\infty} \varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) d\mu = [\psi]_0 = 1, \quad (16)$$

$$[\varphi]_1 = \int_0^{\infty} \mu \varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) d\mu = \frac{1}{N_m} \int_0^{\infty} \mu_\psi \psi(t, S, \tilde{\mu}_\psi, \mu_\psi) d\mu_\psi =$$

$$= \frac{[\psi]_1}{N_m} = \frac{[\chi]_1(t, S)}{[\chi]_0(t, S)}, \quad (17)$$

$$[\varphi]_2 = \int_0^{\infty} \mu^2 \varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) d\mu = \frac{[\psi]_2}{(N_m)^2} =$$

$$= \left(\frac{[\chi]_1(t, S)}{[\chi]_0(t, S)} \right)^2 \left(1 + \frac{\sigma_\psi^2}{\langle \mu_\psi \rangle^2} \right), \quad (18)$$

$$[\varphi]_k = \int_0^{\infty} \mu^k \varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) d\mu = \frac{[\psi]_k}{(N_m)^k}, \quad (19)$$

where σ_ψ - is the standard deviation of a random variable μ_ψ . For many practical cases $\frac{\sigma_\psi}{\langle \mu_\psi \rangle} = 0.005 \dots 0.1$ that allows you to record approximately

$$[\varphi]_2 = \left(\frac{[\chi]_1(t, S)}{[\chi]_0(t, S)} \right)^2. \quad (20)$$

Along with the departure of (13) objects of labor from the volume element $dS * d\mu$ in the element of volume $dS * d\mu$ objects of labor come from volume $dS * d\tilde{\mu}$ in the amount of:

$$\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) * d\mu * \lambda_{plant}(t, S) * dS * \chi(t, S, \tilde{\mu}) * \tilde{\mu} * d\tilde{\mu}. \quad (21)$$

After the integration of the difference between (13) and (21) over a range of values of $\tilde{\mu}$, we obtain the change in the number of objects of labor in the volume element $dS * d\mu$ per unit of time

$$dS * d\mu * \lambda_{plant}(t, S) * \int_0^{\infty} \{\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) * \tilde{\mu} * \chi(t, S, \tilde{\mu}) - \varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu}) * \mu * \chi(t, S, \mu)\} d\tilde{\mu} \quad (22)$$

from which

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\partial \chi}{\partial S} \mu + \frac{\partial \chi}{\partial \mu} f =$$

$$= \lambda_{plant} \int_0^{\infty} \{\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) \tilde{\mu} \chi(t, S, \tilde{\mu}) - \varphi(t, S, \mu, \tilde{\mu}) \mu \chi(t, S, \mu)\} d\tilde{\mu}. \quad (23)$$

For brevity we use the notation $\chi = \chi(t, S, \mu)$, $[\chi]_k = [\chi]_k(t, S)$, $f = f(t, S)$, $\lambda_{plant} = \lambda_{plant}(t, S)$. Taking into account (16), equation (23) can be written as:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\partial \chi}{\partial S} \mu + \frac{\partial \chi}{\partial \mu} f = G(t, S, \mu) =$$

$$= \lambda_{plant} \left\{ \int_0^{\infty} [\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) * \tilde{\mu} * \chi(t, S, \tilde{\mu})] * d\tilde{\mu} - \mu * \chi \right\}. \quad (24)$$

For multidimensional description equation (24) can be written as

$$\frac{\partial}{\partial t} \chi(t, \bar{S}, \bar{\mu}) + \bar{\mu} \frac{\partial}{\partial \bar{S}} \chi(t, \bar{S}, \bar{\mu}) + \bar{f}(t, \bar{S}) * \frac{\partial}{\partial \bar{\mu}} \chi(t, \bar{S}, \bar{\mu}) = \lambda_{plant}(t, \bar{S}) * \left\{ \int_0^{\infty} [\varphi(t, \bar{S}, \bar{\mu}, \tilde{\mu}) \bar{\mu} \chi(t, S, \tilde{\mu})] d\bar{\mu} - \bar{\mu} \chi(t, \bar{S}, \bar{\mu}) \right\} \quad (25)$$

The most interesting, from a practical point of view, cases the density distribution $\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu)$ does not depend on the status of objects of labor, before exposure to the process equipment. Then integration of the right-hand side of (24) leads to a simplification of integro-differential equations:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\partial \chi}{\partial S} * \mu + \frac{\partial \chi}{\partial \mu} * f = \lambda_{plant} * \{ \varphi(t, S, \mu) * [\chi]_1 - \mu * \chi \}. \quad (26)$$

The conclusions

Integro-differential equation (24), (26) is a kinetic equation that describes the processing of objects of labor during their movement on the technological route, it was first obtained in [26]. In the case where the intensity μ is slowly varying with time, $\mu = \mu_0 \cong const$ (quasi-static process), the kinetic equation (24) takes the form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\partial \chi}{\partial S} * \mu &= \lambda_{plant} * \\ * \left\{ \int_0^{\infty} [\varphi(t, S, \tilde{\mu}, \mu) * \tilde{\mu} * \chi(t, S, \tilde{\mu})] * d\tilde{\mu} - \mu * \chi \right\}; &(27) \\ \frac{d\mu}{dt} &= f(t, S) \cong 0, \end{aligned}$$

which is used in the quasi-static description of the technological process [19,28]. From equation $f(t, S) \cong const$ (6) follows $[\chi]_{1\psi}(t, S) \cong const * [\chi]_0(t, S)$, which requires compliance with performance proportional to the number of items of work the equipment in its in-process storage. It is difficult to realize in practical terms, except for the case of synchronization the equipment $\frac{\partial}{\partial S} [\chi]_{1\psi}(t, S) \cong 0$. The kinetic equation of the form (27) can be used to construct models of synchronized production lines. It should be noted that the equation

$$\frac{\partial \chi(x, r, t)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \chi(x, r, t)}{\partial x} = T(t, r) \int_0^{\infty} [\omega(t, \tilde{r}) * \chi(t, x, \tilde{r})] * d\tilde{r} - \omega(t, r) * \chi(t, x, r), \quad (28)$$

the right part of which is constructed using the method of random phases, it was obtained in [27, p. 788]. Built on the basis of its balance equations is used to study the synchronized production lines for the production of semiconductor products of "INTEL" company. Where $T(t, r)$ - distribution density of the random variable r , $\omega(t, r)$ - the auxiliary phase function [27, p.785]. The right side of the kinetic equation (28) in [27, p.788] is written in general terms, it requires further in-depth study of the effect as the features of processing technology as well as layouts of components and assemblies inside the unit of generalized equipment.

1. **Бусленко, Н. П.** Математическое моделирование производственных процессов / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1964. – 363 с.
2. **Bartholdi, J. J.** Deterministic chaos in a model of discrete manufacturing. / J. J. Bartholdi, D. D. Eisenstein, Y. F. Lim // Naval Research Logistics. – 2009. – N56(4). – P. 293 – 299.
3. **Katzorke, K.** Chaos and complexity in simple models of production dynamics / K. Katzorke, A. Pikovsky // Discrete Dynamics in Nature and Society. – №5. – 2000. – P. 179– 187. 445
4. **Mehdi, J.** Stochastic Models in Queuing Theory / J. Mehdi. – New York, 1991. – 482 p.
5. **Riano, G.** Transient behavior of stochastic networks: Application to production planning with load-dependent lead times / G. Riano // – Atlanta, 2003. – 556 p.
6. **Пигнастый, О. М.** Статистическая теория производственных систем / О. М. Пигнастый. – Харьков: ХНУ, 2007. – 388 с.
7. **Hopp, W.J.** Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management. / W. J. Hopp, M.L. Spearman. – Boston: Irwin. McGraw-Hill, 2001. – P. 698.
8. **Петров, Б. Н.** Теории моделей в процессах управления / Б. Н. Петров, Г. М. Уланов, И. И. Гольденблат, С. В. Ульянов – М.: Наука, 1978. – 224 с.
9. **Eekelen, J.** Control of Manufacturing Systems Using State Feedback and Linear Programming / J.A.Eekelen, E.Lefeber, J.E.Rooda // 44th IEEE Conference on Decision and Control. – Sevilla. – 2005. – P. 4652-4657
10. **Демуцкий, В. П.** Целевая функция производственной системы с массовым выпуском продукции. / В.П. Демуцкий, О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов // Вісник Харківського національного університету. – Харків: ХНУ. – 2006. – N746. – С. 95 – 103.
11. **Пигнастый, О. М.** О построении целевой функции производственной системы / О. М. Пигнастый // Доповіді Національної академії наук України. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика". – 2007. – №5. – С. 50 – 55.
12. **Lefeber, E.** Modeling, Validation and Control of Manufacturing Systems / E.Lefeber, R.A.Berg, J.E. Rooda // – Proceeding of the 2004 American Control Conference. – Massa- chusetts. – 2004. – P. 4583 – 4588.
13. **Schmitz, J. P.** Chaos in Discrete Production Systems. / J. P.Schmitz, J.E.Rooda // – Journal of Manufacturing Systems. – 2002. – V.21. – №3. – P. 236 – 246.
14. **Деруссо, П.** Пространство состояний в теории управления / П. Деруссо, Р. Рой. – М.: Наука, 1970. – 630 с.
15. **Демуцкий, В. П.** Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый // Доповіді Національної академії наук України. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика". – 2005. – N7. – С. 66 – 71.
16. **Хинчин, А. Я.** Математические основания статистической механики / А. Я. Хинчин. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2003. – 128 с.

17. **Ringhofer, C.** Traffic flow models and service rules for complex production systems / C. Ringhofer // *Decision Policies for Production Networks*. – 2012. – С. 209 – 233.
18. **Armbruster, D.** Kinetic and fluid model hierarchies for supply chains supporting policy attributes / D. Armbruster., D. Marthaler, C. Ringhofer // *Bulletin of the Institute of Mathematics*. – Academia Sinica, – 2006. – P. 496 – 521.
19. **Демуцкий, В. П.** Использование методов статистической физики для исследования экономикопроизводственных систем с массовым выпуском продукции / В.П.Демуцкий, О.М.Пигнастый, В.Д.Ходусов // *Вісник Харківського національного університету*. – Харків: ХНУ. – 2005. – N710.– С. 128 – 134.
20. **Armbruster, D.** A Continuum Model for a Re-entrant Factory / D. Armbruster, D. Marthaler, C, Ringhofer, K. Kempf, Jo T -C. // *Operations research*. – 2006. – VOL 54 – №5. – P. 933 - 950 .
21. **Tian, F.** An iterative approach to item-level tactical production and inventory planning. / F.Tian, S.P.Willems, K.G.Kempf // *International Journal of Production Economics*. – 2011. – №133. – P. 439 – 450.
22. **Zhang, Liang.** System-theoretic properties of Production Lines: A dissertation submitted the degree of Doctor of Philosophy / Zhang Liang. – Michigan, 2009. – 289 p.
23. **Armbruster, D.** Continuous models for production flows.. / D. Armbruster, C. Ringhofer., Jo T- J. // *In Proceedings of the 2004 American Control Conference*. – Boston, MA, USA. – 2004. – P. 4589 – 4594.
24. **Scholz-Reiter, B.** Modelling and Control of Production Systems Based on Nonlinear Dynamics Theory / B. Scholz // *Annals of the CIRP*. – New York: Reiter. – 2002. –№1. – P. 375 – 378.
25. **Berg, R.** Partial differential equations in modelling and control of manufacturing systems / R. Berg. – Netherlands, Eindhoven Univ. Technol., 2004. – 157 p.
26. **Демуцкий, В. П.** Теория предприятия: Устойчивость функционирования массового производства и продвижения продукции на рынок / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый. – Харьков.: ХНУ, 2003. – 272 с.
27. **Armbruster, D.** Thermalized kinetic and fluid models for reentrant supply chains. / D. Armbruster, C. Ringhofer // *SIAM Journal on Multiscale Modeling and Simulation*. – 2005. – N3(4). – P. 782 – 800.
28. **Armbruster, D.** Continuous Dynamic Models, Clearing Functions, and Discrete-Event Simulation in Aggregate Production Planning. *New Directions in Informatics, Optimization and Production* / D. Armbruster, R. Uzsoy. – 2012. – P. 103 – 126.
29. **Armbruster, D.** Continuous Dynamic Models, Clearing Functions, and Discrete-Event Simulation in Aggregate Production Planning. *New Directions in Informatics, Optimization and Production* / D. Armbruster, R. Uzsoy. – 2012. – P. 103 – 126.

ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ ПУТЕМ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.В. Веренев¹, А.Ю. Путноки², Н.И. Подобедов³

^{1,3}Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины,
г. Днепропетровск, Украина

²Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

STUDY TRANSIENTS CONTINUOUS ROLLING THROUGH EXPERIMENTAL INDUSTRIAL MEASUREMENT AND MATHEMATICAL MODELING

V.V. Verenev¹, A.Yu. Putnoki², N.I. Podobedov³

^{1,3}Nekrasov Iron and Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
Dnepropetrovsk, Ukraine

²Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine

¹VereneVV@mail.ru

Аннотация. Обобщены результаты натурных измерений момента сил упругости в переходных режимах непрерывной прокатки толстых и тонких полос в клетях широкополосных станов. Установлен ряд особенностей динамики взаимодействия клетей через полосу. Приведены результаты компьютерного моделирования заполнения полосой шестиклетевой группы.

Ключевые слова: непрерывная прокатка, переходные процессы, линия привода, момент, колебания, натяжение, толщина полосы.

Abstract. The study summarizes the results of field measurements of elastic force moment in transition modes during thick and thin strip continuous rolling in wide strip mill stands. The authors identify a number of dynamic features of interaction between the stands through the strip. The article deals with the results of computer modeling of the moment when the 6-stand train is filled with the strip.

Keywords: continuous rolling, transition processes, drive line, moment, vibrations, tension, strip thickness.

Актуальность работы

На непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 1680 комбината "Запорожсталь" в 2000-2010-х годах внедрен комплекс новых технологий [1...3]. К ним относятся, в частности, непрерывная прокатка слябов в парах черновых клетей дуо – № 1, № 2 – № 3 и № 3 – № 4, прокатка полос с применением промежуточного перемоточного устройства (ППУ) типа Койлбокс.

С учетом особенностей черновой группы и технологии, разных расстояний между клетями (6...25 м) для внедрения непрерывной прокатки требовалось решение ряда новых задач. Например, определение нагрузок в полосе и оборудовании, когда толстая полоса (~150 мм) прокатывается в клетки дуо (двигатель постоянного тока) и в это время происходит её захват валками клетки № 1 (привод переменного тока); определение ожидаемых нагрузок в случае внезапного отключения во время непрерывной прокатки двигателя одной из клетей. Корректировка деформационно-скоростных режимов, связанных с установкой ППУ, требовала их оценки путем математического моделирования заполнения непрерывной группы клетей с учетом взаимосвязности параметров технологии и оборудования.

Основные проблемы и решения

В 1970-80-х годах продолжилось развитие подхода к изучению непрерывной прокатки, как комплексного процесса, объединенного единой технологией, режимами работы оборудования и его конструктивными и динамическими параметрами [4...6]. В работе [5] для изучения межклетевых натяжений представлена математическая модель непрерывной группы широкополосного стана в отклонениях. В [6] пропуск сварного соединения через одну клеть непрерывного стана холодной прокатки исследован во взаимосвязи с натяжением, упругими колебаниями клетки, линии привода валков и толщины полосы.

Отмеченный подход взят в основу в данной работе с целью решения конкретных задач непрерывной прокатки на стане 1680. Его развитие состояло в разработке Институтом черной металлургии им. З.И. Некрасова совместно с комбинатом "Запорожсталь" математической модели непрерывной прокатки толстой полосы в парах черновых клетей [7] и тонкой полосы в чистой группе клетей [8].

Отличительная особенность модели состоит в том, что, во-первых, кроме известных уравнений и соотноше-

ний теории прокатки (для усилия и момента на валках, деформационно-скоростного режима, нейтрального угла, опережения и др.) и межклетевых натяжений учитывались транспортный перенос (запаздывание), упругие колебания клеток и крутильные колебания главных линий привода. Во-вторых, все параметры модели представлены не в отклонениях, как это принималось ранее, а в абсолютных величинах. Это позволило исследовать переходные режимы не только во время непрерывной прокатки, что позволило избежать методических ошибок, но и в процессе заполнения полосой шестиклетевой чистой группы, когда происходит последовательный захват полосы валками каждой клетки и далее происходит переход к установившемуся режиму.

Поставленная задача состоит в обобщении результатов исследования непрерывной прокатки, полученных путем опытно-промышленных измерений на станах 2500, 2000 и 1700 и математического моделирования на примере широкополосного стана 1680.

Изложение результатов

Во время свободной прокатки в клетях дуо и № 1 имели место случаи внезапного отключения главного привода. Учитывая неблагоприятное техническое состояние на тот период станины клетки дуо и то, что она не предусматривалась для непрерывной прокатки, одна из задач состояла в определении усилия в полосе между клетями при отключении двигателя одной из клеток во время непрерывной прокатки. Идентификации математической модели технологического и динамического взаимодействия клеток через полосу с учетом крутильных колебаний, способствовали результаты ранее выполненных измерений момента сил упругости в непрерывной группе черновых клеток №№ 3,4,5 стана 2000 ОАО "Северсталь" [9]. На рис. 1 косвенно, по реакции момента сил упругости можно судить о том, что в процессе динамического взаимодействия клеток между ними в полосе формируется значительное усилие подпора. В результате моделирования для стана 1680

установлено, что более тяжелый режим наступает при отключении двигателя клетки № 1. Продолжающая работать клеть дуо в течение короткого времени создает существенное усилие подпора – до 1600...2800 кН (рис. 2). Перегрузка линии привода клетки дуо достигает 4...5 значениям установившегося момента, что представляет опасность для механического оборудования.

В парах клеток № 2– № 3 и № 3 – № 4 при отключении двигателя первой клетки перегрузка по крутящему моменту во второй клетке возрастает в 2...3 раза, натяжение в полосе достигает 800...1200 кН, что может привести к её утяжке по ширине. Отключение двигателя второй клетки приводит к подпору и потере полосой продольной устойчивости через 0,5...1 с. Полученные данные позволили предусмотреть соответствующие мероприятия по защите двигателей от перегрузки.

Путем моделирования определили, что в процессе захвата толстой полосы валками клетки № 1 происходит формирование существенного межклетевого подпора или натяжения, которое действует в качестве возмущения на валки клетки дуо (рис.3). Последующие измерения подтвердили данное явление (рис.4). Увеличение (в разной степени) пикового значения момента зависит от соотношения частоты вращения валков в клетях. Для клеток дуо и № 1 рекомендовано оптимальное отношение скоростей.

На рис. 5 частота колебаний момента, закон убывания амплитуды в двух режимах практически не изменились, несмотря на переменчивость структуры системы и условия прокатки. В случае а) при захвате металла валками, момент инерции последних увеличился за счет присоединения массы сляба. После захвата металла валками клетки № 1 (б) обе линии привода оказались связанными полосой, однако частотные свойства линий не изменились. Формирование и передача межклетевого усилия в смежных клетях совершается с частотой крутильных колебаний главных линий (~18 Гц). Можно считать, что очаг деформации, масса прокатываемого сляба и обжатие не влияют на частоту колебаний момента сил упругости и скорость их

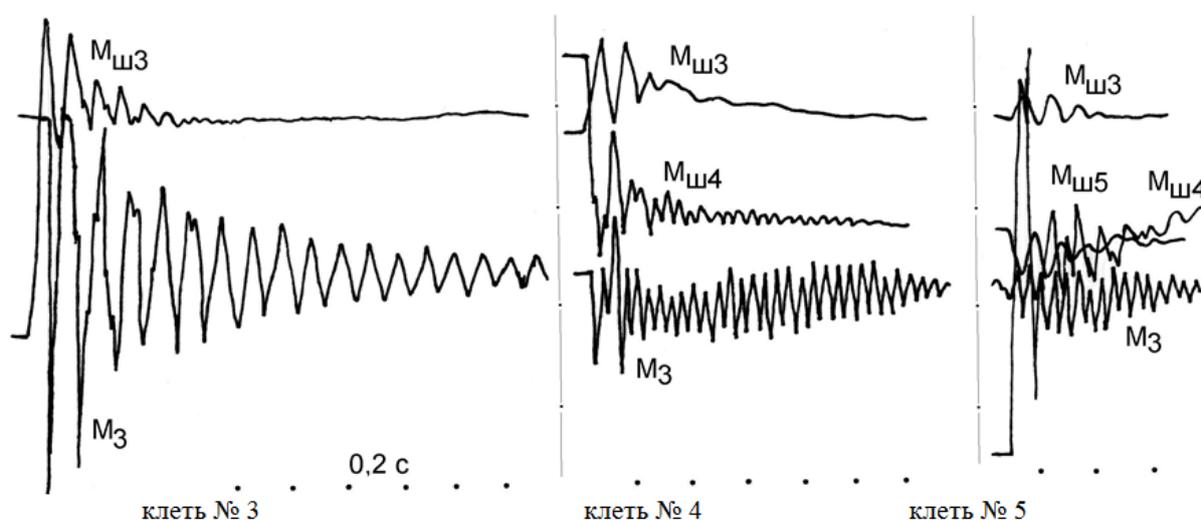


Рис. 1. Взаимодействие клеток 3, 4, 5 непрерывной черновой подгруппы стана 2000 АО "Северсталь" во время заполнения полосой: M_3 – момент сил упругости на участке вала между редуктором и двигателем, на моторном валу, $M_{ш}$ – момент на шпинделе

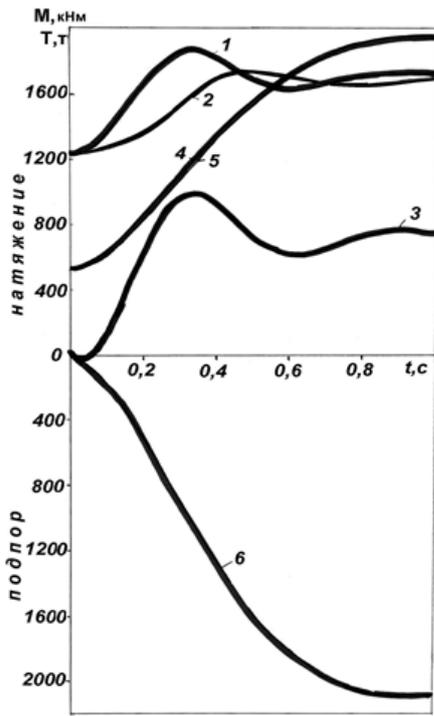


Рис.2. Переходный процесс в шпинделе (1,4), двигателе (2,5) и полосе (3,6) при отключении двигателей: 1,2,3 – отключение двигателя клетки дуо; 4,5,6 – отключение двигателя клетки № 1; 1 и 2 – момент в шпинделе и на валу двигателя клетки № 1; 4 и 5 – момент в шпинделе и на валу двигателя клетки дуо

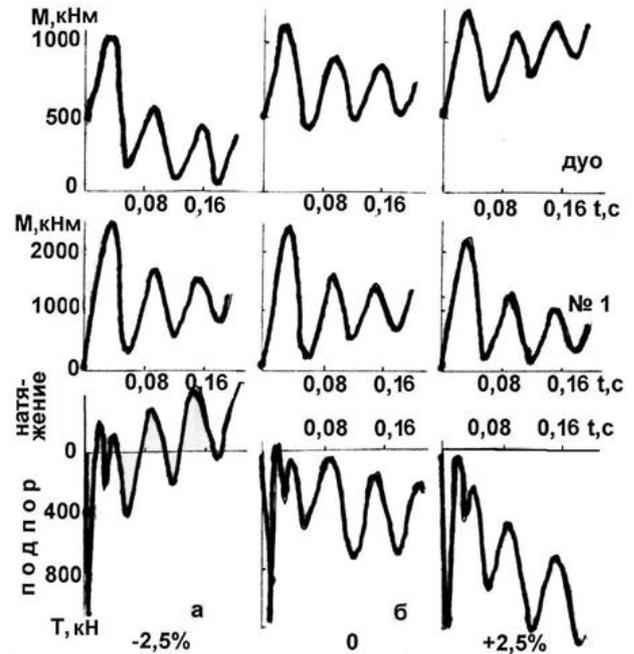


Рис.3. Момент M в клетях дуо и № 1 и межклетевое усилие T во время захвата полосы валками клетки № 1 при согласованном (б) и рассогласованном (а, в) скоростном режиме клетки дуо

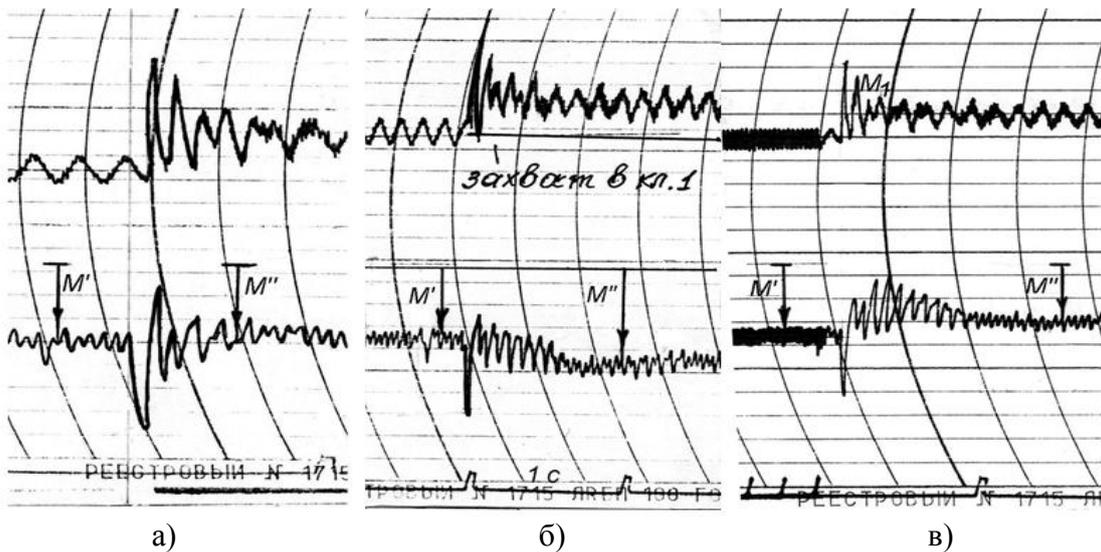


Рис. 4. Реакция линии привода клетки дуо M на захват сляба валками клетки № 1 M_1 : а – согласованный режим прокатки; б – подпор; в – натяжение

затухания. Это указывает на то, что демпфирующие свойства главных линий клетей определяются, прежде всего, их конструктивными (упруго-массовыми) параметрами и свойствами материала, из которого они изготовлены. Условия трения в очаге деформации в затухании колебаний играют, по-видимому, второстепенную роль.

Прокатка в других непрерывных черновых подгруппах стана 1680 сопровождается рядом переходных процессов (рис. 6).

Так, в клетки № 2 часть полосы сначала прокатывается в свободном режиме, затем с натяжением между клетями 2 и 3. После выхода полосы из клетки № 2 часть полосы в клетки № 3 прокатывается без натяжения, затем снова с натяжением совместно с клетью № 4. Без натяжения прокатывается также вторая часть полосы в клетки № 4. В общем случае непрерывная прокатка в парах клетей приводит к серии возмущений, которые могут вызвать продольную разнотолщинность подката. Установлены координаты участков на подкате, где

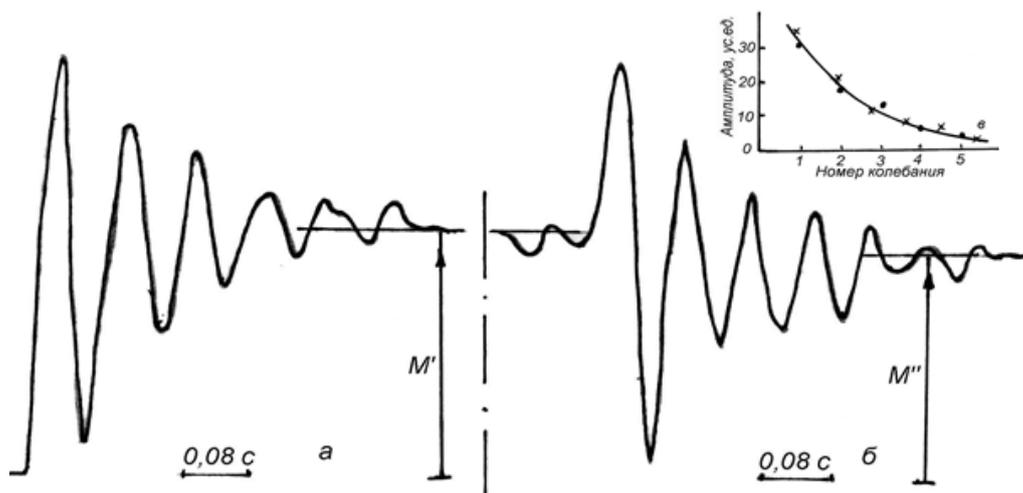


Рис. 5. Момент в линии привода клетки дуо при захвате полосы (а) и взаимодействии (б) с клетью 1; убывание амплитуды колебаний (в) при захвате (•) и взаимодействии (x)

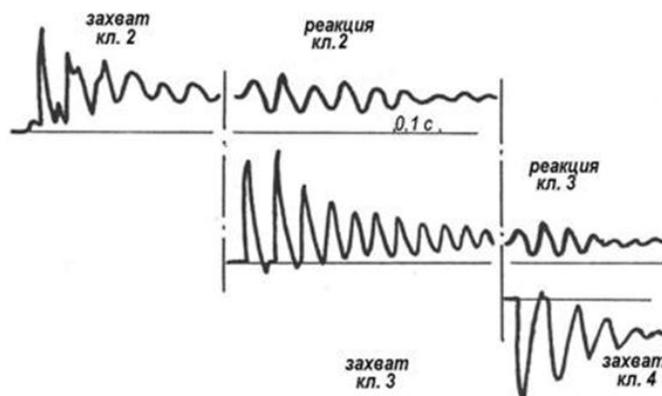


Рис.6. Взаимодействие главных линий клетей №№2–3 и №№3–4 через полосу

образуются "следы" (отпечатки) от переходных процессов [10]. Наибольшая разнотолщинность, составляющая 0,05...0,3 мм, обусловлена выходом полосы из клетки № 2, подстройкой скорости клетки № 3 к скорости клетки № 4 и взаимодействием клетей. Отмеченные "следы" во время прокатки полосы в чистовой группе клетей проявляются в качестве возмущений.

В чистовых клетях непрерывных широкополосных станов прокатывается сравнительно тонкая полоса (между клетями от 20 до 1,5 мм). здесь в процессе заполнения группы также наблюдается динамика взаимодействия клетей через полосу по моменту сил упругости (рис. 7). Во время захвата полосы валками i -й клетки в линии привода ($i-1$ -й (иногда $i-2$ -й)) возбуждаются заметные колебания момента с частотой собственных колебаний. Причиной их является формирующееся межклетевое натяжение, которое в качестве возмущения через полосу действует на валки ($i-1$ -й) клетки. Степень этого взаимодействия, в частности, амплитуда колебаний момента, зависит, прежде всего, от согласованности деформационно-скоростного режима. В ряде клетей наблюдается кратковременное падение среднего значения момента и точности прокатываемой полосы.

На рис. 7,а после захвата полосы валками клетки №

9 в клетки № 8 стана 2500 падение момента в течение $\sim 0,3$ с, т.е. на длине полосы $\sim 2,1$ м, составило 23 %. В клетки № 9 при входе полосы в клеть № 10 падение момента составило 27 %. Естественно полагать, что это отражается на толщине полосы. Во время измерений отмечены периоды появления и даже развития незатухающих колебаний момента сил упругости в смежных клетях (рис. 7,б), что может отражаться на процессах регулирования. На рис. 7 амплитуда колебаний момента в клетки № 8 достигает 37 % от среднего значения. Колебания момента в смежных клетях чистовой группы, как и в черновой синфазны, что указывает на одновременность процессов в очаге деформации этих клетей.

Выход хвостового участка полосы из группы клетей может оказаться существенным возмущением. На рис. 8 имело место большое натяжение между клетями №№ 10, 11 и 12. Это привело к снижению момента в клетки № 11 в два раза, что не могло не отразиться на разнотолщинности полосы на длине, равной межклетевому расстоянию (6 м).

Взаимодействие клетей проявляется также во время заправки полосой непрерывных станов холодной прокатки (рис. 9,а), сортовых и проволочных станов (рис. 10, [11]).

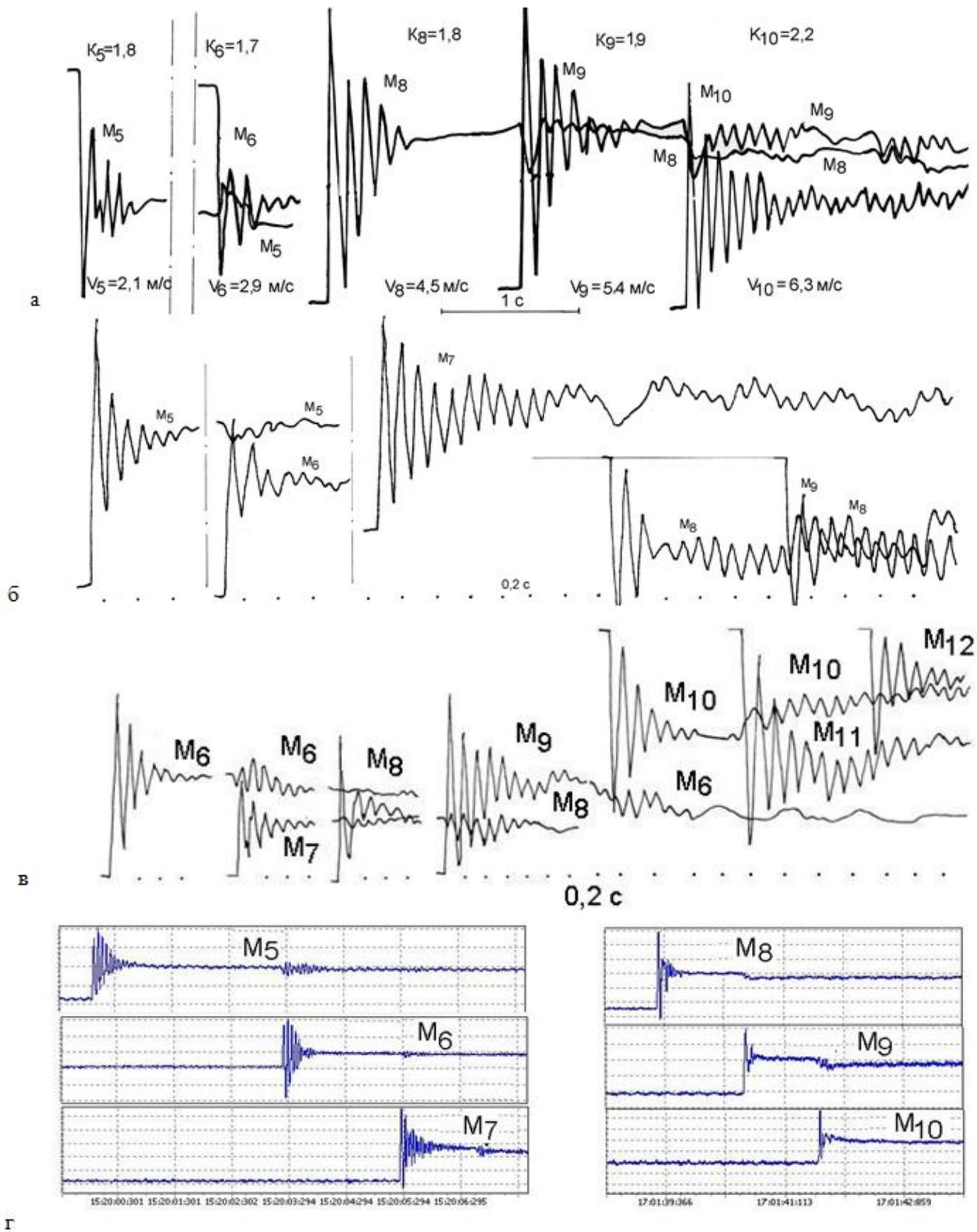


Рис.7. Взаимодействие главных линий чистовых клетей в процессе заполнения группы полосой: стан 2500 ММК (толстая 8x2040 мм (а) и тонкая 2,5x1250 мм (б) полоса); в – стан 1700 КарМК; г – стан 1680

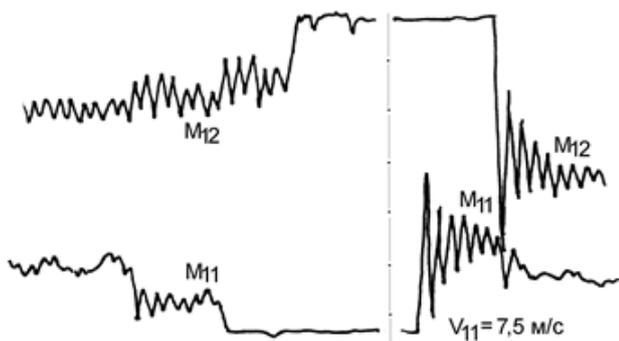


Рис. 8. Момент в процессе выхода (а) и захвата (б) полосы чистовыми клетями № 11 и № 12. Стан 1700 КарМК

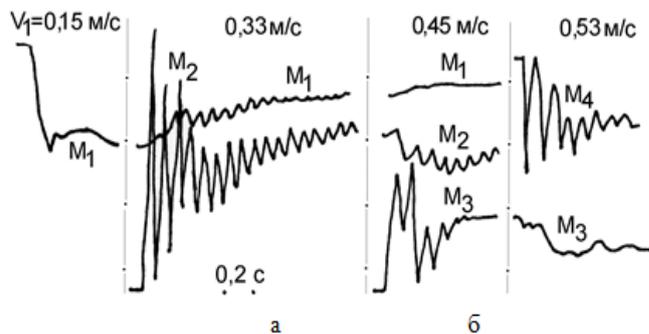


Рис. 9. Моменты в процессе заполнения полосы клетей №№ 1–4 пятиклетевого стана 1700 КарМК холодной прокатки

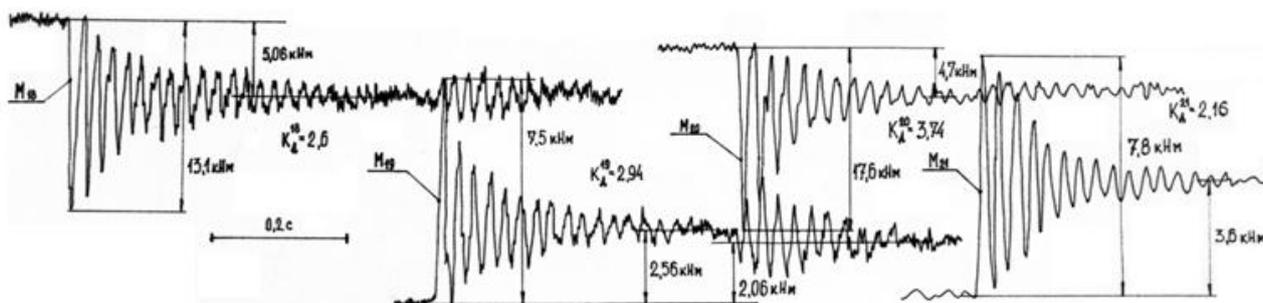


Рис. 10. Моменты на валах приводов в процессе заполнения полосой группы клетей №№ 18–21 стана 150 Белорезцкого меткомбината [11]

Таким образом, результаты натурных измерений на непрерывных станах разного типа позволяют сделать вывод о существенном динамическом и технологическом взаимодействии клетей через прокатываемую полосу в переходных режимах работы. При этом взаимодействие отражает не только момент сил упругости, но и вибрация корпусного оборудования (рис. 11), что может быть использовано в диагностических целях.

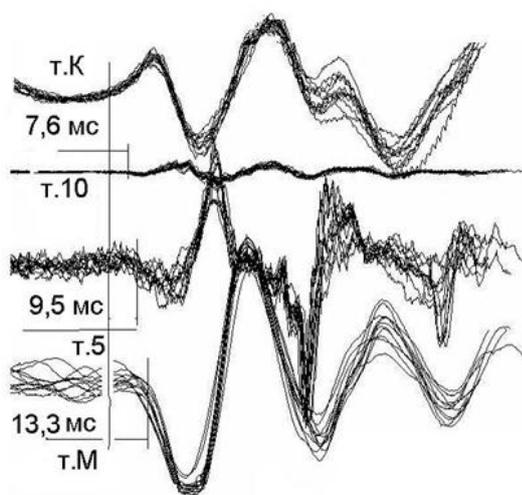


Рис. 11. Реакция линии привода клетки дуо на захват слэбов валками клетки № 1 в режиме непрерывной прокатки: М – момент между редукторами и вибрация рабочей клетки (т.К), шестеренной клетки (т.10) и первого редуктора (выполнено наложение 11 записей переходных процессов). Стан 1680

Познание особенностей переходных процессов по моменту сил упругости, частоте вращения ротора, силе тока якоря и моменту двигателя, вибрации оборудования позволило разработать математические модели динамического и технологического взаимодействия непрерывных групп различных типов станов, в частности шестиклетевой чистой группы широкополосного стана горячей прокатки [7,8].

Нами впервые выполнено моделирование непрерывной прокатки в абсолютных величинах переменных в шестиклетевой группе, что позволило установить характер изменения ряда важных параметров. К ним относятся межклетевые натяжения, толщина полосы после каждой клетки, опережение, нейтральный угол, скорость входа и выхода полосы из валков, момент сил упругости в линиях привода и др. Указанные величины на широкополосных станах не измеряются. Поэтому закономерности, полученные на модели, позволили лучше познать процесс непрерывной прокатки в переходных режимах.

Например, в отличие от известных работ на тему транспортного переноса (запаздывания) на рис. 12 хорошо видно, что перенос отклонения толщины полосы от клетки к клетке сопровождается изменением межклетевых натяжений и кратковременными колебаниями толщины полосы на выходе из клетей. Саморегулирование процесса происходит через 5 с после входа возмущения в последнюю клеть.

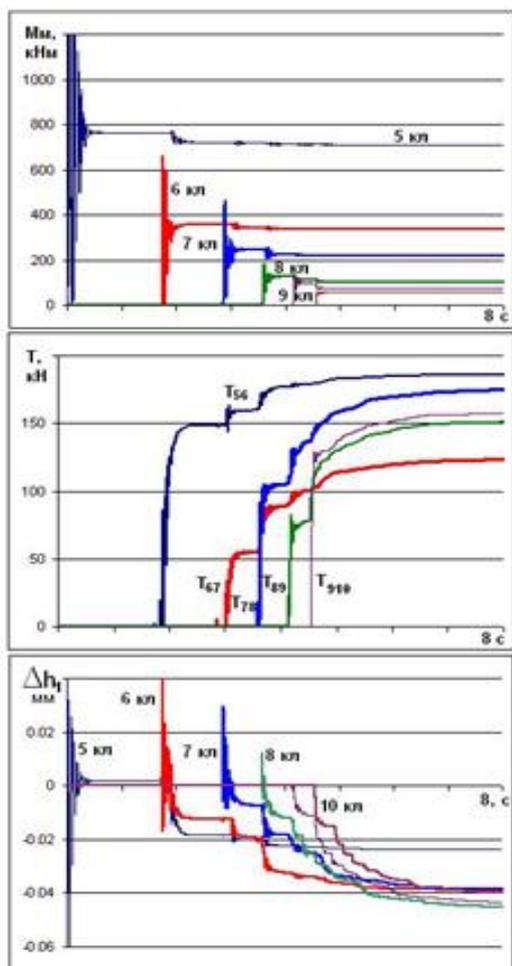


Рис. 12. Переходные процессы по моментам M , напряжениям T и отклонению Δh толщины полосы после клеток при заполнении полосой шестиклетевой группы стана 1680

В процессе заполнения непрерывной группы клеток полосой существенно проявляются крутильные колебания в линиях привода, влияние колебаний клетки на отклонение толщины полосы и перенос последней от клетки к клетке. Впервые раскрыт характер формирования межклетевых натяжений и их взаимосвязь с толщиной полосы. На готовой полосе (после клетки № 10) прослеживаются отпечатки следов от взаимодействия клеток. Результаты моделирования согласуются с известной закономерностью изменения толщины: на переднем и заднем участках даже без задания возмущений полоса толще по сравнению с серединой.

Путем моделирования установлено влияние отклонений технологических параметров – толщины, ширины, температуры подката, рассогласования скорости клеток, а также зазоров, упруго-массовых параметров главных линий и жесткости клеток на переходные процессы, натяжение и толщину полосы. Согласно рис. 13 уменьшение и увеличение входной толщины полосы по-разному отражается на формировании натяжений и толщины. В частности, при увеличении толщины в двух-трех промежутках происходит накопление полосы (петлеобразование). Эти знания позволяют предпринять определенные меры с целью недопущения на стане подобного явления.

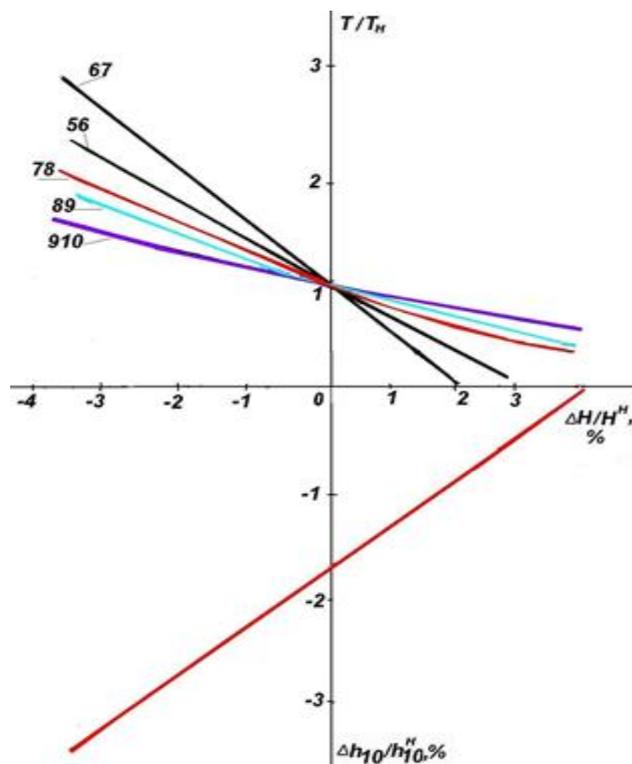


Рис. 13. Зависимость межклетевых натяжений $\bar{T} = T/T_n$ и отклонения Δh_{10} толщины полосы после клетки № 10 от отклонения толщины подката в режиме заполнения стана 1680

Установлены "наихудшие" сочетания возмущений по толщине и температуре. При поступлении охлажденной и с меньшей толщиной полосы межклетевые натяжения существенно возрастают. Если полоса имеет большую температуру и толщину, в первых двух-трех промежутках не формируются натяжения, происходит нежелательное накопление полосы.

Рассмотрим, в чем состоит полезность полученных результатов и их информативность.

Знание частот колебаний момента сил упругости, времени их затухания и коэффициента динамичности, проявляющихся во время захвата полосы валками, дает возможность полнее идентифицировать разной сложности математические модели переходных процессов. В свою очередь модели позволяют исследовать влияние технологических и конструктивных параметров и возмущений на максимальные динамические нагрузки в оборудовании и полосе; получить количественные зависимости, необходимые для их использования во время работы стана; оценить гипотетические варианты изменения технологии и оборудования, которые затруднительно воспроизвести на реальном стане, как, например, отключение двигателя во время прокатки.

Обнаруженные закономерности и особенности параметров переходных процессов могут быть использованы для оценки стабильности технологии и состояния оборудования.

Компьютерная модель взаимодействия клеток через прокатываемую полосу позволяет оптимизировать деформационно-скоростные и температурные режимы непрерывной прокатки по критерию рациональных меж-

клетевых натяжений и наименьшей разнотолщинности полосы; определить рациональные режимы при освоении новых технологий и марочного состава сталей.

Модель может быть использована в учебно-тренировочном процессе для познания собственно процесса непрерывной прокатки одновременно в нескольких клетях в установившемся и переходном режимах. Модель следует рассматривать как диагностический инструмент для установления связи параметров технического состояния (зазоры в сочленениях линий привода, биения валков, поломка зубьев в зацеплениях), технологии (отклонение толщины, температуры полосы, скорости и др.) с максимальной нагрузкой в линиях привода и полосе, с частотой и амплитудой колебаний вибрации, с особенностью протекания измеряемых переходных процессов и разнотолщинностью готовой полосы.

Выводы

На основании опытно-промышленных измерений, прежде всего момента сил упругости, в линиях привода клетей ряда широкополосных станов и математического моделирования переходных процессов при непрерывной прокатке получены следующие результаты.

1. Во время захвата толстой полосы валками второй клетки в линии привода первой клетки может формироваться максимальная динамическая нагрузка, соизмеримая с нагрузкой при захвате полосы в этой клетке. Момент сил упругости и изменение его среднего значения является чувствительным параметром, позволяющим оценивать степень взаимодействия клетей через полосу – натяжение или подпор.
2. В линиях привода смежных клетей возникают колебания момента с собственной частотой. При этом на частоту колебаний и меру их затухания не влияет масса полосы и переход от системы линия привода первой клетки с массой полосы к тандему двух клетей, соединенных упругой полосой.
3. Динамическое взаимодействие через полосу пар черновых клетей стана 1680 в общем случае оставляет ряд "следов" (отпечатков) на подкате в виде поперечных полос, имеющих отклонение толщины. При поступлении в чистовую группу они воспринимаются в качестве возмущения.
4. При заполнении полосой чистовой группы амплитуда колебаний момента при взаимодействии клетей через полосу может составлять 15...25 %, а среднее значение момента в предыдущей клетке уменьшаться на 10...15 %.
5. В результате компьютерного моделирования процесса заполнения (заправки) полосой чистовой группы установлены:
 - динамика и особенности формирования межклетевых натяжений по мере прохождения полосой клетей;
 - роль транспортного переноса толщины (запаздывания) от клетки к клетке;
 - влияние отклонений толщины и температуры подката на натяжение и толщину готовой полосы и их "наихудшие" сочетания.
6. Результаты моделирования согласуются с известной закономерностью изменения толщины готовой полосы:

на переднем и заднем участках толщина больше, чем в середине.

7. Технологическое и динамическое взаимодействие клетей через полосу в переходных режимах непрерывной прокатки в станах различного типа обладает определенной общностью, что позволяет их исследовать на основе одной математической модели в абсолютных значениях переменных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сацкий, В.А.** Энергосберегающая технология горячей прокатки полосы на стане 1680 / Сацкий В.А., Тилик В.Г., Штехно А.М., Мовшович В.С., Путноки А.Ю. // Сталь. - 1998. - № 10. - С. 36-40.
2. **Сацкий, В.А.** Прогрессивная энергосберегающая технология горячей прокатки полосы на станах 1150 и 1680 / Сацкий В.А., Тилик В.Г., Штехно О.Н., Путноки А.Ю., Мовшович В.С. // Сталь. – 2001. – № 6. – С. 67–69.
3. **Тилик, В.Г.** Внедрение технологии производства горячекатаных полос по схеме "слиток–сляб–рулон" при прямой транзитной прокатке / Тилик В.Г., Штехно А.М., Путноки А.Ю. и др. // Труды Четвертого конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация. 2002. – С. 77–80.
4. **Полухин, В.П.** Математическое моделирование и расчет на ЭВМ прокатных станов. / В.П. Полухин – М.: Металлургия. – 1972. – 512 с.
5. **Автоматизированные широкополосные станы, управляемые ЭВМ** / Беньковский м.А., Ананьевский М.Г., Коновалов Ю.В., Тишков Н.И. - М.: Металлургия, 1984. – 240 с.
6. **Прокатка металла со сварными соединениями** / В.Л. Мазур, В.И. Мелешко, Д.П. Галкин [и др.] – М.: Металлургия. – 1985. – 112 с.
7. **Путноки, А.Ю.** Модель динамического взаимодействия смежных черновых клетей широкополосного стана при непрерывной прокатке / А.Ю. Путноки, В.В. Вернев //Металл и литье Украины. 2002.- № 11.- С. 26–30.
8. **Путноки, А.Ю.** Математическая модель динамики прокатки при заполнении полосой чистовой группы клетей широкополосного стана/ А.Ю. Путноки // Обработка материалов давлением. Краматорск. ДГМА. – 2015. – № 2(41). – С. 91–95.
9. **Путноки, А.Ю.** Моделирование взаимодействия черновых клетей стана 1680 через прокатываемую полосу / А.Ю. Путноки, В.В. Вернев, Н.И. Подобедов, О.М. Клевцов // Защита металлургических машин от поломок. ПГТУ. Мариуполь. – 2003. – № 7. – С. 17–21.
10. **Чигиринский, В.В.** Отпечатки на полосе от взаимодействия черновых клетей при непрерывной прокатке / В.В. Чигиринский, А.Ю. Путноки // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2015. – № 1. – С. 56–58.
11. **Большаков, В.И.** Исследования нагруженности оборудования при освоении, эксплуатации и развитии проволочного стана / В.И. Большаков, А.М. Юнаков, Е.А. Евтеев // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – ИЧМ. Днепропетровск. – № 19. – 2009. – С.325–344.

УДК 629.113

МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ МЕТОД ЗАРЯДКИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

Деменков Н.П.¹, У Сяоган^{1,2}, Ху Чень²

¹Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана, Москва, Россия

²Харбинский университет техники и технологий, Харбин, Китай

MULTI-STAGE METHOD OF CHARGING A LITHIUM-ION BATTERY

Demenkov N. P.¹, Wu Xiaogang^{1,2}, Hu Chen²

¹Bauman Moscow State Technical University Computer Science and Control Systems,
Moscow 105005, Russia

²Electrical and Electronic Engineering College, Harbin University of Science and Technology,
Harbin 150080, China

¹dnp@bmstu.ru

²xgwu@hrbust.edu.cn

Аннотация. Литий-ионный аккумулятор при зарядке методом постоянный ток - постоянное напряжение (CC-CV) при низкой температуре имеет проблему снижения производительности. Чтобы решить проблему процесса заряда при низкой температуре, на основе анализа элвивалентной RC модели батареи первого порядка предложен многоступенчатый метод заряда постоянным током. Данные заряда двухступенчатым методом постоянного тока-постоянного тока (CC-CC) были получены при 25 °, 0 °C и -10 °C и сравнены с данными заряда CC-CV. Результаты сравнения показали, что при всех выбранных температурах, зарядная емкость многоступенчатого метода заряда является более постоянной по сравнению с существующими методами и может достигать 89,4% при -10 °C, а период заряда при многоступенчатом методе заряда постоянным током с той же мощностью заряда меньше.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор; заряд батареи; плата способ; низкая температура.

Abstract. The Lithium-ion battery charging with CC-CV (constant current and constant voltage) at low temperature has the problem of capacity decrease. To solve this problem, the charge progress at low temperature was analyzed by the first order RC equal battery model and the multi-stage constant current charge method was proposed. The charge data was obtained at 25 °C, 0°C and -10°C and compared with the charge data of CC-CV and two-stage CC-CC methods. The comparison result shows that, at all the temperature spots, the charge capacity of multi-stage constant current charge method is the most and can still reach 89.4% at -10°C, the charge period with same charge capacity of multi-stage constant current charge method is the least.

Keywords: lithium-ion battery; battery charge; payment method; low temperature.

1. Актуальность и постановка задачи исследований

Создание экологически чистых электрических транспортных средств, благодаря своей высокой энергоэффективности и диверсификации источников энергии и т.д., стало одной из главных задач автомобильной промышленности [1]. Литий-ионные аккумуляторы из-за высокой плотности мощности, долгих лет жизни, безопасности цикла и т.д. широко применяются для электрических транспортных средств [2]. Тем не менее, используя современные технологии заряда батареи, по-прежнему трудно решить задачу создания надежных электрических транспортных средств, так как при более низких температурных условиях, энергоемкость литий-ионных батарей уменьшается и зарядка аккумулятора требует решения сложных проблем [3]. Увеличение внутреннего сопротивления батареи при низких темпера-

турах, снижение внутренней химической активности аккумулятора, приводит к тому, что энергоемкость и выход энергии уменьшаются [4]. По сравнению с процессом разряда процесс заряда аккумулятора при низкой температуре является более трудным [5]. В [6] были проанализированы процессы для литий-ионных аккумуляторов в условиях низких температур. Отмечено, что поляризационное сопротивление генерируется путем диффузии и составляет преобладающую часть сопротивления батареи, что приводит к быстрому достижению верхнего предела напряжения отсечки и прекращению процесса зарядки, т.е. к значительному снижению мощности во время зарядки.

При использовании на электрических транспортных средствах литий-ионных батарей с традиционным методом зарядки постоянный ток - постоянное напряжение было трудно встретить спрос на быструю поставку энергии. В [7] были получены предельные кривые зависи-

мости тока в процессе зарядки литий-ионных батарей от температуры и напряжения поляризации, в соответствии с которыми обеспечивается оптимальный зарядный ток.

Результаты показывают, что этот метод зарядки сокращает время зарядки, однако увеличивает расход электроэнергии. В [8] предложили метод зарядки с переменным импульсом напряжения в цикле, который можно обнаружить и динамически отслеживать во время импульсов. По сравнению с традиционным методом постоянный ток - постоянное напряжение скорость заряда увеличилась на 14%, эффективность зарядки также увеличилась на 3,4%. По сравнению с традиционным фиксированным импульсом в цикле, скорость зарядки выросла на 5%, эффективность зарядки повысилась на 1,5%. В [9] создана модель оценки состояния заряда (SOC) батареи, исходя из стоимости. Состояние процесса зарядки батареи контролируется, чтобы обеспечить условие, при котором аккумулятор полностью заряжен. Применение в [10] метода колонии муравьев к политике зарядки позволяет учитывать текущий процесс зарядки, что обеспечивает оптимальный путь отбора тока, улучшает эффект зарядки аккумулятора. В [11] предложен двухступенчатый метод зарядки постоянный ток - постоянное напряжение, при котором первая фаза предполагает заряд постоянным током с максимальной скоростью заряда до напряжения отсечки, во втором этапе заряда после достижения напряжения отсечки предлагается провести зарядку постоянным напряжением, чтобы завершить процесс заряда. В [12, 13] установлено, что температура батареи во время разряда превышает температуру во время заряда. Был добавлен цикл зарядки и разрядки в предыдущем процессе низкого заряда и разряда для повышения температуры батареи во время зарядки и потери при разряде дополнительной электроэнергии после прогрева до рутинной зарядки аккумулятора батареи, повышение температуры батареи при увеличении мощности.

Метод зарядки в [7-11] улучшает эффект зарядки аккумулятора в разной степени, исключая зарядку аккумулятора при низких температурах. В [12,13] хотя и улучшился подогрев при заряде батареи электроэнергией, однако подогрев самой батареи занимает много времени и не распространяется на самые нижние слои аккумулятора.

В статье проведен анализ, основанный на экспериментальных данных характеристик литий-ионных батарей, полученных при низкой температуре зарядки в различных температурных условиях зарядки. Проанализирована RC модель первого порядка эквивалентной схемы батареи для зарядки литий-ионного аккумулятора многоступенчатым постоянным током зарядки.

Было проанализировано влияние этого метода зарядки при температурах 25°C, 0°C и -10°C, а также эффект от применения многоступенчатой системы зарядки постоянным током путем сравнения полученных преимуществ в сравнении с другими методами зарядки.

2. Анализ характеристик зарядки литий-железо-фосфатного аккумулятора

Литий-железо-фосфатный аккумулятор (LiFePO₄, LFP) - тип электрического аккумулятора, являющийся

видом литий-ионного аккумулятора, в котором используется LiFePO₄ в качестве катода. и который активно применяется в электромобилях.

Литий-железо-фосфатный аккумулятор обеспечивает более длительный срок службы, чем другие литий-ионные аккумуляторы. В отличие от других литий-ионных, LiFePO₄ аккумуляторы, как и никелевые, имеют очень стабильное напряжение разряда. Напряжение на выходе остается близким к 3,2В во время разряда, пока заряд аккумулятора не будет исчерпан полностью. Это может значительно упростить или даже устранить необходимость регулирования напряжения в цепях.

В связи с постоянным напряжением 3,2В на выходе, четыре аккумулятора могут быть соединены последовательно для получения номинального напряжения на выходе в 12,8В, что приближается к номинальному напряжению свинцово-кислотных аккумуляторов с шестью ячейками. Это делает их хорошей потенциальной заменой для свинцово-кислотных аккумуляторных батарей во многих отраслях, таких как автомобилестроение и солнечная энергетика.

Использование фосфатов позволяет избежать затрат кобальта и экологических проблем, в частности, при попадании кобальта в окружающую среду при неправильной утилизации.

LiFePO₄ имеет более высокий пиковый ток (а, учитывая стабильность напряжения, - пиковую мощность), чем у LiCoO₂.

Удельная плотность энергии (энергия / объём) нового аккумулятора LFP примерно на 14% ниже, чем у новых литий-ионных аккумуляторов.

LiFePO₄ аккумуляторы имеют более низкую скорость разряда, чем свинцово-кислотные или литий-ионные. Так как скорость разряда определяется в процентах от ёмкости аккумулятора, то более высокая скорость разряда может быть достигнута в более емких аккумуляторах (больше ампер-часов). Однако могут быть использованы LiFePO₄ элементы с высоким током разряда (имеющие более высокую скорость разряда, чем свинцово-кислотные батареи, или LiCoO₂ той же мощности).

Из-за более медленного снижения плотности энергии, спустя некоторое время эксплуатации, LiFePO₄ элементы уже имеют большую плотность энергии, чем LiCoO₂ и литий-ионные.

LiFePO₄ элементы медленнее теряют ёмкость, чем литий-ионные (LiCoO₂ [литий-кобальт оксидные], LiMn₂O₄ [литий-марганцевая шпинель]), или литий-полимерные.

Одним из важных преимуществ по сравнению с другими видами литий-ионных аккумуляторов, является термическая и химическая стабильность, что существенно повышает безопасность батареи.

2.1 Аккумулятор и лабораторное оборудование

В экспериментах было использовано 18650 цилиндрических литий-железо-фосфатных аккумуляторов с номинальной мощностью 1,35Ач (фактическая емкость 1,34Ач), максимальной скоростью зарядки 1С(А/ч) и числом циклов до 1000 раз. Оборудование для проверки аккумуляторов: восьми-канальный программируемый



Рис. 1. Лабораторное оборудование для эксперимента

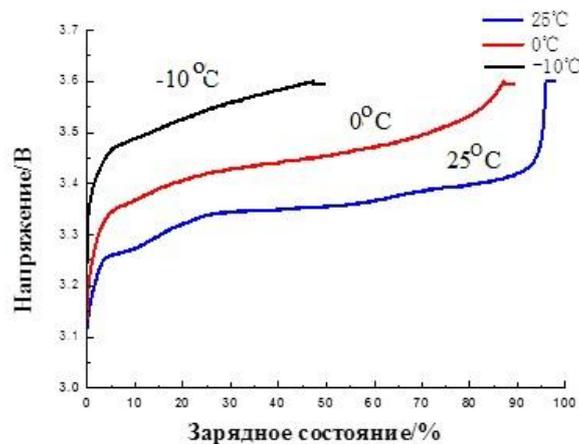


Рис. 2. Кривые напряжения заряда при разных температурах

тестер с максимальным напряжением для испытаний – 5В, током – 20А и точностью тестирования – 0,1%. Источник высокой и низкой температуры для испытаний – камера с температурным диапазоном $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ и точностью измерения температуры – 0,01°C. Оборудование для эксперимента показано на рис.1.

2.2 Эксперимент зарядки постоянным напряжением при различных температурах

Заряд аккумулятора методом заряда постоянный ток-постоянное напряжение выполнялся при температурах: 25°C , 0°C и -10°C . Цикл заряда составлял 0.3с, постоянное напряжение заряда – 3.6В. Результаты заряда аккумулятора, показанные на рис.2 для 25°C , 0°C и -10°C , обеспечили емкость: 1.309(Ач), 1.196(Ач) и 0,664(Ач) соответственно, состояние заряда SOC: 97.68%, 89.25% и 49.55% соответственно.

Как видно из рис.2, при понижении температуры запасенная энергия аккумулятора существенно снизилась: при -10°C может быть заряжена только половина емкости аккумулятора. Также из рис. 2 видно, что при 25°C кривая напряжения зарядки возрастает медленнее, чем при других температурах. При достижении состояния заряда SOC 90% происходит быстрый рост заряда до напряжения отсечки. Как видно при температурах 0°C и -10°C с понижением температуры увеличивается наклон напряжения зарядки, что приводит к снижению состояния

заряда SOC и напряжение отсечки будет достигнуто раньше, следовательно, батарея может быть заряжена не полностью.

2.3 Эквивалентная RC модель батареи

Для анализа зарядки аккумулятора, как показано на рис.3, широко используется эквивалентная RC модель батареи первого порядка [14, 15].

Эта модель отличается тем, что происходит процесс падения напряжения на сопротивлении R_p и параллельно на емкости C_p батареи. Здесь R_r – омическое сопротивление батареи, OCV – напряжение разомкнутой цепи аккумулятора, через U_p и u_r обозначено падение напряжения на конденсаторе и падение тока на сопротивлении R_p соответственно, I – ток зарядки (стрелкой показано направление зарядки), U_o – напряжение заряда.

Модель RC цепи батареи может быть описана следующим образом:

$$C_p \frac{du_p(t)}{dt} + \frac{u_p(t)}{R_p} = i(t) \quad (1)$$

$$u_o(t) = u_{ocv}(t) + i(t)R_r + u_p(t) \quad (2)$$

Считая постоянный ток $i(0) = I$, падение напряжения $u_p(0) = 0$, получим решение дифференциальных уравнений в виде:

$$u_p(t) = IR_p(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

$$u_o(t) = u_{ocv}(t) + IR_r + u_p(t), \quad (4)$$

где $\tau = R_p C_p$.

Как видно из формул (3) и (4), во время процесса зарядки батареи, напряжение U_o определяется, главным образом, значениями сопротивлений R_p , R_r и тока I . Во время зарядки батареи при нормальных температурных условиях значения R_p и R_r относительно небольшие и медленно увеличиваются, напряжение U_o может обеспечивать медленный рост [16]. При низких температурах значение R_p батареи становится больше, процесс поляризации при зарядке усугубляется, сопротивление R_r увеличивается быстрее, в результате чего напряжение заряда достигнет U_o , а состояние заряда батареи SOC не достигнет полного значения энергии. Значения R_p и R_r определяются проектными параметрами и условиями эксплуатации, однако могут быть изменены в соответствии с требованиями зарядки. В [11], как уже упоминалось во введении, процесс зарядки постоянным током разделен на две фазы, после первого этапа заряда напряжение U_o достигает напряжения отсечки, уменьшая ток I . Уменьшение падения напряжения вызвано изменением сопротивлений R_p и R_r , так как уменьшается спад напряжения U_o на втором этапе заряда постоянным током заряда, полученным на основании первого этапа, увеличивая тем самым емкость.

3. Многоступенчатый метод зарядки постоянным током

Предлагается сделать постоянный ток зарядки системы многоступенчатым. В начале зарядки, используя максимальную скорость заряда, чтобы зарядить аккумулятор, достигают напряжения отсечки заряда. Уменьшив скорость заряда на 0,1С, продолжают зарядку до достижения снова напряжения отсечки заряда. Далее продолжают снижать уровень зарядки на 0,1С, и так далее до тех пор, пока скорость заряда батареи 0,1С после достижения напряжения зарядки не станет равной постоянному напряжению. Это и будет окончание всего процесса зарядки.

Чтобы проверить эффект многоступенчатого метода зарядки постоянным током, был проведен эксперимент при 25°C, начальной скорости заряда в 1С и напряжении отсечки зарядки – 3,6В. Кривые тока и напряжения зарядки в функции SOC показаны на рис.4.

Результаты эксперимента при 25°C показали, что при многоступенчатом методе зарядки постоянным током энергоемкость аккумулятора может быть заполнена до 1.335Ач, а состояние заряда аккумулятора SOC достигает 99.62%. Как видно из кривой зарядки, показанной на рис.4, на первом этапе зарядки при скорости 1С аккумулятор заряжается электроэнергией почти до 80%,

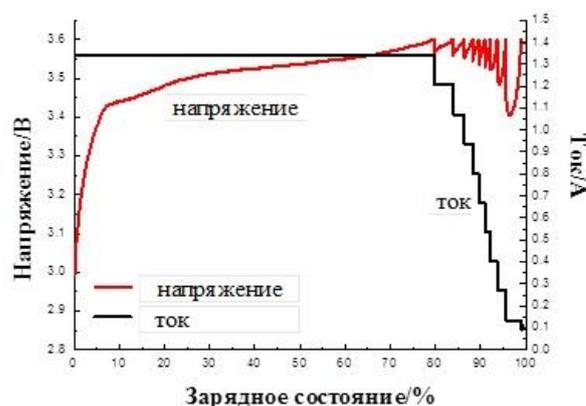


Рис.4. Текущие кривые тока и напряжения заряда многоступенчатым методом постоянного тока при 25 °С

после каждого этапа ток уменьшается из-за спада напряжения U_o , и заряжается оставшаяся часть заряда. Там же приведен кривые при двухступенчатом методе зарядки постоянный ток - постоянное напряжение заряда со скоростью зарядки 1С на первом этапе и 0,5С на втором этапе зарядки. Сравнение различных методов заряда показано в табл. 1.

По результатам сравнения можно видеть, что многоступенчатый метод зарядки аккумулятора постоянным током зарядка является наилучшим. При двухступенчатом методе зарядки постоянный ток - постоянное напряжение емкость заполняется до 92,98%, время зарядки составляет 63 минут. Поэтому при заполнении до такой же емкости при многоступенчатом методе зарядки постоянным током зарядки время зарядки является наименьшим. Преимуществом метода зарядки постоянный ток - постоянное напряжение является то, что заполнение имеет более высокую энергоемкость, чем двухэтапный метод зарядки постоянный ток- постоянное напряжение в связи с тем, что значение скорости зарядки из-за большего времени зарядки было значительно сокращено. Многоступенчатый метод зарядки сочетает в себе преимущества обоих методов, т.е. обеспечивает более высокую плотность зарядки при одновременном сокращении времени зарядки.

4. Анализ многоступенчатого метода зарядки постоянным током при низких температурах

Из приведенного выше анализа видно, что внутреннее сопротивление батареи увеличивается в условиях низких температур, во время зарядки напряжение отсечки батарея будет быстро достигнуто и зарядка аккумулятора постоянным током не может быть выполнена полностью.

Таблица 1

Сравнение различных методов заряда при 25 °С

Температура	Способ зарядки	Емкость аккумулятора, Ач	Время зарядки, мин	Заполнение SOC %
25	Пост.ток-пост.напр.	1.309	220	97.68
	Двухэтапный пост.ток-пост.напр.	1.246	70	92.99
	Многоступенчатый пост.ток	1.335	98	99.63

В многоступенчатом методе заряда постоянным током, когда достигает напряжение отсечки, можно уменьшить ток заряда и, следовательно, метод можно адаптировать к случаю, когда внутреннее сопротивление станет больше.

На рис.5 и рис.6 показаны кривые зарядных тока и напряжения в функции SOC при применении многоступенчатого метода зарядки и при температурах 0°C и -10°C.

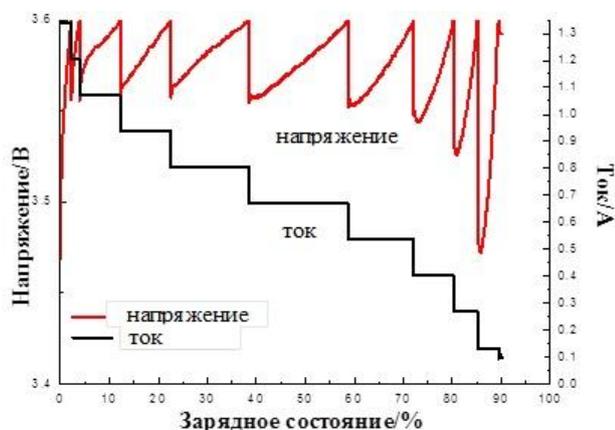


Рис.5. Текущие кривые тока и напряжения заряда многоступенчатым методом при 0°C

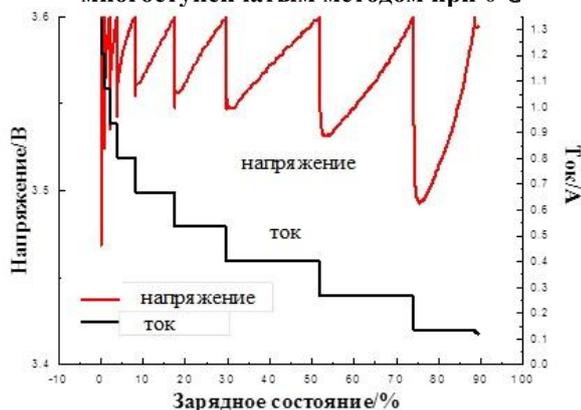


Рис.6. Текущие кривые тока и напряжения заряда многоступенчатым методом при -10 °C

Поскольку при температуре 0°C сопротивление батареи увеличивается по сравнению с сопротивлением при 25 °C, как следует из рис. 5, на начальной стадии при скорости заряда 1C и 0.9C заряда быстрее достигает напряжение отсечки.

При значении скорости заряда в пределах 0.7C-0.3C заполняется почти 80% энергоемкости, а при скорости заряда 0.4C постоянным током заряда обеспечивается максимальная емкость. Когда температура была снижена до -10°C, как показано на рис. 6, при скорости заряда 1C-0.6C напряжение отсечки достигается быстрее. При значении скорости заряда в пределах 0.5C-0.1C заполнение электроэнергией увеличивается почти до 90%, а при значении скорости заряда 0.3C обеспечивается максимальная энергоемкость.

Текущие кривые заряда при 0°C и -10°C показывают, что многоступенчатый метод зарядки может выполняться при различных температурах, в соответствии с предельными напряжениями отсечки регулируя скорость тока заряда и количество этапов. Чтобы сократить время зарядки и для того, чтобы при -10°C заполнить около 90% энергоемкости, более целесообразно менять скорость тока заряда. При понижении температуры за счет увеличения внутреннего сопротивления батареи многоступенчатый метод зарядки постоянным током с большим коэффициентом масштабирования снижает количество этапов зарядки, увеличивает время зарядки, однако в состоянии поддерживать высокую энергоемкость.

Сравнение результатов зарядки методом постоянного тока - постоянного напряжения, двухступенчатым методом постоянного тока - постоянного напряжения и многоступенчатым методом постоянного тока при температурах 0°C и -10°C приведены в табл.2.

5. Заключение

Предложен и промоделирован многоступенчатый метод зарядки литий-ионного аккумулятора. Результаты анализа процесса зарядки литий-железо-фосфатного аккумулятора при различных температурных условиях показали, что при обычной зарядке аккумулятора методом зарядки постоянной ток - постоянное напряжение энергоемкость уменьшается с понижением температуры, например, при -10°C может быть заполнено электричеством только 49.55% от номинальной энергоемкости.

На основе моделирования эквивалентной RC модели батареи первого порядка выяснено, что основное влияние в процессе зарядки оказывает напряжение отсечки.

Таблица 2

Сравнение различных методов заряда на 0°C и -10°C

Температура, °C	Способ зарядки	Емкость аккумулятора. Ач	Время зарядки, мин	Заполнение SOC %
0	Пост.ток-пост.напр.	1.196	183.35	89.25
	Двухэтапный пост.ток-пост.напр.	0.944	85	85
	Многоступенчатый пост.ток	1.207	145.8	90.07
-10	Пост.ток-пост.напр.	0.664	101	49.55
	Двухэтапный пост.ток-пост.напр.	0.132	12	9.85
	Многоступенчатый пост.ток	1.198	245.65	89.4

Предложенный метод многоступенчатой зарядки постоянным током при 25°C, 0°C и -10°C и стандартных условиях тестирования обеспечил энергоёмкость в 1.335Ач, 1.207Ач и 1.198Ач соответственно. При -10°C и многоступенчатом методе зарядки постоянным током зарядки потребление электроэнергии увеличилось на 40% по сравнению с методом постоянный ток-постоянное напряжение зарядки, время зарядки того же самого аккумулятора уменьшает 22 мин, двухступенчатый метод зарядки постоянный ток - постоянное напряжение не могут должным образом зарядки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wu X. G., Hu C., Chen J. F.** Energy Flow Chart-Based Energy efficiency analysis of a Range-extended electric bus [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, vol.2014, Article number 972139, 2014. Ansean D, Gonzalez M, Garcia V M, Viera J C, Anton J C, Blanco C. Evaluation of LiFePO₄ batteries for electric vehicle applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015 (2): pp.1855-1863.
2. **Fan J., Tan S.** Studies on Charging Lithium-ion cells at low temperatures[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2006 (6): pp.A1081.
3. **Hyun-Sik S., Jin-Beom J., Baek-Haeng L., Dong-Hyun S., Byoung-Hoon K., Tae-Hoon K., Hoon H.** Experimental study on the effects of pre-heating a battery in a low-temperature environment[C]. *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2012 IEEE. 2012: pp.1198-1201.
4. **Liao L., Zuo P., Ma Y., Chen X., An Y., Gao Y., Yin G.** Effects of temperature on charge/discharge behaviors of LiFePO₄ cathode for Li-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2012: pp.269-273.
5. **Zhang S. S., Xu K., Jow T. R.** Electrochemical impedance study on the low temperature of Li-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2004 (7): pp.1057-1061.
6. **Gao Y., Zhang C., Liu Q., Jiang Y., Ma W., Mu Y.** An optimal charging strategy of lithium-ion batteries based on polarization and temperature rise[C]. *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (Itec) Asia-Pacific*, Aug.31-Sep.3, Beijing, China, 2014.
7. **Chen L. R.** Design of Duty-Variied Voltage pulse charger for improving Li-ion battery-charging response[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009 (2): pp.480-487.
8. **Huang S. J., Huang B. G., Pai F. S.** Fast charge strategy based on the characterization and evaluation of LiFePO₄ Batteries[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013 (4): pp.1555-1562.
9. **Liu Y. H., Teng J. H., Lin Y. C.** Search for an optimal rapid charging pattern for lithium-ion batteries using Ant Colony System algorithm[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005 (5): pp.1328-1336.
10. **Anseán D., González M., Viera J. C., García V. M., Blanco C., Valledor M.** Fast charging technique for high power lithium iron phosphate batteries: A cycle life analysis[J]. *Journal of Power Sources*, 2013: pp.9-15.
11. **Ruan H. J., Jiang J. C., Sun B. X., Wu N. N., Shi W., Zhang Y. R.** Stepwise segmented charging technique for Lithium-ion battery to induce thermal management by low-temperature internal heating[C]. *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (Itec) Asia-Pacific*, Aug.31-Sep.3, Beijing, China, 2014.
12. **Zhao X. W., Zhang G. Y., Yang L., Qiang J. X., Chen Z. Q.** A new charging mode of Li-ion batteries with LiFePO₄/C composites under low temperature[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011 (2): pp.561-567.
13. **Kim J., Lee S., Cho B. H.** Complementary Cooperation algorithm based on DEKF combined with pattern recognition for SOC/capacity estimation and SOH prediction[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012 (1): pp.436-451.
14. **Kim J., Shin J., Chun C., Cho B. H.** Stable configuration of a Li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012 (1): pp.411-424.
15. **Roscher M. A., Vetter J., Sauer D. U.** Characterisation of charge and discharge behaviour of lithium ion batteries with olivine based cathode active material[J]. *Journal of Power Sources*, 2009 (2): pp. 582-590.

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА В КВАДРАТИЧНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЫРДАРЬИНСКОЙ ТЭС

А.Т. Хабибулина

Ташкентский государственный технический университет им. А.Р. Беруни,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

THE USE OF THE LYAPUNOV FUNCTION IN A QUADRATIC FORM FOR THE ANALYSIS OF STATIC STABILITY SYRDARYA TPS

A.T. Xabibulina

Tashkent state technical University named after A. R. Beruni,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

tox-05@yandex.ru

Аннотация. В статье приведен один из матричных методов анализа статической устойчивости электрических систем – функция Ляпунова в квадратичной форме, позволяющая сделать выводы о пределе работы синхронных генераторов по условиям устойчивости. Проведено исследование статической устойчивости Сырдарьинской ТЭС при различных настроечных параметрах системы автоматического регулирования возбуждения.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, функция Ляпунова в квадратичной форме, статическая устойчивость, автоматический регулятор возбуждения.

Abstract. The article presents one of the matrix methods of analysis of static stability of electric systems – a Lyapunov function in a quadratic form allowing to draw conclusions about the limit of operation of synchronous generators for stability conditions. A study of static stability of the Syrdarya thermal power plant under various tuning parameters of the system of automatic control of excitation.

Keywords: electric power system, Lyapunov function in quadratic form, static stability, automatic excitation regulator.

Введение

Одной из основных задач теории управления является изучение динамических процессов, происходящих в автоматических системах, каковыми являются электроэнергетических систем (ЭЭС). Системы управления при нормальной эксплуатации должны поддерживать вполне определенные режимы работы объектов энергетики вне зависимости от действующих на них возмущающих воздействий [1].

Устойчивость ЭЭС при малых возмущениях означает, что малые изменения параметров режима или какого-нибудь возмущения начальных условий не приведут к значительным отклонениям режимных параметров [2,3].

Методы исследования статической устойчивости с учетом самораскачивания сложны, поэтому достаточно надежные результаты могут быть получены при строгом математическом описании системы регулирования управляемых объектов, с использованием их достоверных параметров и характеристик [4-6].

томатического регулирования ЭЭС описываются дифференциальными уравнениями, то анализ устойчивости сводится к исследованию свойств решения линеаризованных уравнений при малых возмущениях [1, 3]. В классическом случае уравнения, описывающие процессы в ЭЭС являются однородными линейными (линеаризованными) дифференциальными уравнениями и имеют вид [6-8]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n; \\ &\dots; \\ \frac{dx_n}{dt} &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n; \end{aligned} \quad (1)$$

или в матричной форме

$$\dot{x} = Ax, \quad (2)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Основные проблемы и решения

Поскольку все процессы в элементах системы ав-

и $x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ транспонированный вектор переменных состояния.

Для определения устойчивости используем метод Ляпунова и зададимся функцией в виде положительно определенной квадратичной формы:

$$V(x) = x^T Q x. \quad (4)$$

Производная этой функции:

$$dV(x)/dt = d(x^T Q x)/dt \quad (5)$$

приводит к уравнению:

$$A^T Q + Q A = -C \quad (6)$$

Уравнение (6), называемое матричным уравнением Ляпунова, обеспечивает условие: если одновременно выполняются неравенства $v > 0$ и $V < 0$ в некоторой области пространства переменных (x_1, x_2, \dots, x_n) , включающей начало координат, то положение равновесия в начале координат асимптотически устойчиво [1, 3].

Отметим, что обе матрицы Q и C являются симметричными. Действительно, если матрица Q симметрична, т. е. $Q^T = Q$, то

$$C^T = -(A^T Q + Q A)^T = -Q^T A - A^T Q = -(A^T Q + Q A) = C \quad (7)$$

и, следовательно, матрица C симметрична. Справедливо и обратное. В теореме фигурирует произвольная положительно определенная матрица C , в качестве которой выбирают обычно единичную матрицу.

Теорема Ляпунова сводит проверку устойчивости исследуемой системы к решению линейного матричного уравнения [4]. Поскольку матрица Q – симметрическая, то уравнение Ляпунова эквивалентно системе $n(n+1)/2$ линейных алгебраических уравнений. При большой размерности матрицы A решение такой системы оказывается менее трудоемким, чем вычисление характеристического многочлена матрицы A [5].

Согласно теореме Сильвестра [3], необходимым и достаточным условием устойчивости исследуемой системы при малых возмущениях является положительность главных диагональных миноров матрицы Q :

$$Q = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{vmatrix} > 0,$$

$$\text{т. е., } \Delta_{11} = q_{11} > 0, \Delta_{12} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{vmatrix} > 0,$$

$$\Delta_{13} = \begin{vmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{vmatrix} > 0.$$

Рассмотрим составление уравнений в отклонениях переменных состояния регулируемой системы ЭЭС. Предположим, что матрица A устойчива, а матрица C положительно определена.

Линеаризованные уравнения простейшей ЭЭС при наличии на синхронном генераторе автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) пропорционального или сильного действия имеют вид [1, 6]:

– уравнение относительного движения ротора синхронной машины:

$$T_j (d^2 \Delta \delta / dt^2) = -P_d (d \Delta \delta / dt) - \Delta P;$$

– уравнение переходных процессов в обмотке возбуждения:

$$T_{d0} (d \Delta E'_q / dt) = \Delta E_{qe} - \Delta E_q;$$

– уравнение в обмотке возбуждения возбудителя:

$$T_e (d \Delta E_{qe} / dt) = k_e \Delta e - \Delta E_{qe};$$

– уравнение усилительного элемента:

$$T_y (\Delta e / dt) = k_y \Delta u - \Delta e;$$

– уравнение измерительного элемента:

$$T_{II} (d \Delta u / dt) = k_{II} \Delta u_r - \Delta u;$$

– уравнение, отражающее влияние АРВ:

$$\Delta e = \sum_j (k_{0Пj} \Delta П + k_{1Пj} (d \Delta П_j / dt) + k_{2Пj} (d^2 \Delta П_j / dt^2));$$

здесь $T_j, T_{d0}, T_e, T_y, T_{II}$ – постоянные инерции агрегата, постоянные времени, соответственно – обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора, возбудителя, усилительного элемента, преобразовательного и измерительного элементов ($T_{II} = T_{II}$); $\Delta \delta, \Delta E'_q, \Delta E_q, \Delta E_{qe}, \Delta e, \Delta u, \Delta u_r$ – отклонения угла нагрузки, переходной э.д.с., э.д.с. холостого хода, э.д.с. на кольцах ротора, напряжения на обкладках возбудителя и напряжения на шинах генератора; $\Delta П_j$ – параметры режима, по которым осуществляется регулирование возбуждения генератора; P_d – демпферный коэффициент; $k_{0Пj}, k_{1Пj}, k_{2Пj}$ – коэффициенты усиления по каналам регулирования АРВ, соответственно – по отклонению, по первой и второй производным параметров режима.

Отклонения регулируемого параметра режима генератора или системы определяются по соотношению:

$$\Delta П_j = (d П_j / \Delta \delta) \Delta \delta + (\Delta П_j / d E_q) \Delta E_q. \quad (8)$$

Аналитические выражения (8) производных параметров режима определяются на основе характеристик, извлекаемых из векторной диаграммы синхронной машины [1].

Пример

В работе [9] была проанализирована статическая устойчивость простейшей электрической системы применением функции Ляпунова в квадратичной форме с учётом влияния различных автоматических регуляторов возбуждения синхронного генератора на статическую устойчивость. В данной статье будем рассматривать пример с конкретной электрической станцией, а именно Сырдарьинской ТЭС. На синхронных генераторах рассматриваемой станции установлена система АРВ-СДП1, реагирующая на отклонения и первую производную угла ($\Delta \delta$) и напряжения генератора (Δu_r). В качестве сравнения проведем анализ статической устойчивости при различных настроечных параметрах системы АРВ-СДП1. Будем учитывать постоянные времени измерительного и усилительного элементов при условии $T_{II} = T_y$. Тогда матрица коэффициентов (3) принимает вид:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & 0 & a_{63} & 0 & 0 & a_{66} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где $a_{12} = 1$; $a_{21} = -c_1/T_j$; $a_{22} = -P_d/T_j$; $a_{23} = -b_1/T_j$; $a_{32} = -(U(x_d - x'_d)/x'_d) \sin(\delta)$; $a_{33} = -1/T_{d0} (d E'_q / d E_q)$;

$a_{34} = 1/T_{d0}(dE'_q/dE_q)$; $a_{44} = -1/T_e$; $a_{51} = (k_{0\delta} + k_{0U}(dU_r/d\delta))/T_y$; $a_{52} = (k_{1\delta} + k_{0U}(dU_r/d\delta))/T_y$; $a_{53} = k_{0U}(dU_r/dE_q)$; $a_{55} = -1/T_y$; $a_{61} = -(dU_r/d\delta)/T_H$; $a_{63} = -(dU_r/dE_q)/T_H$; $a_{66} = -1/T_H$; $c_1 = (E_q U/x_{d\Sigma})\cos(\delta)$; $dE'_q/dE_q = x'_{d\Sigma}/x_{d\Sigma}$; $dU_r/d\delta = U_r(\sin(\delta_r)\cos(\delta) - \cos(\delta_r)\sin(\delta))$; $dU_r/dE_q = (x_c/x_{d\Sigma})\cos(\delta_r)$.

Элементы матрицы А (9) определяются из следующих соотношений:

$$c_1 = \frac{dP_{Eq}}{d\delta} = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}} \cos\delta, \quad b_1 = \frac{dP_{Eq}}{dE_q} = \frac{U_c}{x_{d\Sigma}} \sin\delta,$$

$$\Delta E'_q = \frac{dE'_q}{d\delta} \Delta\delta + \frac{dE'_q}{dE_q} \Delta E_q, \quad \Delta U_\Gamma = \frac{dU_\Gamma}{d\delta} \Delta\delta + \frac{dU_\Gamma}{dE_q} \Delta E_q,$$

$$\frac{dU_\Gamma}{d\delta} = \frac{U_c x_d}{U_\Gamma x_{d\Sigma}} (U_\Gamma d \cos\delta_\Gamma - U_{\Gamma q} \sin\delta_\Gamma),$$

$$\frac{dU_\Gamma}{dE_q} = \frac{U_\Gamma q}{U_\Gamma x_{d\Sigma}} \frac{x_c}{x_{d\Sigma}}, \quad \cos\delta_\Gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{U_c x_d \sin\delta}{U_\Gamma x_{d\Sigma}}\right)^2},$$

$$\sin\delta_\Gamma = \sqrt{1 - (\cos\delta)^2}, \quad \Delta E'_q = \frac{dE'_q}{d\delta} \Delta\delta + \frac{dE'_q}{dE_q} \Delta E_q,$$

$$U_{\Gamma q} = U_\Gamma \cos\delta_\Gamma, \quad U_{\Gamma d} = U_\Gamma \sin\delta_\Gamma,$$

$$P_{Eq} = \frac{E_q U_c}{x_{d\Sigma}} \sin\delta, \quad P_{Eq}' = \frac{E'_q U_c}{x_{d\Sigma}} \sin\delta - \frac{U_c^2}{2} \frac{(x_d - x'_d)}{x_{d\Sigma} x_c} \sin 2\delta,$$

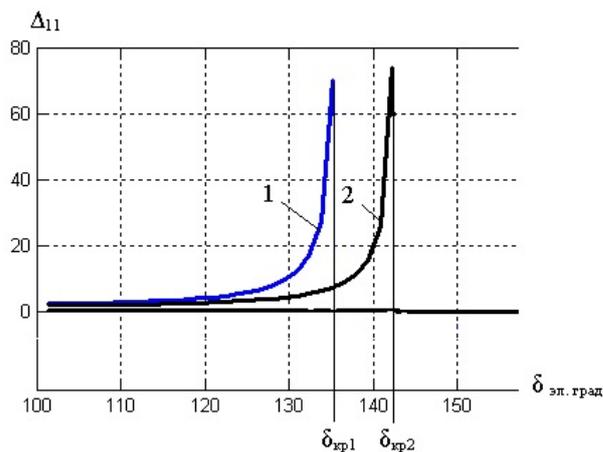
$$P_{U_\Gamma} = \frac{U_\Gamma U_c}{x_c} \sin\delta - \frac{U_c^2}{2} \frac{x_d}{x_{d\Sigma} x_c} \sin 2\delta - \frac{U_\Gamma U_c}{x_c} \sin\delta [1 - \cos\delta_\Gamma],$$

$$E'_q = E_q \frac{x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} + U_c \frac{(x_d - x'_d)}{x_{d\Sigma}} \cos\delta.$$

На рис. 1 приведены изменения главных миноров матрицы Q функции Ляпунова в квадратичной форме при различных настроечных параметрах системы АРВ. Очевидно, что при правильном выборе уставок системы АРВ можно добиться значительного увеличения предела по статической устойчивости. Однако задачи синтеза оптимального регулятора в данной работе не ставились и являются самостоятельным объектом исследования.

Заключение

Замечательные свойства функций Ляпунова в квадратичной форме позволяют однозначно определить станцию или генератор, режим которой приближается к пределу статической устойчивости по мере утяжеления режима. А совместное использование уравнений узловых напряжений и функций Ляпунова в квадратичной форме позволяет свести задачу анализа статической устойчивости сложной ЭЭС к исследованию схемы «генератор-шины», при этом выявляются необходимые и достаточные условия устойчивости всей системы [8].



- 1- при настроечных параметрах системы АРВ $k_{0U}=50$, $k_{0\delta}=10$, $k_{1\delta}=1$;
2- при настроечных параметрах системы АРВ $k_{0U}=100$, $k_{0\delta}=12$, $k_{1\delta}=0.5$

Рис. 1. Изменение главных миноров матрицы функции Ляпунова в квадратичной форме

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веников, В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
2. **Баринов, В.А.** Режимы энергосистем: методы анализа и управления. / В.А. Баринов, С.А. Совалов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.
3. **Anderson, P.M.** Power system control and stability. Second edition. IEEE. / P.M. Anderson, A.A. Fouad. – USA.: Wiley-interscience, 2003. – 664 p.
4. **Барбашин, Е.А.** Функции Ляпунова. / Е.А. Барбашин. – М.: Наука, 1970. – 240 с.
5. **Мисриханов, М.Ш.** Квадратическая проблема собственных значений в электроэнергетических системах / М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко // М. А и Т. – 2006. – №5. – С. 24-47.
6. **Аллаев, К.Р.** Малые колебания электрических систем. Матричный подход / К.Р. Аллаев, А.М. Мисриханов. – Т.: Fanvatehnologiyilar, 2011. – 325 с.
7. **Kalman, R.E.** Control System Analysis and Design Via the «Second Method» of Lyapunov. 1. Continuous-Time Systems. / R.E. Kalman, I.E. Bertram. – Trans. ASMEJ. BasicEngr., 1960. – pp. 371-393.
8. **Аллаев, К.Р.** Упрощенный критерий статической устойчивости электрических систем / К.Р. Аллаев, А.М. Мирзабаев, Т.Ф. Махмудов, Т.А. Махкамов // Электро. – 2015. – №2. – С. 28-33.
9. **Махмудов, Т.Ф.** Матричные способы синтеза оптимальных систем возбуждения синхронных генераторов / Т.Ф. Махмудов // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. – 2012. – №20. – С. 204-212.

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ЧАСТОТ ПЕРЕДАТЧИКА И ПРИЕМНИКА

А.Ю. Сологубов¹, С.М. Андреев²

¹Южно-уральский государственный университет, г. Челябинск, России

²ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

RESEARCH OF THE ASYNCHRONOUS SERIAL DATA TRANSMISSION WITH FREQUENCY DEVIATION OF TRANSMITTER AND RECEIVER

A.Yu. Sologubov¹, S.M. Andreev²

¹South Ural State University (National Research University)

Chelyabinsk, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹andrey.1993@rambler.ru

²andreev.asc@gmail.com

Аннотация. В работе проведено теоретическое исследование асинхронной передачи отдельных слов цифровой информации, представленных в виде кадров сообщения, при возникновении отклонения частот генератора передатчика и приёмника (f_R/f_T). Определен диапазон изменения отношения f_R/f_T при котором информационные кадры передаются без ошибок. В системе MATLAB в пакете Simulink произведено моделирование последовательной асинхронной передачи кадра и его прием при различных значениях f_R/f_T и исследованы процессы последовательной передачи и приёма сигнала по общеизвестным алгоритмам. На построенной модели произведен вычислительный эксперимент, при котором исследовалась возможность безошибочной передачи цифрового слова в зависимости от его содержимого и величины f_R/f_T , а также была определена доля цифровых слов, передаваемая с ошибками для разных значений f_R/f_T . Определено, что при значениях f_R/f_T в диапазоне 0,9545-1,04545 передача информации в кадрах сообщения происходит без ошибок. При большей величине рассогласования частот, встречаются ситуации, когда при неправильно принятых данных приемник не формирует сигнал ошибки кадра. Для определения ошибки требуются более высокие уровни контроля принятых данных.

Ключевые слова: асинхронная последовательная передача данных, моделирование процесса передачи и приёма данных, отклонение частот передатчика и приёмника, расчёт количества правильно переданных байт в прерывистом и непрерывном режимах.

Abstract. The work carried out theoretical research asynchronous transfer of individual words of the digital information presented in the form of a message frame in the event of deviation of the transmitter and the receiver oscillator frequency (f_R/f_T). The range of change-of f_R/f_T relationship in which the data frames is transmitted without errors. The MATLAB system in Simulink modeling package produced by asynchronous serial pe-frame transmission and reception at different values of f_R/f_T and studied the processes sequence-tional transmission and reception on the well-known algorithms for signal. In the constructed model produced a computational experiment, in which the is follow the possibility of error-free transmission of digital words, depending on its contents and value of f_R/f_T , and was determined the share of digital words transmitted with errors for different values of f_R/f_T . It was determined that the values of f_R/f_T in the range of 0.9545-1.04545 transmission of information in the message frame takes place without errors. In larger size of the frequency error, there are situations when the receiver correctly received data frame does not generate an error signal. To determine the error requires a higher level of control of received data.

Keywords: asynchronous serial data transmission, modeling data transmission and reception process, the deviation frequency transmitter and receiver, the correct calculation of the number of bytes transferred in intermittent and continuous modes.

Введение

На сегодняшний день, асинхронный последовательный метод передачи информации является доминирующим в локальных распределенных системах управления объектами, таких мобильные робототехнические системы, манипуляторы, различные мехатронные

устройства. Асинхронная передача используется также в компактных и автономных мехатронных комплексах, где обмен данными происходит время от времени, и не требуется высокая скорость передачи данных (система нагрева воды, некоторые весоизмерительные установки и т.д.).

Метод последовательной асинхронной передачи



Рис. 1. Формат асинхронной последовательной передачи информационного слова

обеспечивает передачу данных на скоростях до 115кбит/с на расстояния до 20-30 метров и до 12 Мбит/с на расстоянии 1-2 метра. Основным достоинством метода является простота реализации, невысокая стоимость, низкое энергопотребление, отсутствие необходимости в специальных линиях связи, миниатюрность. Эти характеристики зачастую являются определяющими при разработке распределенных систем управления локальными и мобильными объектами.

Асинхронная последовательная передача данных означает, что у передатчика и приемника нет общего генератора синхроимпульсов, и что синхронизирующий сигнал не посылается вместе с данными [1]. Приёмник и передатчик имеют свои собственные внутренние генераторы, которые перед началом передачи слова данных должны быть синхронизированы. Передатчик формирует кадр информационного сообщения, который включает в себя биты информационного слова и набор служебных бит. В общем случае формат имеет следующий вид, представленный на рис.1 [2]. К информационным битам передаваемого слова добавляется 3-4 дополнительных бита, из них 1 бит – стартовый, 1 бит – чётности и 1-2 стоповых бита; устанавливаются одинаковые частоты генераторов приемника и передатчика.

Так как приемник и передатчик не имеет общего генератора синхроимпульсов, то в асинхронной последовательной передаче используются набор специальных механизмов для организации такой синхронизации.

Различают поэлементную, групповую и цикловую синхронизацию. В основе данных типов синхронизации лежат установление и поддержание требуемых фазовых соотношений между значащими моментами переданных и принятых элементов сигнала, групп единичных элементов этих сигналов и циклов их временного объединения. Поэлементная синхронизация позволяет на приёме правильно отделить один единичный элемент (кадр) от другого и обеспечить наилучшие условия для его регистрации. Групповая синхронизация обеспечивает правильное разделение принятой последовательности на кодовые комбинации, а цикловая синхронизация – правильное разделение циклов временного объединения на приёме [1].

Таким образом, для того чтобы приемник устанавливал приходящие биты на временные позиции, соответ-

ствующие их отправке из передатчика, он должен "знать" моменты их прихода, т.е. синхронизироваться с приходящими битами данных. В противном случае принятые биты могут оказаться на не соответствующих временных позициях, и составленные из них байты и сообщения данных более высокого уровня - кадры - будут искажены. Для исключения этого явления средства, передающие биты на уровне канала, всегда поддерживают побитовую синхронизацию между приемником и передатчиком, а при передаче более длинных сообщений необходимо поддерживать также и синхронизацию по кадрам.

Основным элементом, обеспечивающим синхронизацию передачи кадра между передатчиком и приемником является стартовый бит. Отрицательный фронт этого бита устанавливает фазу внутреннего генератора приемника в соответствии с фазой генератора передатчика. Групповая синхронизация обеспечивается стабильностью частот синхрогенераторов, однако для миниатюрных и недорогих систем, выполнение этого требования, зачастую не выполняется требуемым образом.

Литературных источников, в которых подробно рассматривалась проблема передачи информационных сигналов при нестабильности частот генераторов известно не много. Так, в [3] описана структура информационно-технического комплекса для асинхронных электроприводов, а также проведены эксперименты по определению максимально возможной скорости передачи данных. В [4] предлагается математическая модель асинхронной процедуры управления звеном передачи данных, учитывающая фактор искажений в прямом и обратном каналах связи. В [5] приводится анализ устойчивости систем с цифровой процедурой управления. В работе [6] представлена информация, наиболее интересная с точки зрения проводимого исследования. Так, в ней описывается метод статистической стабилизации частоты генераторов. Рассматриваются вопросы, связанные с анализом погрешностей, возникающих из-за нестационарности частот генераторов на интервале оценивания частот при использовании данного метода. В работе [7] рассматриваются методы определения места возникновения ошибки при передаче кадра и её исправления с использованием кодов Хэмминга.

Целью работы является нахождение критического соотношения частот генераторов приемника и передатчика (f_R/f_T), при которых передача цифрового сигнала

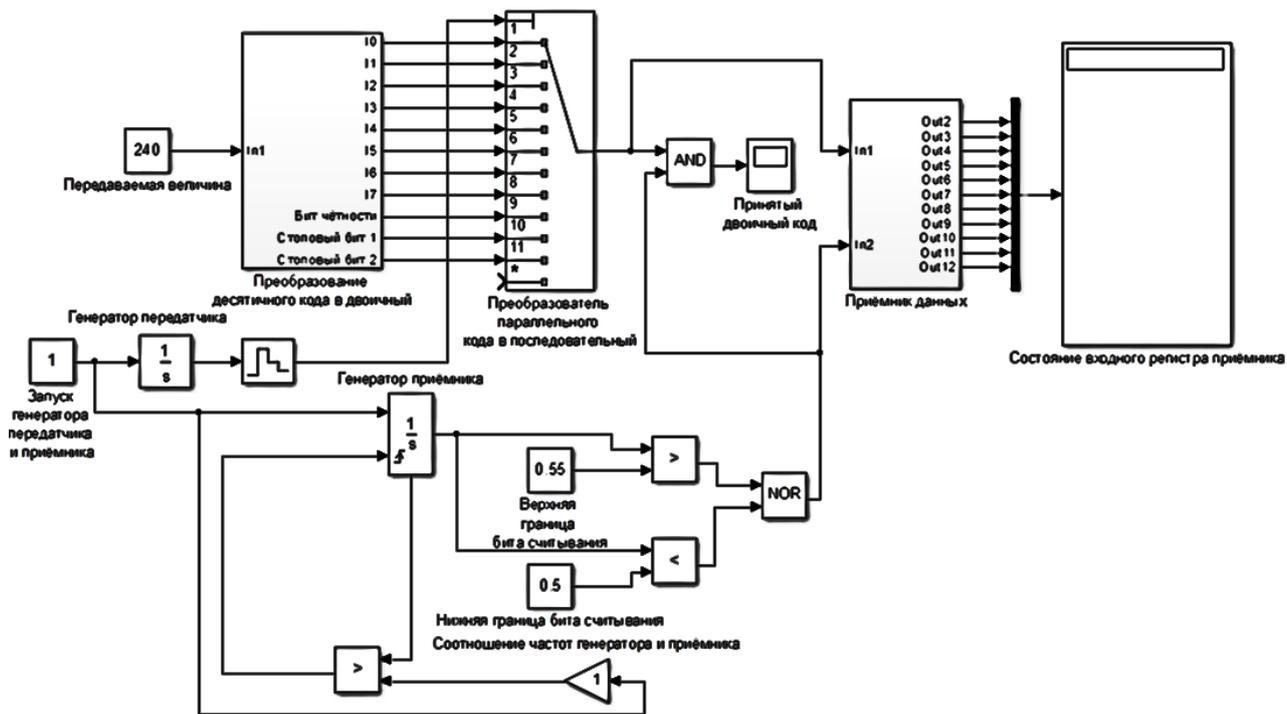


Рис. 2. Математическая модель передатчика и приёмника последовательного сигнала с возможностью задания соотношения частот генератора и приёмника

происходит без ошибок при всех возможных вариантах информационного сигнала, а также построение зависимости доли правильно считанных байтов при приёме сигнала от значения f_R/f_T .

Модель механизма последовательной асинхронной передачи цифрового сигнала

Для исследования механизма последовательной асинхронной передачи была разработана математическая модель, включающая в себя модель передатчика, формирующая кадры сообщения), модель приемника, принимающая информацию и обеспечивающую покадровую и групповую синхронизацию.

Для моделирования работы передатчика последовательной передачи цифровых сигналов использовалось следующий состав кадра сообщения: информационных бит слова – 8; один бит чётности; два стоповых бита; один стартовый бит. Модель передатчика цифровых сигналов обеспечивает получение временной диаграммы при передаче одного байта (8 бит). Передаваемая величина задаётся в десятичном формате. В качестве модели механизма последовательной асинхронной передачи цифрового сигнала используется модель, собранная в программе Matlab (Пакет Simulink) и представленная на рис.2.

Асинхронная последовательная передача реализована следующим образом: передаваемая величина задаётся в десятичном формате в блоке «Передаваемая величина», затем преобразуется в двоичный код в блоке «Преобразование десятичного кода в двоичный» посредством стандартного правила преобразования. Расчёт бита чётности производится посредством блоков суммирования единиц Sum в двоичном коде и вычисления остатка от деления на 2. Далее, посредством запуска

дискретного интегратора формируется последовательный ряд чисел в диапазоне от 0 до 12. Дискретное представление выходного сигнала интегратора вызывает «мультиплексирование» выходного кода посредством поочередного переключения битов кадра, начиная с нулевого бита передаваемой информации, затем бит чётности и 2 стоповых бита. В результате такой операции параллельный код преобразуется в последовательный.

Модель приёмника сигнала реализована с помощью логического элемента «И», на один из входов которого поступает последовательный код, на другой вход поступает генератор тактовых импульсов приёмника сигналов, осуществляющий приём битов данных примерно в середине их передачи. Запоминание принятых битов осуществляется в блоке «Приёмник данных». Контроль за состоянием регистра приёмника осуществляется с помощью блока «Состояние входного регистра приёмника». В модели приемника имеется возможность задавать отношение частот генератора передатчика относительно частоты генератора приемника.

Приём информации (перевод из последовательного кода в параллельный) осуществляется с помощью сдвигового регистра в подсистеме «Subsystem 2», собранного на элементах пакета Simulink. При моделировании механизма последовательной передачи имеется возможность визуально наблюдать временные диаграммы передатчика и состояние входного регистра приемника.

В линиях последовательной передачи данных передатчик и приёмник должны быть согласованы по всем параметрам формата, включая номинальное время передачи бита. Для этого в приемнике устанавливается генератор синхроимпульсов, частота которого должна совпадать с частотой аналогичного генератора передатчика. Кроме того, для обеспечения оптимальной защи-

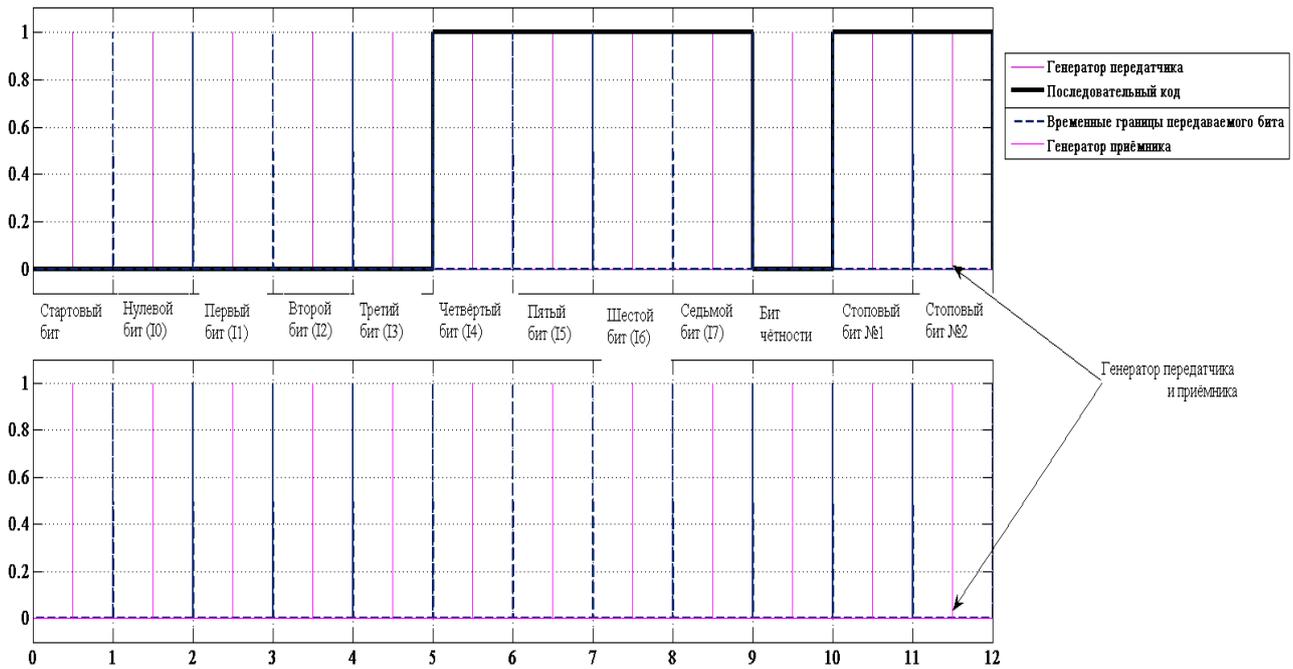


Рис. 3. Передача десятичной величины 240_{10} при соотношении частот $S=1$

ценности сигнала от искажения, шумов и разброса частоты синхроимпульсов приемник должен считывать принимаемый бит в середине его длительности.

На разработанной модели были проведены исследования влияния отклонения частоты передатчика относительно частоты генератора приемника на возникновение ошибок при передаче цифровых сигналов и определение максимального отклонения частот генераторов приемника и передатчика, при которых передача цифрового сигнала происходит без ошибок при всех возможных вариантах информационного сигнала.

Исследования проводились для двух режимов:

- 1) для режима непрерывной передачи данных, при котором стоповый бит не используется, и после передачи очередного кадра сообщения сразу начинается передача следующего;
- 2) для режима с формированием паузы между передачей кадров, что позволяет использовать стартовый бит для синхронизации генератора и приемника в начале передачи каждого кадра.

На рис. 3 представлена графическая интерпретация асинхронной системы передачи данных.

Отклонение частоты приёмника от частоты передатчика вызывает временной сдвиг приёма сигнала во времени относительно середины передаваемого бита. При отклонении частот синхрогенераторов будет накапливаться временной сдвиг между моментом считывания очередного бита информации от середины временного диапазона, соответствующего времени передачи одного бита.

Определим критическое отклонения частот синхрогенераторов (f_R/f_T) при котором прием кадра сообщения происходит без ошибок, т.е. когда считывание последнего стопового бита, произойдет на границе времени длительности этого бита.

Для 11 бит информационного кадра составим и решим систему уравнений следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{н16}} + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_1 \\ t_1 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_2 \\ t_2 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_3 \\ t_3 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_4 \\ t_4 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_5 \\ t_5 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_6 \\ t_6 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_7 \\ t_7 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_8 \\ t_8 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_9 \\ t_9 + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= t_{10} \\ t_{10} + f_{\text{кр}} \cdot t_{\text{н16}} &= \frac{n \pm 1}{t_{\text{н16}}} \end{aligned} \right\} (1)$$

где $t_{\text{нач}}=0,5$ – интервал времени, после которого начинается считывание данных, т.е., середина стартового бита, сек; $t_1 - t_{10}$ – интервалы времени, соответствующие периоду изменения сигнала приёмника и выдачи битов считывания (численно равно задаваемому соотношению частот), сек; $t_{\text{н16}}$ – время передачи одного бита, с; n – количество битов в кадре; $(n \pm 1)/t_{\text{н16}}=11$ – левая граница интервала времени второго стопового бита, сек (знак \pm для соотношения частот $S>1$ и $S<1$ соответственно); $f_{\text{кр}}$ – критическое соотношение частот, снижение которой вызовет искажение принимаемой информации. Решив данную систему, можно определить критическую частоту, которая составит 0,954545 при $S<1$ и 1,04545 при $S>1$.

Исследование приема кадра для различных соотношений (f_R/f_T) на разработанной модели подтвердило правильность проведенных расчетов. Временные диаграммы для соотношений $f_R/f_T=0,95$ и $f_R/f_T=0,954545$ приведены на рис.4,5.

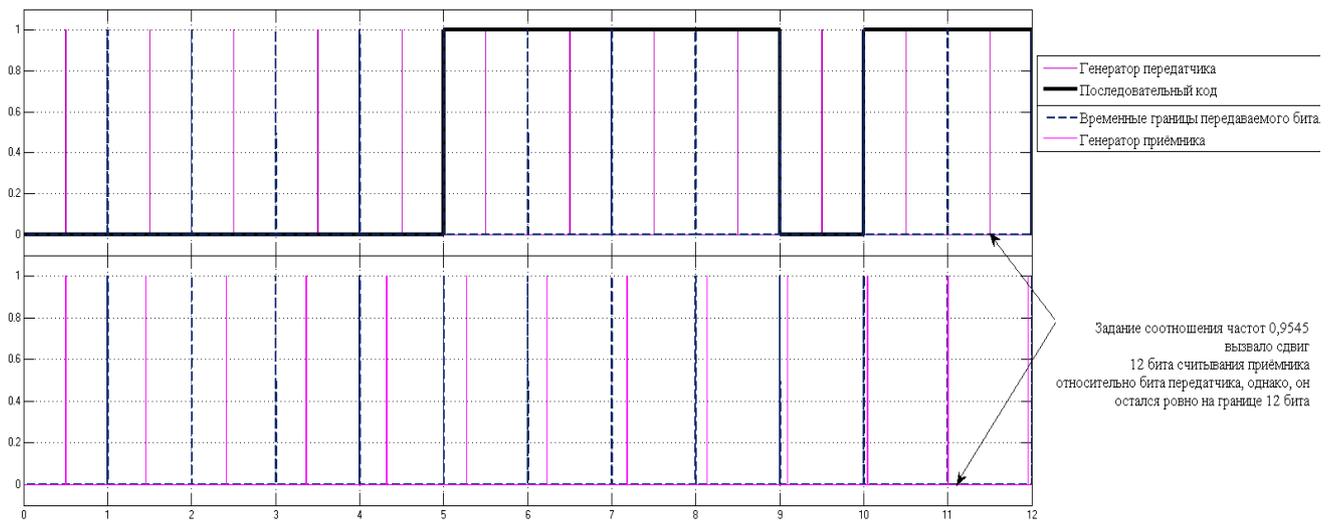


Рис.4. Передача десятичной величины 240_{10} при соотношении частот $S=0,954545$

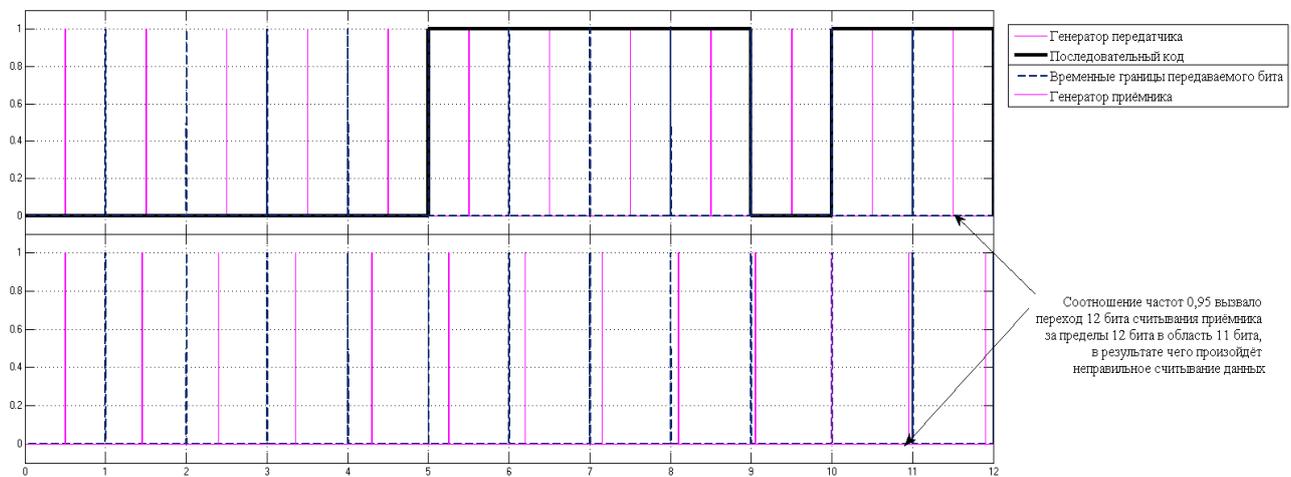


Рис.5. Передача десятичной величины 240_{10} при соотношении частот $S=0,95$

Анализ полученных диаграмм показывает, что частота приёма сигнала сдвинута во времени относительно моментов времени передачи сигнала. Наиболее сильно сдвиг проявляется во время приёма последних битов кадра. Поскольку считывание бита, в идеале, происходит в его середине, можно сделать вывод о том, что при определённых соотношениях частот правильный приём кадра всё ещё возможен, если моменты чтения, несмотря на временной сдвиг, останутся в пределах соответствующего бита. Однако, дальнейший анализ показывает, что при определённом соотношении частот во время передачи последних битов кадра считывание бита произойдёт «за пределами» соответствующего бита, в результате чего произойдёт неправильное считывание информации.

Например, если при считывании битов посылки временной интервал между сигналами считывания станет на 6 % меньше (соотношение частот будет составлять 0,94), то десятый сигнал считывания, который, при правильном соотношении частот, должен фиксировать первый стоповый бит, будет выработан тогда, когда на линии находится бит контроля чётности. Следовательно, в реальной системе не будет обнаружен стоповый бит и будет зафиксирована ошибка кадра, к тому же, будет искажена принимаемая информация.

Из рисунков видно, что снижение соотношения частот до 0,95 вызвало сдвиг 10 бита во времени и неправильное считывание данных, в результате чего в регистре приёмника стала содержаться искажённая величина 11011111000_2 (в десятичном коде 248_{10}).

Исследование процесса передачи данных в разных режимах синхронизации кадров сообщения

Для построения зависимости количества правильных считываний байтов при приёме сигнала от соотношения частот генератора и приёмника используем следующий подход. Как уже упоминалось ранее, считывание информации происходит примерно в середине передаваемого бита. Следовательно, можно сделать вывод о том, что бит считывания (в том числе, его порядковый номер), оказывается своего рода жёстко связанным с соответствующим битом информации (как и с его порядковым номером). Поэтому, бит считывания можно представить как короткий импульс, находящийся в пределе соответствующего ему бита информации и не выходящего за его пределы. Однако, при отклонении частот генератора и приёмника это не всегда будет соблюдаться, т.к. при соотношениях <1 с увеличением временного интервала передачи и считывания информа-

ции будет постепенно накапливаться смещение бита считывания (при соотношениях <1 бит считывания будет всё больше смещаться в левую сторону). Таким образом, бит считывания будет смещаться всё больше и рано или поздно достигнет левой границы соответствующего ему бита информации. При снижении соотношения частот ниже некоего предела произойдёт следующее: бит считывания выйдет за пределы связанного с ним бита информации и перейдёт в другой, не предназначенный для него бит, что означает неправильное считывание информации. Таким образом, необходимо определить такое соотношение частот, при котором бит считывания впервые достигнет левой границы соответствующего ему бита информации. Математически это выражается следующей формулой:

$$\frac{f_R}{f_T} \cdot n_{\text{непрер}} \cdot t_{\text{п16}} + t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}} = n_{\text{непрер}} \cdot t_{\text{п16}} \quad (2)$$

где $n_{\text{непрер}}$ – число битов в непрерывном режиме передачи данных, составляет 3384.

Откуда:

$$n_{\text{непрер}} = \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} \quad (3)$$

Для соотношения частот >1 бит считывания приблизится к правой границе, применим следующую формулу:

$$n_{\text{непрер}} = \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} + 1 \quad (4)$$

Для вычисления процента попадания байт при $S < 1$ воспользуемся формулой:

$$\frac{\left| \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} \right| \cdot N}{n_{\text{непрер}}} \quad (5)$$

где N – число байт данных в непрерывном режиме передачи, составляет 256;

Для вычисления процента правильно считанных байтов при $S > 1$ воспользуемся формулой:

$$\frac{\left| \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} + 1 \right| \cdot N}{n_{\text{непрер}}} \quad (6)$$

Таким образом, для расчёта искомой зависимости предлагается кусочно-заданная функция следующего вида:

$$f\left(\frac{f_R}{f_T}\right) = \begin{cases} \frac{\left| \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} \right| \cdot N}{n_{\text{непрер}}}, & \frac{f_R}{f_T} < 1 \\ 256, & f\left(\frac{f_R}{f_T}\right) > 100\% \\ \frac{\left| \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} + 1 \right| \cdot N}{n_{\text{непрер}}}, & \frac{f_R}{f_T} > 1 \end{cases} \quad (7)$$

Для прерывистого режима с пересинхронизацией рассуждения аналогичны с той лишь разницей, что процент правильно принятых байт данных необходимо

рассчитывать в пределах 1 байта данных, т.е. 12 бит, поскольку при передаче каждого нового байта происходит пересинхронизация, в результате чего смещение в глобальном масштабе не накапливается, т.е., не распространяется на последующие байты данных.

$$f\left(\frac{f_R}{f_T}\right) = \begin{cases} \frac{\left| \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} \right| \cdot N}{n_{\text{пер}}}, & \frac{f_R}{f_T} < 1 \\ 256, & f\left(\frac{f_R}{f_T}\right) > 100\% \\ \frac{\left| \frac{-t_{\text{нач}} \cdot t_{\text{п16}}}{\left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right) \cdot t_{\text{п16}}} + 1 \right| \cdot N}{n_{\text{пер}}}, & \frac{f_R}{f_T} > 1 \end{cases} \quad (8)$$

где $n_{\text{пер}}$ – число битов в прерывистом режиме, составляет 12.

Кроме прочего, необходимо учесть специфический случай, при котором принятый байт данных может быть воспринят как «правильно» переданный, несмотря на несоответствие передаваемого и принятого кода. Это происходит в тех случаях, когда при различных соотношениях частот биты считывания, принимающие информацию, «правильно» считывают бит чётности и два стоповых бита, т.е. общее число логических единиц в байте чётно, а сразу после бита чётности следуют два стоповых бита, иначе говоря, соблюдена правильная структура передачи данных. В этом случае, приёмник «думает» что принятый код верен, несмотря на то, что передаваемые данные могут быть абсолютно другими. Это т.н. аномалия передачи данных со стороны приёмника. Количество подобных байт необходимо рассчитать и совместить с графиком процентного соотношения правильно принятых данных со стороны приёмника в прерывистом режиме. Для расчёта количества «правильно» принятых байт в этом случае воспользуемся следующей методикой: зададимся соотношением частот с шагом 0,01 и при каждом соотношении будем отслеживать, какие из передаваемых данных в диапазоне 0-255 будут восприняты как «правильные». Для этого необходимо фиксировать 9,10 и 11 бит считывания, т.е. проверять правильность считывания бита чётности и двух стоповых битов. Для соотношения частот >1 необходимо сделать допущение о том, что при $S > 1$ не все биты считывания успеют сформироваться в пределах передаваемого байта, поэтому 3-мя контрольными битами будем считать 3 последних бита во время передаваемого кадра.

На рис.6 представлен график числа удачно принятых байт, выраженных в процентном отношении от общего числа передаваемых байт в зависимости от соотношения частот приемника и передатчика. Под цифрой 1 – обозначен число верно переданных кадров при непрерывном режиме передачи, под цифрой 2 – число верно переданных кадров при синхронизации приемника перед началом приема очередного кадра, под цифрой 3 – число кадров, при приеме которых приемник не сформировал сигнал «ошибка кадра».

Анализ полученного графика показывает, что для непрерывного режима даже небольшое отклонение частот вызывает резкое снижение числа правильно принятых

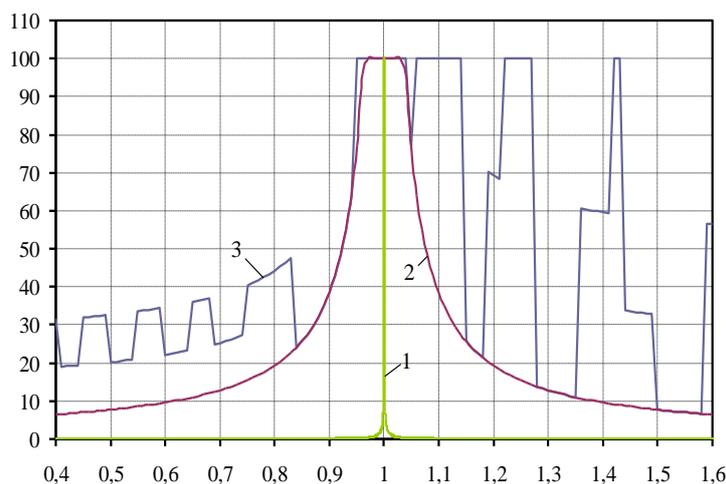


Рис.6. Зависимости процента правильно считанных байтов при приёме сигнала от соотношения частот генератора и приёмника

байт данных. Это обусловлено тем, что даже небольшое отклонение частот вызывает постепенное накопление смещения, что в совокупности с принципом построения метода передачи данных в потоке бит при одинаковом времени передачи вызывает неправильное считывание информации примерно на 1/3 от общего количества бит информации.

Заключение

Благодаря проведённым теоретическим и компьютерным исследованиям для асинхронной последовательной передачи данных следует отдавать предпочтение прерывному режиму передачи. В этом режиме после каждого переданного байта данных генераторы приёмника и передатчика будут сбрасываться и пересинхронизироваться в момент прихода стартового импульса. Кроме того, необходимо будет строго соблюдать момент считывания и, по возможности, не допускать его отклонения от середины передаваемого бита. Если же это, по каким-то причинам сделать не удастся, необходимо поддерживать соотношение частоты генератора от частоты приёмника в диапазоне (0,9545-1,04545). Помимо прочего, в ходе исследования было выявлено, что в непрерывном режиме следует поддерживать соотношение частот в диапазоне (0,9999-1,0003), а лучше не следует допускать отклонения частот вообще. Так как в случае такого большого количества бит информации даже небольшое отклонение будет значительно влиять на смещение и правильность считывания информации. Общий вывод таков: для качественной передачи информации необходимо использовать жёсткую синхронизацию частот приёмника и передатчика, частота же передатчика должна быть жёстко связана с серединой считываемого бита. Только такой подход позволит передавать последовательный код без искажений во всём диапазоне значений.

В общем и целом приведённые в статье результаты являются предварительными результатами исследования

влияния отклонения частот генератора и приёмника на правильность принятия данных. Получена система уравнений для расчёта критической частоты в прерывистом режиме и кусочно-заданная функция, выражающая зависимость количества правильно принятых байт данных в зависимости от значения соотношения отклонения частоты генератора от частоты приёмника.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шувалов, В.П.** Передача дискретных сообщений. Учебник для вузов. / В.П. Шувалов, Н.В. Захарченко, В.О. Шварцман. –М.: Радио и связь, 1990. 464 с.
2. **Андреев, С.М.** Принципы построения и организации комплексов технических средств в системах автоматического управления. Курс лекций: учеб. пособие./ С.М. Андреев. –Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2008. 132 с.
3. **Каширских, В.Г.** Структура информационно-технического комплекса для асинхронных электроприводов. / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский, А.П. Носков // Вестник КузГТУ. 2012. № 4. –С. 139-141.
4. **Кокшенев, В.В.** Анализ быстродействия асинхронной процедуры управления звеном передачи данных. / В.В. Кокшенев, С.П. Сущенко // Вычислительные технологии. 2008. №5. –С. 61-65.
5. **Диденко, Ю. И.** Анализ асинхронных цифровых систем с цифровыми связями между вычислителями. / Ю. И. Диденко // Учётные записки ЦАГИ. 1987. № 6. –С. 51-58.
6. **Сафарьян, О.А.** Погрешность оценки частот генераторов в нестационарном случае при использовании статистического метода стабилизации частот. / О.А. Сафарьян // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. –С. 1-6.
7. **Андреев, С.М.** Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов: учеб. пособие./ С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин -М.: Издательский центр "Академия", 2016. -272 с.

РОБАСТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЦЕНОК КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ СЛУЧАЙНЫХ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ

Т.А. Алиев¹, Н.Э. Рзаева²

^{1,2} Институт Систем Управления Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Баку

ROBUST TECHNOLOGIES FOR DETERMINING THE ESTIMATES OF CORRELATION FUNCTIONS OF RANDOM NOISY SIGNALS

T.A. Aliev¹, N.E. Rzayeva²

^{1,2} Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku

¹telmancyber@rambler.ru

Аннотация. Анализированы трудности обеспечения робастности определения оценок корреляционных функций случайных зашумленных сигналов в измерительно-информационных системах. Показана возможность использования помехи как носителя полезной информации при анализе измерительной информации. Предложены алгоритмы определения оценок характеристик помехи и вычисления робастных оценок корреляционных функций, равных аналогичным оценкам полезных сигналов как для случая, когда между полезным сигналом и помехой нет корреляции, так и для случая, когда корреляция между ними присутствует.

Ключевые слова: сигнал; помеха; зашумленный сигнал; корреляционная функция; нормированные оценки; объект; измерительные системы; контроль; диагностика; идентификация.

Abstract. We analyze the challenges of ensuring the robustness of *determining* the estimates of correlation functions of random noisy signals in information measurement systems, demonstrating the possibility of using the noise as a carrier of useful information in the analysis of measurement information. We propose algorithms for determining the estimates of the noise characteristics and calculating the robust estimates of correlation functions equivalent to the corresponding estimates of the useful signals both in the absence of a correlation between the useful signal and the noise and in the presence of such correlation.

Keywords: signal; noise; noisy signal; correlation function; normalized estimates; object; measurement systems; control; diagnostics; identification.

Введение

Известно [1-13], что в современных измерительно-информационных системах (ИИС) решаются задачи контроля диагностики, идентификации и т.д. Для этого требуется определение оценок корреляционных функций входных-выходных сигналов объектов контроля. Однако при этом на полезный сигнал измерительной информации получаемой на выходе датчиков этих объектов накладываются помехи (шумы). Из-за этого при вычислении оценок их статических характеристик возникают погрешности. Они, т.е. помехи (шумы) также представляют собой случайные функции $\varepsilon(t)$ и причины их появления самые различные [1-4, 12, 13]:

- а) тепловые шумы;
- б) шумы, вызываемые работой других рядом стоящих агрегатов и оборудования;
- в) шумы, создаваемые источниками питания;
- г) шумы из-за генерации автоколебаний в цепях обратной связи и т. д.

Например, для глубоководных морских платформ шумы возникают от влияния волн, ветра и т.д. Другим примером может быть радиолокатор антенны, которая находится под влиянием ветровой нагрузки, также представляющую собой случайную функцию времени.

В связи с вышеуказанным, с целью устранения по-

грешности помехи на результат определения оценок статистических характеристик входных-выходных сигналов объектов контроля в течение длительного времени были предложены множества алгоритмов и технологий фильтрации помех [3, 4, 12, 13]. Те из них, которые позволяют устранить погрешность помех, возникающих от влияния внешних факторов, нашли широкое применение [4, 12, 13]. Однако во многих реальных объектах помехи технологических процессов формируются не только под влиянием внешних факторов. Некоторые из них косвенно отражают определенные процессы, приводящие к зарождению дефектов, в процессе эксплуатации контролируемых объектов [13]. Из-за этого нередко диапазон спектра помехи пересекается со спектром полезного сигнала, и между ними возникает корреляция. Кроме того, спектры помехи и полезного сигнала не являются строго стабильными. По этим причинам в процессе фильтрации не всегда достигается желаемый результат. Иногда даже в результате фильтрации происходит искажение спектра полезного сигнала [3, 4, 12, 13].

В связи с указанными выше факторами в предлагаемой работе рассматривается один из возможных вариантов создания альтернативных алгоритмов и технологий, позволяющих устранением влияния помехи, получить робастные оценки корреляционных функций

зашумленных случайных сигналов, эквивалентных их полезным сигналам.

Постановка задачи

Известно, при применении ИИС в различных отраслях экономики возникает необходимость определения оценок авто- и взаимно корреляционных функций входных-выходных сигналов объектов контроля по выражениям:

$$R_{XX}(\mu) \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t), \quad (1)$$

$$R_{XY}(\mu) \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(i\Delta t)Y((i+\mu)\Delta t). \quad (2)$$

где $R_{XX}(\mu)$, $R_{XY}(\mu)$ представляют собой оценку автокорреляционных функций входного сигнала $X(i\Delta t)$ и взаимно корреляционных функций между входом $X(i\Delta t)$ и выходом $Y(i\Delta t)$.

Однако, для реальных объектов контроля определение оценок корреляционных функций полезных сигналов $X(i\Delta t)$ и $Y(i\Delta t)$, зашумленных помехами $\varepsilon(i\Delta t)$, $\varphi(i\Delta t)$ по выражениям (1), (2) невозможно. Это связано с тем, что реальные входные-выходные сигналы объектов представляют собой сумму центрированных полезных сигналов $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ и помех $\varepsilon(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$ т.е.

$$\begin{cases} g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t) \\ \eta(i\Delta t) = Y(i\Delta t) + \varphi(i\Delta t) \end{cases} \quad (3)$$

Из-за этого алгоритмы (1), (2) определение оценок корреляционных функций реальных зашумленных сигналов, получаемых на выходах датчиков представляются в виде:

$$R_{gg}(\mu) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) = \quad (4)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t))(X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t))$$

$$R_{g\eta}(\mu) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)\eta((i+\mu)\Delta t) = \quad (5)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y(i\Delta t) + \varphi(i\Delta t))(Y((i+\mu)\Delta t) + \varphi((i+\mu)\Delta t))$$

Поэтому контроль функционирования объекта осуществляется по оценкам корреляционных функций $R_{gg}(\mu)$, $R_{g\eta}(\mu)$, которые вычисляются по выражениям (4), (5).

Однако использование этих оценок во многих случаях становится невозможным, так как при этом возникают погрешности

$$\lambda_{gg}(\mu) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \quad (6)$$

$$+ \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t)]$$

$$\lambda_{g\eta}(\mu) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t)\varphi((i+\mu)\Delta t) + \quad (7)$$

$$+ \varepsilon(i\Delta t)Y((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varphi((i+\mu)\Delta t)]$$

и из-за этого имеют место неравенства:

$$\left. \begin{aligned} R_{XX}(\mu) &\neq R_{gg}(\mu) \\ R_{XY}(\mu) &\neq R_{g\eta}(\mu) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Кроме того на многих объектах контроля для измерения зашумленных сигналов применяются различные датчики, у которых сигналы зачастую представляют собой различные физические величины (например температура, давление, перемещение, вибрация и т.д.). В этих случаях определяются оценки нормированных авто- и взаимно корреляционных функций полезных сигналов $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ по формулам [12]:

$$\left. \begin{aligned} r_{XX}(\mu) &\approx R_{XX}(\mu)/D_X \\ r_{XY}(\mu) &\approx R_{XY}(\mu)/\sqrt{D_X D_Y} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $D_X \approx R_{XX}(0)$, $D_Y \approx R_{YY}(0)$, $R_{XX}(\mu)$ и $R_{XY}(\mu)$ оценки авто и взаимно корреляционных функций сигналов $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ при $\mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$

Известно, что нормированные авто и взаимно корреляционные функции $r_{gg}(\mu)$, $r_{g\eta}(\mu)$ зашумленных сигналов, состоящих из суммы случайных сигналов $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ и соответствующих помех $\varepsilon(i\Delta t)$, $\varphi(i\Delta t)$, вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} r_{gg}(\mu) &\approx R_{gg}(\mu)/D_g \\ r_{g\eta}(\mu) &\approx R_{g\eta}(\mu)/\sqrt{D_g D_\eta} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Сравнивая оценки $r_{gg}(\mu)$, $r_{g\eta}(\mu)$ и $r_{XX}(\mu)$, $r_{XY}(\mu)$ можно заметить, что они из-за влияния погрешностей $\lambda_{gg}(\mu)$, $\lambda_{g\eta}(\mu)$ также будут значительно отличаться друг от друга, т.е. будут иметь место неравенства

$$\left. \begin{aligned} r_{gg}(\mu) &\neq r_{XX}(\mu) \\ r_{g\eta}(\mu) &\neq r_{XY}(\mu) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из-за возникновения неравенств (8), (11) в современных ИИС обеспечение адекватности результатов решения задач контроля, диагностики, идентификации на практике во многих случаях не удастся. В связи с этим, для устранения этого недостатка информационно-измерительных систем требуется разработка алгоритмов и технологий определения робастных оценок корреляционных функций входных-выходных зашумленных сигналов контролируемых объектов, обеспечивающих выполнение равенств:

$$\left. \begin{aligned} R_{gg}^R(\mu) &\approx R_{XX}(\mu) \\ R_{g\eta}^R(\mu) &\approx R_{XY}(\mu) \\ r_{gg}^R(\mu) &\approx r_{XX}(\mu) \\ r_{g\eta}^R(\mu) &\approx r_{XY}(\mu) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Технологии определения робастных оценок корреляционных функций для случая, когда между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ нет корреляции

Проведенные исследования [12-15] показали, что для входных и выходных зашумленных сигналов многих контролируемых объектов условия эргодичности, стационарности и нормальности закона распределения выполняются. При этом для случая, когда корреляция между полезными сигналами $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ и помехами $\varepsilon(i\Delta t)$, $\varphi(i\Delta t)$ равна нулю, то есть имеют место равенства

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varphi((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

выражение (4), (5) вычисления оценок, авто и взаимно-корреляционных функций можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t) \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t))(X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t)) \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum [X(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \\ &+ X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{XX}(\mu) + R_{\varepsilon X}(\mu) + R_{X\varepsilon}(\mu) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) \\ &\approx \begin{cases} R_{XX}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) & \text{при } \mu = 0 \\ R_{XX}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

где $D_\varepsilon \approx R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$.

$$\begin{aligned} R_{g\eta}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g(i\Delta t)\eta((i+\mu)\Delta t) \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t) \right) \left(Y((i+\mu)\Delta t) + \varphi((i+\mu)\Delta t) \right) \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [X(i\Delta t)Y((i+\mu)\Delta t) + \\ &+ \varepsilon(i\Delta t)Y((i+\mu)\Delta t) + X(i\Delta t)\varphi((i+\mu)\Delta t) + \\ &+ \varepsilon(i\Delta t)\varphi((i+\mu)\Delta t)] \approx R_{XY}(\mu) \end{aligned} \quad (15)$$

Как это следует из выражения (14), корреляционная функция $R_{gg}(\mu)$ зашумленного входного сигнала $g(i\Delta t)$ отличается от корреляционной функций $R_{XX}(\mu)$ полезного сигнала $X(i\Delta t)$ тем, что только при $\mu = 0$ он представляют собой сумму оценок корреляционных функций полезных сигналов $R_{XX}(0)$ и дисперсии помехи

$D_\varepsilon \approx R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$. Следовательно, в этом случае для определения оценок $R_{gg}(0)$ эквивалентной оценки $R_{XX}(0)$ полезного сигнала необходимо определение оценок дисперсии помехи D_ε зашумленных сигналов [12-14]. При этом вычитанием оценки D_ε из оценок $R_{gg}(0)$ ее можно свести к виду робастным оценкам $R_{gg}^R(\mu)$ эквивалентной оценке полезного сигнала $R_{XX}(\mu)$, т.е.

$$R_{gg}^R(\mu = 0) \approx R_{gg}(\mu = 0) - R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx R_{XX}(\mu = 0) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} R_{gg}^R(\mu \neq 0) &\approx R_{XX}(\mu \neq 0) \\ R_{g\eta}^R(\mu = 0) &\approx R_{XY}(\mu = 0) \\ R_{g\eta}^R(\mu \neq 0) &\approx R_{XY}(\mu \neq 0) \end{aligned} \quad (17)$$

Кроме того, как было указано выше, на практике для реальных объектов при решении прикладных задач достаточно часто в измерительно-информационных системах возникает необходимость нормирования корреляционных функций. Очевидно, что принимая во внимание выражение (14), формулу (10) определения робастной оценки нормированной автокорреляционной функции можно преобразовать к виду:

$$\left. \begin{aligned} r_{gg}(\mu = 0) &\approx \frac{R_{gg}(\mu = 0)}{D_g} \approx \frac{R_{XX}(\mu = 0) + D_\varepsilon}{D_g} \approx r_{gg}^R(\mu = 0) = 1 \\ r_{gg}^R(\mu \neq 0) &\approx \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{D_g - D_\varepsilon} \approx \frac{R_{XX}(\mu \neq 0)}{D_g - D_\varepsilon} \approx \frac{R_{XX}(\mu \neq 0)}{D_X} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Естественно, что формулу вычисления робастной оценки нормированных взаимно корреляционных функций также можно представить в виде:

$$r_{g\eta}^R(\mu) \approx \frac{R_{g\eta}(\mu)}{\sqrt{(D_g - D_\varepsilon)(D_\eta - D_\varphi)}} \approx \frac{R_{XY}(\mu)}{\sqrt{D_X D_Y}} \quad (19)$$

Из равенств (16), (18), (19) очевидно, что для их реализации необходимо определение оценок дисперсии помех D_ε и D_φ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$. Проведенные исследования [12-14] показали, что для этой цели можно использовать выражения:

$$\begin{aligned} D_\varepsilon &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[g(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) \right] \\ D_\varphi &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\eta(i\Delta t)\eta(i\Delta t) - 2\eta(i\Delta t)\eta((i+1)\Delta t) + \eta(i\Delta t)\eta((i+2)\Delta t) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

которые позволяют вычислить оценки дисперсий D_ε , D_φ помех $\varepsilon(i\Delta t)$, $\varphi(i\Delta t)$ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$.

Целесообразность применения этих формул при вычислении оценок D_ε , D_φ можно показать разложением их правой части $R'_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ на слагаемые, т.е.

$$\begin{aligned}
R'_{X\varepsilon}(\mu=0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \\
&\quad + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] \approx \\
&\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] - \\
&\quad - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+1)\Delta t) + \varepsilon((i+1)\Delta t)] + \\
&\quad + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+2)\Delta t) + \varepsilon((i+2)\Delta t)] \approx \\
&\approx R_{XX}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) - 2R_{XX}(\Delta t) - \\
&\quad - 2R_{X\varepsilon}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + \\
&\quad + R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t)
\end{aligned} \quad (21)$$

При выполнении условий стационарности и нормальности закона распределения зашумленных сигналов рассматриваемых объектов, принимая во внимание равенство (13) можно считать справедливыми равенства:

$$\left. \begin{aligned}
R_{X\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \approx 0 \\
R_{\varepsilon X}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X(i\Delta t) \approx 0 \\
R_{XX}(0) + R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{XX}(\Delta t) &\approx 0 \\
R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \approx 0 \\
R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0 \\
R_{X\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \approx 0 \\
R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0 \\
R_{\varepsilon X}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+1)\Delta t) \approx 0 \\
R_{\varepsilon X}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \approx 0
\end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Следовательно, в правой части формулы (20) получим:

$$R'_{X\varepsilon}(\mu=0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = D_\varepsilon. \quad (23)$$

Это показывает, что полученная по формуле (20) оценка действительно представляет собой оценку дисперсии помехи $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$. Благодаря этому после вычитания из соответствующих оценок корреляционных функций дисперсии помехи $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ по выражениям (16), (17) и (18), (19) получаются робастные оценки, которые равны соответствующим оценкам полезных сигналов, вычисленных по выражениям (2), (3) и (8), (9). Например,

по выражению (16) после вычитания оценки $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ из оценки $R_{gg}(0)$ их разность будет равна оценке полезного сигнала. Следовательно, $R_{gg}^R(\mu)$ можно считать робастной оценкой, которая равна оценке полезного сигнала $R_{XX}(0)$.

Таким образом, вычисление оценки дисперсии помехи $R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = D_\varepsilon$, $R_{\varphi\varphi}(0) = D_\varphi$ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$ открывает возможность определения робастных оценок зашумленных сигналов, которые оказываются равными оценкам полезных сигналов т.е.

$$\left. \begin{aligned}
R_{gg}^R(\mu) &\approx R_{XX}(\mu) \\
R_{g\eta}^R(\mu) &\approx R_{XY}(\mu) \\
r_{gg}^R(\mu) &\approx r_{XX}(\mu) \\
r_{g\eta}^R(\mu) &\approx r_{XY}(\mu)
\end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Технология определения робастных оценок корреляционных функций при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой

Как было указано выше реальные контролируемые объекты в процессе эксплуатации переходят в скрытый период зарождения различных дефектов, таких как износ, микротрещина, нагромообразование, деформация от усталости и т.д. [13, 15]. Обычно все это отражается на сигналах, получаемых от соответствующих датчиков в виде шума, который в большинстве случаев имеет корреляцию с полезными сигналами $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ [15]. Из-за этого, в таких случаях суммарная помеха формируется из помехи $\varepsilon_1(i\Delta t)$, которая возникает от влияния внешних факторов и из шума $\varepsilon_2(i\Delta t)$, который возникает в результате зарождения различных дефектов. При этом дисперсия зашумленного сигнала имеет вид:

$$\begin{aligned}
D_g &\approx R_{gg}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g^2(i\Delta t) \approx \\
&\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) + 2\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) + \\
&\quad + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \approx \\
&\approx R_{XX}(0) + 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0).
\end{aligned} \quad (25)$$

Следовательно, когда суммарная помеха $\varepsilon(i\Delta t) = \varepsilon_1(i\Delta t) + \varepsilon_2(i\Delta t)$ имеет корреляцию с полезным сигналом $X(i\Delta t)$, тогда ее дисперсия D_ε определяется по выражению

$$D_\varepsilon = 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0), \quad (26)$$

где $R_{X\varepsilon}(0)$ – взаимокорреляционная функция между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ – оценка дисперсии помехи $\varepsilon(i\Delta t)$.

Следовательно, в этом случае погрешность помехи $\lambda_{gg}(\mu=0)$ представляет собой сумму дисперсии $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$

помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ и взаимнокорреляционной функции $R_{X\varepsilon}(0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, которая возникает от зарождения различных процессов в контролируемом объекте [15].

В связи с этим в этом случае формулу определения оценки $R_{gg}(\mu)$ можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 R_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) \approx \\
 &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t))(X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t)) \approx \\
 &\approx \frac{1}{N} \sum [X(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \\
 &+ X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t)] \approx \\
 &\approx R_{XX}(\mu) + R_{\varepsilon X}(\mu) + R_{X\varepsilon}(\mu) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) \approx \\
 &\approx \begin{cases} R_{XX}(0) + 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) & \text{при } \mu = 0 \\ R_{XX}(\mu) + 2R_{X\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{27}$$

Следовательно, без учета таких noise характеристик как $R_{X\varepsilon}(0)$, $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ вычислений робастных оценок корреляционных функций невозможно. Экспериментальные исследования также показали, что путем фильтрации не будет гарантировано обеспечения адекватности результатов контроля. Это связано с тем, что на практике в реальных объектах контроля достаточно часто между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ имеет место корреляция даже в течение нескольких шагов дискретизации, т.е. при $\mu = \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ [12-15].

Поэтому кроме вычисления оценки $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ также необходима разработка технологии определения оценок $R_{X\varepsilon}(0)$, $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(3\Delta t)$ взаимнокорреляционных функций между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$. При этом путем компенсации погрешностей оценок $R_{gg}(0)$, $R_{gg}(\Delta t)$, $R_{gg}(2\Delta t)$, $R_{gg}(3\Delta t)$,... можно обеспечить их робастность, т.е. равенство с соответствующими оценками полезных сигналов.

В связи с указанным ниже предлагается один из возможных вариантов обеспечения робастности соответствующих оценок корреляционных функций. В этом варианте определение таких noise характеристик как оценки $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$, $R_{X\varepsilon}(0)$, $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$ и т.д. зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$ предлагается также реализовать при помощи алгоритма на основе выражения (20).

Для этой цели рассмотрим результаты разложения правой части выражения (20) для случая, когда имеет место корреляция между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = 0$.

$$\begin{aligned}
 R'_{X\varepsilon}(\mu=0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \\
 &+ g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] \approx \\
 &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] - \\
 &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+1)\Delta t) + \varepsilon((i+1)\Delta t)] + \\
 &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+2)\Delta t) + \varepsilon((i+2)\Delta t)] = \\
 &R_{XX}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) - 2R_{XX}(\Delta t) - \\
 &- 2R_{X\varepsilon}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + \\
 &+ R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t).
 \end{aligned} \tag{28}$$

При этом если выполняются условия стационарности и нормальности закона распределения зашумленных сигналов, то для рассматриваемых объектов, можно считать справедливыми равенства:

$$\left. \begin{aligned}
 R_{X\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \neq 0 \quad R_{\varepsilon X}(0) \approx \\
 &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X(i\Delta t) \neq 0 \\
 R_{\varepsilon\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \neq 0 \\
 R_{XX}(0) + R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{XX}(\Delta t) &\approx 0 \\
 R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \approx 0 \\
 R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0 \\
 R_{X\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \approx 0 \\
 R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0 \\
 R_{\varepsilon X}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+1)\Delta t) \approx 0 \\
 R_{\varepsilon X}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \approx 0
 \end{aligned} \right\} \tag{29}$$

Следовательно, в этом случае в правой части формулы (20) получим:

$$\begin{aligned}
 R'_{X\varepsilon}(\mu=0) &\approx R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx \\
 &\approx 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0).
 \end{aligned} \tag{30}$$

Это показывает, что полученная по формулам (20), (28) оценка представляет собой оценку дисперсии помехи не только при отсутствии, но и при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$. Следовательно, ее применение для обеспечения робастности искомых оценок при нали-

чи корреляции между $X(i\Delta t)$, $\varepsilon(i\Delta t)$ справедливо, т.е.

$$R_{gg}^R(0) = R_{gg}(0) - 2R_{X\varepsilon}(0) - R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \quad (31)$$

Теперь рассмотрим возможность вычисления оценки $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$ при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = \Delta t$ по выражению:

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(\mu = \Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \\ &+ g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+1)\Delta t) + \varepsilon((i+1)\Delta t)] - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+2)\Delta t) + \varepsilon((i+2)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+3)\Delta t) + \varepsilon((i+3)\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{XX}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) - 2R_{XX}(2\Delta t) - \\ &- 2R_{X\varepsilon}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) + \\ &+ R_{XX}(3\Delta t) + R_{X\varepsilon}(3\Delta t) + R_{\varepsilon X}(3\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t). \end{aligned} \quad (32)$$

Как было показано выше, при выполнении условий стационарности и нормальности закона распределения зашумленных сигналов для случая, когда между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = \Delta t$ имеет место корреляция, считая справедливыми равенства:

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \neq 0 \\ R_{\varepsilon X}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+1)\Delta t) \neq 0 \\ R_{XX}(\Delta t) + R_{XX}(3\Delta t) - 2R_{XX}(2\Delta t) &\approx 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) \approx 0, R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0, R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &\approx 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &\approx 0 \\ R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \approx 0 \\ R_{X\varepsilon}(3\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+3)\Delta t) \approx 0 \\ R_{\varepsilon X}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \approx 0 \\ R_{\varepsilon X}(3\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+3)\Delta t) \approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

получим

$$R'_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) \approx 2R_{X\varepsilon}(\Delta t). \quad (34)$$

Следовательно, оценку $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$ можно определить по выражению:

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{2} R'_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \\ &+ g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)] + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)] \end{aligned} \quad (35)$$

При этом искомая робастная оценка определяется по формуле:

$$R_{gg}^R(\Delta t) = R_{gg}(\Delta t) - R_{X\varepsilon}(\Delta t). \quad (36)$$

Можно показать, что при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при $\mu = 2\Delta t$ аналогичным образом при помощи выражения:

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) - \\ &- 2g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+4)\Delta t)] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+2)\Delta t) + \varepsilon((i+2)\Delta t)] - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+3)\Delta t) + \varepsilon((i+3)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+4)\Delta t) + \varepsilon((i+4)\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) - \\ &- 2R_{XX}(3\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(3\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(3\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) + \\ &+ R_{XX}(4\Delta t) + R_{X\varepsilon}(4\Delta t) + R_{\varepsilon X}(4\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(4\Delta t) \end{aligned} \quad (37)$$

можно определить оценку $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$.

При этом аналогично вышеописанному можно считать справедливыми равенства:

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \neq 0 \\ R_{\varepsilon X}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \neq 0 \\ R_{XX}(2\Delta t) + R_{XX}(4\Delta t) - 2R_{XX}(3\Delta t) &\approx 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) \approx 0, R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0, R_{\varepsilon\varepsilon}(4\Delta t) &\approx 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(4\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) &\approx 0 \\ R_{X\varepsilon}(3\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+3)\Delta t) \approx 0 \\ R_{X\varepsilon}(4\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+4)\Delta t) \approx 0 \\ R_{\varepsilon X}(3\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+3)\Delta t) \approx 0 \\ R_{\varepsilon X}(4\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+4)\Delta t) \approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Следовательно, будем иметь: $R'_{X\varepsilon}(2\Delta t) \approx 2R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$, т.е.

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{2}R'_{X\varepsilon}(2\Delta t) \approx \\ &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - \\ &- 2g(i\Delta t)g((i+3)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+4)\Delta t)], \end{aligned} \quad (39)$$

$$R_{gg}^R(2\Delta t) = R_{gg}(2\Delta t) - R_{X\varepsilon}(2\Delta t). \quad (40)$$

Очевидно, что при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ при m различных временных сдвигах, т.е. при $\mu = m\Delta t$ по аналогии с выражениями (29), (32), (36) можно считать справедливыми выражения:

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(m\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+m-1)\Delta t) - \\ &- 2g(i\Delta t)g((i+m)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+m+1)\Delta t)] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+m)\Delta t) - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[g(i\Delta t)g((i+m+1)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+m+2)\Delta t)] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+m)\Delta t) + \varepsilon((i+m)\Delta t)] - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+m+1)\Delta t) + \varepsilon((i+m+1)\Delta t)] + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+m+2)\Delta t) + \varepsilon((i+m+2)\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{XX}(m\Delta t) + R_{X\varepsilon}(m\Delta t) + R_{\varepsilon X}(m\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(m\Delta t) - \\ &- 2R_{XX}((m+1)\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}((m+1)\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}((m+1)\Delta t) - \\ &- 2R_{\varepsilon\varepsilon}((m+1)\Delta t) + R_{XX}((m+2)\Delta t) + R_{X\varepsilon}((m+2)\Delta t) + \\ &+ R_{\varepsilon X}((m+2)\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}((m+2)\Delta t). \end{aligned} \quad (41)$$

Аналогичным образом для случая, когда между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ существует корреляция при $\mu = m\Delta t$, где $m = 1, 2, 3, \dots$ можно считать справедливым равенства:

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(m\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+m)\Delta t) \neq 0 \\ R_{\varepsilon X}(m\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+m)\Delta t) \neq 0 \\ R_{XX}(m\Delta t) + R_{XX}((m+2)\Delta t) - 2R_{XX}((m+1)\Delta t) &\approx 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(m\Delta t) \approx 0 \quad R_{\varepsilon\varepsilon}((m+1)\Delta t) \approx 0 \quad R_{\varepsilon\varepsilon}((m+2)\Delta t) &\approx 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(m\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}((m+2)\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}((m+1)\Delta t) &\approx 0 \\ R_{X\varepsilon}((m+1)\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+m+1)\Delta t) \approx 0 \\ R_{X\varepsilon}((m+2)\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+m+2)\Delta t) \approx 0 \\ R_{\varepsilon X}((m+1)\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+m+1)\Delta t) \approx 0 \\ R_{\varepsilon X}((m+2)\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+m+2)\Delta t) \approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$

Следовательно, принимая во внимание, что

$$R'_{X\varepsilon}(m\Delta t) \approx 2R_{X\varepsilon}(m\Delta t), \quad (43)$$

оценку $R_{X\varepsilon}(m\Delta t)$ можно определить по обобщенному выражению:

$$R_{X\varepsilon}(m\Delta t) \approx \frac{1}{2}R'_{X\varepsilon}(m\Delta t) \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t)g((i+m)\Delta t) - \quad (44)$$

$$- 2g(i\Delta t)g((i+m+1)\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+m+2)\Delta t)] \quad (45)$$

$$R_{gg}^R(m) = R_{gg}(m) - R_{X\varepsilon}(m),$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$

Очевидно, что общую формулу вычисления робастных оценок корреляционных функций можно представить в виде

$$R_{gg}^R(\mu) = \begin{cases} R_{gg}(0) - 2R_{X\varepsilon}(0) - R_{\varepsilon\varepsilon}(0) & \text{при } \mu = 0 \\ R_{gg}(\mu) - R_{X\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0 \end{cases}$$

Проведенный экспериментальный анализ зашумленных сигналов, полученных на сейсмоакустических станциях [15], на компрессорных станциях [14], на глубинных морских платформах [15, 17], на объектах нефтегазодобычи и нефтепереработки, в авиации и на биологических сигналах показал, что часто между $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ имеет место корреляция при различных временных сдвигах. Причем, на указанных экспериментах максимальный временной сдвиг не превышал $\mu = 6\Delta t$, т.е. при $\mu = 6\Delta t$ корреляция исчезала. При этом выполнялись условия стационарности, нормальности закона распределения, а также условия (27).

Благодаря этому, применение выражений (27), (30), (31), (36), (40), (45) открывает возможность путем вычитания из оценок зашумленных сигналов $R_{gg}(0)$, $R_{gg}(\Delta t)$, $R_{gg}(2\Delta t)$, $R_{gg}(3\Delta t)$... оценок noise характеристик $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$, $R_{X\varepsilon}(0)$, $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$, $R_{X\varepsilon}(3\Delta t)$... обеспечить робастность оценок корреляционных функций $R_{gg}^R(0)$, $R_{gg}^R(\Delta t)$, $R_{gg}^R(2\Delta t)$, $R_{gg}^R(3\Delta t)$.

Очевидно, что после такой коррекции полученную оценку можно считать робастной оценкой полезных сигналов.

Заключение

1. Анализ трудностей, возникающих при исключении погрешностей от влияния помехи на оценки корреляционных функций зашумленных входных-выходных сигналов контролируемых объектов, с применением традиционных методов показал, что для их совершенствования целесообразно анализировать помехи в качестве носителя полезной информации и использовать полученные результаты для коррекции.

2. В измерительно-информационных системах применяется множество методов фильтрации помехи для устранения всевозможных погрешностей зашумленных сигналов. Однако в реальных объектах помехи измерительной информации, появляются от возникновения различных неисправностей в процессе эксплуатации и отражаются на сигналах в виде шума. Причем между

ними имеется корреляция и из-за этого диапазон их спектра нередко пересекается со спектром полезного сигнала. Кроме того, их спектры не являются строго стабильными. По этим причинам в процессе фильтрации не всегда достигается желаемый результат. Иногда даже в результате фильтрации происходит искажение спектра полезного сигнала.

3. Во многих реальных объектах контроля, как правило, входные и выходные переменные являются такими физическими величинами как расход, давление, температура, скорость и т.д. Поэтому при решении множества задач контроля, диагностики и идентификации, возникает необходимость применения процедуры нормирования оценок корреляционных функций. Однако, при применении традиционных методов при этом возникает дополнительная погрешность, приводящая к нарушению адекватности результатов решения задач контроля. Учитывая это, предложены алгоритмы, которые позволяют, используя оценки дисперсии помехи, устранить погрешности процедуры нормирования.

4. Предложенные алгоритмы и технологии, позволяют определить робастные оценки корреляционных функций зашумленных случайных сигналов, равные оценкам их полезных сигналов, как для случая, когда между полезным сигналом и помехой корреляция отсутствует, так и случая, когда корреляция имеет место. Благодаря этому устраняются трудности решения многочисленных задач контроля, диагностики, идентификации с применением методов корреляционного анализа. Например, открываются возможности решения задачи контроля и идентификации технического состояния объектов контроля в реальном масштабе времени в процессе их эксплуатации. А это, в свою очередь, позволяет своевременно прогнозировать возможные аварийные ситуации и принимать меры по их устранению.

5. Предложенные алгоритмы определения робастных оценок корреляционных функций не являются универсальными, их применение эффективно для случая когда для анализируемых случайных зашумленных сигналов условия (13), (29), (33), (38) выполняются. Несмотря на это, они представляют большой практический интерес. Это связано с тем, что как показали проведенные экспериментальные исследования, в реальной жизни во многих объектах контроля, эти условия выполняются. К тому же контроль выполнения этих условий на современных измерительно-информационных системах достаточно просто реализуется.

Кроме того, в процессе эксплуатации многих объектов возникает необходимость осуществить мониторинг скрытого периода их перехода в аварийное состояние в реальном масштабе времени. В этих случаях идентификация изменения технического состояния объекта с применением традиционных методов требует много времени. Поэтому для этих случаев оказалось целесообразным осуществить мониторинг начала перехода объектов из нормального в аварийное состояние при помощи множества noise характеристик зашумленных сигналов $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), g_3(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$ таких, как

$$D_{\varepsilon_i}, \dots, R_{X_i \varepsilon_i}(0), R_{X_i \varepsilon_i}(\Delta t), R_{X_i \varepsilon_i}(2\Delta t), \dots, r_{g_i g_i}(0), r_{g_i g_i}(\Delta t), r_{g_i g_i}(2\Delta t), \dots \text{ где } i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Проведенные исследования показали, что отношение взаимнокорреляционной функции $R_{X_i \varepsilon_i}(\mu)$ к величине D_{ε_i} также служит информативным признаком для мониторинга скрытого периода зарождения аварий

$$k_{X_i \varepsilon_{i_0}} = R_{X_i \varepsilon_i}(0) / D_{\varepsilon_i}, k_{X_i \varepsilon_{i_1}} = R_{X_i \varepsilon_i}(\Delta t) / D_{\varepsilon_i}, k_{X_i \varepsilon_{i_2}} = R_{X_i \varepsilon_i}(2\Delta t) / D_{\varepsilon_i}, \dots, \text{ где } i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Таким образом, в процессе эксплуатации объектов контроля появление различных дефектов в виде износа, микротрещин, нагорообразования, деформации от усталости приводит к изменению их технического состояния, и это отражается в виде помехи $\varepsilon_1(i\Delta t), \varepsilon_2(i\Delta t), \varepsilon_3(i\Delta t), \dots, \varepsilon_m(i\Delta t)$ на сигналах $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), g_3(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$. А это в свою очередь приводит к изменению их вышеуказанных noise характеристик. Это открывает возможность применения ИИС для мониторинга начала перехода объекта в аварийное состояние при помощи множества информативных признаков, которое можно сформировать путем вычисления указанных выше оценок noise характеристик:

Для этого при нормальном функционировании объекта при помощи этого множества оценок робастных noise характеристик зашумленных сигналов в информационных системах контроля можно формировать эталонную базу знаний.

$$W_i = \begin{cases} D_{\varepsilon_1}, \dots, R_{X_1 \varepsilon_1}(0), R_{X_1 \varepsilon_1}(\Delta t), R_{X_1 \varepsilon_1}(2\Delta t), \dots, r_{g_1 g_1}(0), r_{g_1 g_1}(\Delta t), r_{g_1 g_1}(2\Delta t), \dots \\ k_{X_1 \varepsilon_{1_0}} = R_{X_1 \varepsilon_1}(0) / D_{\varepsilon_1}, k_{X_1 \varepsilon_{1_1}} = R_{X_1 \varepsilon_1}(\Delta t) / D_{\varepsilon_1}, k_{X_1 \varepsilon_{1_2}} = R_{X_1 \varepsilon_1}(2\Delta t) / D_{\varepsilon_1}, \\ D_{\varepsilon_2}, \dots, R_{X_2 \varepsilon_2}(0), R_{X_2 \varepsilon_2}(\Delta t), R_{X_2 \varepsilon_2}(2\Delta t), \dots, r_{g_2 g_2}(0), r_{g_2 g_2}(\Delta t), r_{g_2 g_2}(2\Delta t), \dots \\ k_{X_2 \varepsilon_{2_0}} = R_{X_2 \varepsilon_2}(0) / D_{\varepsilon_2}, k_{X_2 \varepsilon_{2_1}} = R_{X_2 \varepsilon_2}(\Delta t) / D_{\varepsilon_2}, k_{X_2 \varepsilon_{2_2}} = R_{X_2 \varepsilon_2}(2\Delta t) / D_{\varepsilon_2}, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ D_{\varepsilon_m}, \dots, R_{X_m \varepsilon_m}(0), R_{X_m \varepsilon_m}(\Delta t), R_{X_m \varepsilon_m}(2\Delta t), \dots, r_{g_m g_m}(0), r_{g_m g_m}(\Delta t), r_{g_m g_m}(2\Delta t), \dots \\ k_{X_m \varepsilon_{m_0}} = R_{X_m \varepsilon_m}(0) / D_{\varepsilon_m}, k_{X_m \varepsilon_{m_1}} = R_{X_m \varepsilon_m}(\Delta t) / D_{\varepsilon_m}, k_{X_m \varepsilon_{m_2}} = R_{X_m \varepsilon_m}(2\Delta t) / D_{\varepsilon_m}, \end{cases}$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, m$

Например, при функционировании ИИС в режиме мониторинга начала аварий на компрессорных станциях, на установках бурения нефтяных скважин, на морских стационарных платформах, на самолетах и т.д. изменение элементов этого множества можно воспринимать как начало перехода этих объектов из нормального в аварийное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Солодовников, В.В.** О динамической точности и оптимальных характеристиках следящих систем и преобразующих устройств / В.В. Солодовников // ДАН СССР. - 1951. - т. XXVII. - № 2. - с. 269-272.
2. **Солодовников, В.В.** Введение в статистическую динамику систем автоматического управления: В.В. Солодовников.- Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952.
3. **Солодовников, В.В.** Статистическая динамика линейных систем автоматического управления: В.В. Солодовников. М. Физматгиз, 1960.-665 с.

-
4. **Бендат, Дж.** Применение корреляционного и спектрального анализа: Дж. Бендат, А. Пирсол. - М.: Мир, 1983. - 312 с.
 5. **Gang, Li.** A novel digital filter structure with minimum roundoff noise / Gang Li, Limin Meng, Zhijiang Xu, Jingyu Hua // Digital Signal Processing. - 2010. - Vol. 20. - Is. 4. - pp. 1000-1009.
 6. **Yaseen, M.** Robust and direct design for highpass ladder wave digital filters exhibiting equiripple characteristics / M. Yaseen // Digital Signal Processing. - 2013. - Vol. 23. - Is. 3. - pp. 1059-1064.
 7. **Филимонов, Н.Б.** Алгоритмы приведения передаточных матриц к диагональной форме в задачах проектирования многосвязных САР / Н.Б. Филимонов // Тез. докл. III Всесоюз. совещ. по автоматизации проектирования САУ и АСУ ТП. - М. - Упр. уч. зав. Минэнерго СССР. - 1981. - с. 63-64.
 8. **Филимонов, А. Б.** Робастная коррекция в системах управления с большим коэффициентом усиления / А.Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, Автоматизация, Управление. - 2014. - №12. - с. 3-10.
 9. **Филимонов А.Б.** Робастная коррекция объектов регулирования / А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов // Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях. - Сб. науч. тр. -М. - Изд-во АСВ. - 1998. - с. 248-252.
 10. **Тарарькин, С. В.** Исследование влияния положительных обратных связей на робастные свойства систем автоматического управления с регуляторами состояния / С. В. Тарарькин, В.В. Аполонский, А.И. Терехов // Мехатроника, Автоматизация, Управление. - 2013. - №3. - с. 9-15.
 11. **Wiener, N.** Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series: N. Wiener. - United States: John Wiley & Sons, 1949.
 12. **Aliev, T.A.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing: T.A. Aliev. - New-York: Kluwer Acad/Plen. Publishers, 2003. - pp.199.
 13. **Aliev, T.A.** Digital Noise Monitoring of Defect Origin: T.A. Aliev. - London: Springer, 2007. - pp. 235.
 14. **Aliev, T.A.** Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state / T.A. Aliev, G.A. Guluyev, F.H. Pashayev, A.B. Sadygov // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2012. - Том 27. - с. 755-762.
 15. **Aliev, T.A.** System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes / T.A. Aliev, A.M. Abbasov, Q.A. Guluyev, F.H. Pashaev, U.E. Sattarova // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2013. - vol.32. - Is. 1. - p. 11-25.

УДК 510.52 + 519.687.4

СЛОЖНОСТЬ И КРИТЕРИИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ К ОБЛАСТИ «BIG DATA»

И.В. Некрасов

ООО «ДжиИ Рус» (General Electric Company: GE Digital),
г. Москва, Россия

COMPLEXITY OF COMPUTATIONS AND A CRITERION TO IDENTIFY THEM AS “BIG DATA” PROBLEMS

I.V. Nekrasov

LLC GE Rus, General Electric Company: GE Digital,
Moscow, Russia

ivannekr@mail.ru

Аннотация. В современных публикациях из области обработки данных, вычислительной техники, теории алгоритмов и проч. довольно часто встречается термин «big data», применяемый к задачам повышенной вычислительной трудоемкости. Однако, несмотря на популярность направления «big data», его методологическая база в настоящее время не может считаться проработанной в достаточной степени. В данной статье предложен вариант систематизации понятий в области «big data», а именно: разработаны критерии отнесения вычислительных задач к области «big data», даны определения основных терминов и границы их применения.

Ключевые слова: big data, алгоритм, вычислительная трудоемкость, теория сложности, вычислительный кластер, технология «map-reduce», закон Амадала.

Abstract. The term “big data” is widely used in modern literature to identify computational problems of high complexity in such spheres as data processing, IT, algorithms theory, etc. However, despite the research area of “big data” being extremely popular its methodological framework is far from being completely practical. This paper gives one approach how to systemize the “big data” scientific field: the criterion how to identify the problem as “big data” is suggested, the main notions of the field and their restrictions are described.

Keywords: big data, algorithm, computational complexity, computing cluster, map-reduce technology, Amdahl’s Law.

Введение

Повышение степени информатизации бизнес-процессов, а также значительное усложнение методов анализа и управления во всех сферах деятельности человека приводит в современных условиях к резкому возрастанию объемов накапливаемых и обрабатываемых данных [1]. Увеличение скорости принятия управленческих решений требует оперативной реакции на изменяющиеся внешние факторы, что приводит к ужесточению требований по точности и частоте обновления входной информации. Перечисленные факторы в совокупности с разрозненностью и слабой структурированностью поступающих данных приводят к экспоненциальному росту объема информации и резкому возрастанию времени ее обработки. При решении подобных трудоемких с вычислительной точки зрения задач классическими методами, время вычислений может достигать критических значений [2].

Поиск способов снижения времени, затрачиваемого на решение задач обработки информации, постепенно

формируется в отдельное междисциплинарное научное направление, получившее название «big data». Однако, в настоящее время отсутствует методологическая база исследований в данной области, а именно:

- не предложено четких математических критериев отнесения вычислительной задачи к области «big data»;
- не проанализированы причины возникновения задач повышенной ресурсоемкости (в том числе, причины неоправданно высокой трудоемкости некоторых задач);
- не определены термины и границы применения основных понятий (в том числе, самого термина «big data»).

Центральной проблемой, рассматриваемой в настоящей публикации, является выработка математических критериев «big data», а также выявление и классификация причин (в том числе необоснованных) повышения ресурсоемкости вычислительных задач в современных условиях.

1. Примеры возникновения ресурсоемких вычислительных задач

Проблема нехватки вычислительных ресурсов для выполнения задач обработки информации наблюдается в различных областях техники и может быть обусловлена различными причинами. Основываясь на фундаментальных понятиях теории сложности вычислений [3], можно выделить основные группы факторов, влияющих на время решения задачи:

- количество информации [3], характеризующей вычислительную задачу; заметим, что в современных условиях важным является не только битовый объем данных, но и их тип, структура и размерность, т.к. часть ресурсов ЭВМ всегда тратится на поиск информации и доступ к ней;
- физическая ограниченность мощности вычислителя, выражающаяся числовой характеристикой «максимальное количество элементарных операций в единицу времени»;
- вычислительная сложность самих применяемых алгоритмов обработки информации, характеризующаяся так называемой оценочной функцией сложности $g(n)$ [2], параметром которой является размерность входных данных n .

В настоящее время основной причиной возникновения задач «big data» считается возрастание количества информации, обусловленное повышением объема, скорости поступления и разнообразия данных [4]. Типы задач «big data» в целом соответствуют трем названным причинам их возникновения, получившим название «концепции трех V» [5]. Название концепции происходит от первых букв англоязычных терминов, соответствующих названным факторам:

- **Volume (объем)**: прямое следствие повышения информатизации процессов, связанное с простым увеличением количества наблюдаемых переменных и факторов, а также с повышением степени их детализации. Ярким примером задачи «big data», выросшей из условия «Volume», является SCADA-система на крупном промышленном объекте [6]: атомная электростанция, разветвленная сеть трубопроводов, нефтегазовое месторождение, горно-металлургический комбинат и т.п.
- **Velocity (скорость)**: высокая изменчивость наблюдаемых параметров требует повышения частоты дискретизации для обеспечения точности измерений. Примером могут служить высокочастотные стратегии биржевой игры с высокоскоростным принятием решения; ряд задач обработки входных данных в реальном времени [7];
- **Variety (разнообразие)**: данный параметр имеет определяющее влияние в задачах обработки разнородной информации, поступающей из разных источников (текстовая информация, XML-файлы, базы данных и т.п.). К подобному классу задач могут быть отнесены задачи анализа текстов, сбор и оценка сообщений пользователей сети Internet и т.п.

Очевидно, что **фактор ограниченности ресурсов ЭВМ** имеет прямое влияние на время решения вычислительной задачи [2], однако не имеет отношения к

проблеме объема информации. С другой стороны, **некорректный выбор алгоритмов** и схем вычисления может резко увеличить количество операций (и тем самым машинного времени), требующихся для выполнения одной и той же полезной работы [8]. **В результате, сочетание указанных обстоятельств зачастую приводит к видимости возникновения задачи «big data».** Как показано ниже, выбор разумного сочетания программных и алгоритмических средств, а также соизмерение физических возможностей оборудования и потребностей задачи, в ряде случаев позволяет успешно осуществлять вычисления классическими методами, избегая необоснованного отнесения решаемой задачи к области «big data».

2. Критерий оценки задач «big data»

В общем случае, к области «big data» могут быть отнесены все вычислительные задачи для ЭВМ, решение которых не может быть найдено за приемлемое машинное время. Как обсуждалось выше, время, затрачиваемое на расчет, определяется несколькими обстоятельствами: вычислительная мощность оборудования, объем обрабатываемой информации, эффективность применяемых алгоритмов. При **использовании времени расчета в качестве опорной критической характеристики** вычислительной задачи, появляется возможность связать рассмотренные факторы (точнее, их числовые характеристики) в единую систему параметров и сформировать на их основе технический критерий применимости термина «big data».

Задавшись предельно допустимым значением времени вычисления T_{\max} [сек] и зная такие основные параметры системы, как производительность используемой ЭВМ P [оп/сек] и ресурсоемкость применяемых программно-алгоритмических средств C [оп/ед.инф], легко определить границу реализуемости решения задачи обработки информации заданного объема V [ед.инф] с заданными характеристиками эффективности. На основании характеристик вычислительной системы определим ее совокупную скорость обработки информации:

$$S = \frac{P}{C} \left[\frac{\text{ед.инф}}{\text{сек}} \right], \quad (1)$$

где S – скорость обработки данных в информационной системе, [ед.инф/сек]; P – производительность вычислительного оборудования системы, [оп/сек]; C – ресурсоемкость программно-алгоритмических средств системы, [оп/ед.инф].

Зная объем данных, который необходимо обрабатывать в вычислительной системе, оценим время обработки:

$$T = \frac{V}{S} [\text{сек}], \quad (2)$$

где V – объем информации, который должен быть обработан системой [ед.инф]; T – время, требующееся для обработки заданного объема данных, [сек].

При условии корректной постановки вычислительной задачи и допустимого выбора программно-аппаратных средств ее решения должно выполняться следующее неравенство:

$$T \leq T_{\max} . \quad (3)$$

Рассматривая неравенство (3) в качестве границы применимости выбранной вычислительной системы для решения поставленной задачи обработки информации, можно утверждать, что *критерий отнесения задачи к области «big data» является гибким и зависит от конкретных совокупных характеристик применяемых технических решений*, см. формулы (1–3). Заметим, что здесь под термином «вычислительная система» понимается совокупность аппаратных, программных и алгоритмических средств, используемых для организации вычислительного процесса. Таким образом, по результатам проведенных рассуждений выработан следующий критерий отнесения вычислительной задачи к области «big data».

Критерий «Big Data»: задача обработки информации относится к области «big data», если выбранные средства и методы поиска ее решения не позволяют найти это решение за отведенное время, т.е. условие (3) не выполняется. Вычисление критерия на основе параметров вычислительной системы осуществляются по формулам (1 – 3).

3. Вывод определения «big data»

Осуществляя вычисления (1 – 3) в обратной последовательности можно определить максимальный объем данных, который может быть обработан вычислительной системой за отведенное время:

$$V_{\max} = S \cdot T_{\max} [ед. инф]. \quad (4)$$

Таким образом, критерием корректности постановки задачи для вычислительной системы является следующее неравенство:

$$V \leq V_{\max} . \quad (5)$$

В случае, когда обработка данных ведется в режиме реального времени, а обрабатываемая информация обновляется с заданной частотой V , критерий (5) необходимо переписать относительно скорости обновления:

$$V \cdot v \leq S , \quad (6)$$

где v – частота обновления входной информации системы, $[1/сек]$; V – объем информации, поступающий за каждый такт обновления $[ед. инф]$; S – скорость обработки данных в информационной системе, $[ед. инф/сек]$.

Принимая критерии (5) и (6) в качестве формул вычисления предельных нагрузок на вычислительную систему, выведем определение «big data», специфичное для каждой конкретной задачи и применяемой вычислительной системы.

Определение «Big Data»: структура данных, объемом или скоростью поступления которых превышает некоторое критическое значение, определяемое предельно допустимым временем решения задачи их обработки, а

также текущей конфигурацией технических, математических и программных средств, применяемых для решения этой задачи. Т.е. «big data» – структура данных, для которой в заданной информационной системе не выполняются критерии (5) или (6).

4. Методы решения ресурсоемких задач

Развитие подходов к решению задач повышенной вычислительной трудоемкости ведется во все трех основных направлениях, перечисленных выше.

Развитие аппаратных средств вычисления является в настоящее время одним из наиболее интенсивных [9, 10]. Улучшение технических характеристик элементной базы выражается в совершенствовании производимых и применяемых вычислителей, ЭВМ, модулей памяти, хранилищ данных и проч. График развития технических параметров вычислительных ЭВМ [9, 10] представлен на рис. 1.а-б.

Анализ графиков развития характеристик вычислительного оборудования выявляет замедление тренда и показывает ограниченность физических возможностей ЭВМ. Частичное снижение критичности физических ограничений возможно за счет развития программных и алгоритмических средств.

Совершенствование программных средств включает выбор платформы вычислений (операционная система, язык программирования), а также методов упаковки, хранения и доступа к данным (протоколы обмена, форматы данных и т.п.). Наиболее популярной точкой развития является применение технологий распределенных или кластерных вычислений [11]. Не останавливаясь на многочисленных частных решениях, упомянем основную идею распределенных вычислений – *технологии «map-reduce»* [12], основными элементами которой являются:

- разделение данных на группы, их раздельное хранение и обработка на разных вычислителях (узлах вычислительной сети) – *технология «map»* (пер.с англ.: разделение, распределение, привязка);
- объединение результатов, полученных для каждой отдельной группы данных на отдельном узле сети – *технология «reduce»* (пер.с англ.: уменьшение, снижение, упаковка).

Основная схема применения технологии «map-reduce» представлена на рис.2.

Следует заметить, что эффективность внедрения распределенных вычислений также непостоянна и сильно зависит от структуры вычислительной задачи. Большинство задач, встречающихся на практике, имеют весьма ограниченную способность к распараллеливанию вычислений, т.к. выполнение последующих этапов вычислений зачастую строится на результатах предыдущих стадий [13]. Дополнительно, при увеличении количества узлов кластера значительная часть ресурсов ЭВМ тратится на управление самим процессом распараллеливания вычислений [11]. Таким образом, рост производительности параллельных вычислений при увеличении количества процессоров асимптотически ограничен законом Амдала [14], причем жесткость ограничения напрямую зависит от доли последовательных зависимых вычислений в программе (см.рис.3).



Рис.1-а. Развитие аппаратных средств на примере ЦП Intel

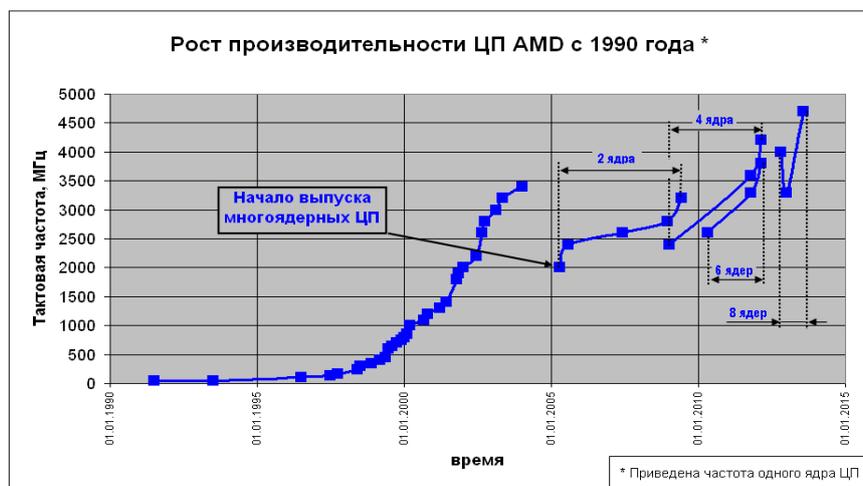


Рис.1-б. Развитие аппаратных средств на примере ЦП AMD

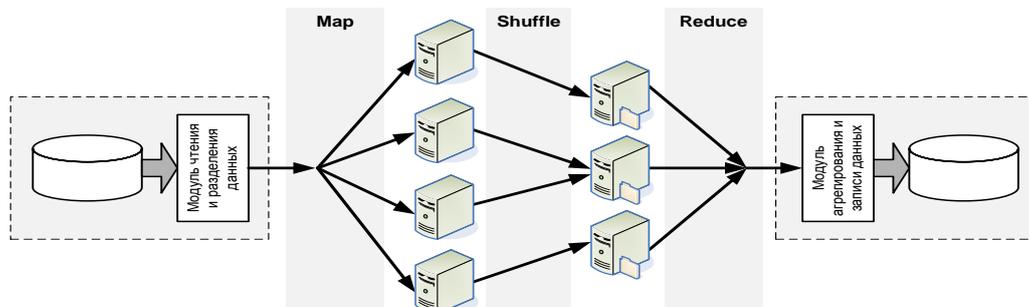


Рис.2. Обработка данных по технологии «map-reduce»

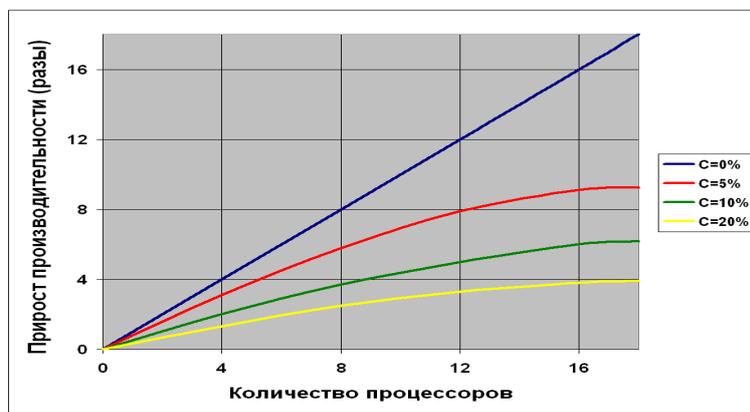


Рис.3. Эффективность распараллеливания вычислительной задачи

Эффективность наращивания мощности ЭВМ

Сложность алгоритма	Предельная размерность задачи, решаемой на условной ЭВМ за время T	Предельная размерность задачи при решении на ЭВМ в 10 раз более мощной (за время решения T)	Предельная размерность задачи при решении на ЭВМ в 100 раз более мощной (за время решения T)
Линейная n	N_1	$10 \cdot N_1$	$100 \cdot N_1$
Полиномиальная – квадратичная, n^2	N_2	$3.16 \cdot N_2$	$10 \cdot N_2$
Полиномиальная – кубическая, n^3	N_3	$2.15 \cdot N_3$	$4.64 \cdot N_3$
Экспоненциальная (2^n)	N_4	$N_4 + 3.32$	$N_4 + 6.64$

На рис.3 переменной c обозначена доля последовательных операций в общем коде выполняемой программы ЦП.

Развитие алгоритмической (математической) составляющей определяется совокупностью применяемых методов вычислений, алгоритмов, способов организации процесса обработки и т.п. Данное направление позволяет не только найти новые методы решения задач «big data», но и призвано структурировать процедуру обоснованного применения разработанных методик, а также определить целесообразность использования классических методов (где это возможно), в том числе за счет:

- корректной постановки вычислительных задач;
- поиска допущений, позволяющих упростить исходную задачу;
- поиска эффективных с ресурсной точки зрения алгоритмов, в том числе с применением искусственного интеллекта [15];
- применения методов обобщения и представления исходных данных задачи (аппроксимация, построение аналитических и эмпирических моделей, вывод экспертных правил и т.п.).

Вид функции временной сложности выбранного алгоритма играет определяющую роль в формировании итоговой трудоемкости задачи. В частности, применение алгоритмов, обладающих максимальной вычислительной трудоемкостью (экспоненциальной сложностью), делает вычислительную систему практически нечувствительной к наращиванию физических параметров ЭВМ [2]. В табл.1 представлено падение эффективности наращивания вычислительной мощности в системе при увеличении трудоемкости применяемого алгоритма обработки информации [2].

Перечисленные направления развития методов решения ресурсоемких задач формируют набор основных средств, именуемых «сервисы «big data».

Определение: Сервисы «Big Data» – совокупность технических (hardware), математических (middleware) и программных (software) средств для эффективной обработки сверхбольших, быстроменяющихся и быстрорастущих объемов разнородной, слабоструктурированной информации. Целесообразность применения сервисов «big data» определяется критерием (5 – 6).

Заключение

В настоящей работе проведен обзор методов и средств «big data», а также **сформулированы основные определения и понятия**, применяемые в данной области. Важным результатом являются **расчетные формулы**, позволяющие оценить сложность реализации каждой конкретной вычислительной задачи, а также определить ее принадлежность к области «big data». Выявлено, что принадлежность задачи к области «big data» определяется не только объемом обрабатываемых данных, но и характеристиками оборудования, а также эффективностью применяемых алгоритмов и вычислительных схем. В процессе исследования предложена **методика оценки принадлежности задачи к области «big data»**, центральным элементом которой является процедура сопоставления требований к времени решения и возможностей вычислительной системы.

Проведенные исследования базируются на **комплексном понятии вычислительной системы** как совокупности аппаратных, программных и алгоритмических средств, используемых для организации вычислительного процесса. Данный подход позволяет понять **обоснованность применения методов «big data»**, а также избежать ошибочного отнесения конкретной задачи к данной области вследствие некорректной постановки задачи, неверного выбора оборудования и неприменимых для заданных условий алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дэниел О’Лири.** ERP системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия. Выбор, внедрение, эксплуатация. / Пер. с англ. Ю.И. Водяновой. – М.: ООО «Вершина», 2004г. – 272с.
2. **Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж.** Построение и анализ вычислительных алгоритмов. / Пер. с англ. А.О. Слисенко. – М.: Мир, 1979г. – 536с. (с.11 – 15)
3. **Колмогоров А.Н.** Теория информации и теория алгоритмов. – М.: Наука, 1987г. – 304с. (с.25 – 27)
4. **Manyika J., Chui M., Brown B. and others.** Big data: the next frontier for innovation, competition and productivity. – McKinsey Global Institute, 2011. – 156p.

-
5. **Laney Douglas.** 3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity and Variety. – Gartner (Meta Group Inc.), 6 February 2001.
 6. **Андреев Е.Б., Куцевич Н.А., Синенко О.В.** SCADA-системы: взгляд изнутри. – М.: Издательство «РТСофт», 2004г. – 176с.
 7. **Лукьяница А.А, Шишкин А.Г.** Цифровая обработка видеоизображений. – М: «Ай-Эс-Эс Пресс», 2009. – 518с.
 8. **Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж.** Структуры данных и алгоритмы. / Пер. с англ. А.А. Минько. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2000г. – 384с.
 9. Официальный сайт компании Intel: <http://www.intel.com/pressroom/kits/quickrefyr.htm>
 10. Официальный сайт компании AMD: <http://www.amd.com/us/innovation/Pages/innovations-we-pioneer.aspx>
 11. **Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.** Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002г. – 608с.
 12. **Jimmy Lin, Chris Dyer.** Data-Intensive Text Processing with MapReduce. – University of Maryland, 2010. – 175р.
 13. **Богачев К.Ю.** Основы параллельного программирования. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003г. – 342с. (с.10 – 21)
 14. **Hill Mark D., Marty Michael R.** Amdahl's Law in the Multicore Era. / University of Wisconsin-Madison, IEEE Computer Society, July, 2008
 15. **Люггер Д.Ф.** Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. – М: Изд. дом «Вильямс», 2003г. – 864с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

С.С. Нежинских

УНПК «Международный Университет Кыргызстана», г. Бишкек, Киргизия

APPLICATION OF THE TECHNOLOGY OF SELF-ORGANIZING NEURAL NETWORKS IN THE PROBLEM OF MEDICAL DIAGNOSIS

S.S. Nezhinskikh

International University of Kyrgyzstan, Bishkek, Kyrgyzstan

nezhinskikh.sergei@gmail.com

Аннотация. Метод самоорганизации нейронной сети, предложенный в работе [1], использован для решения задачи диагностики трудной интубации. Топология нейронной сети создается автоматически, с учётом «сшивания» её элементов по валидационному признаку. Разработанный медицинский классификатор позволяет повысить качество диагностики трудной интубации за счёт накопленного опыта специалистов с долгой врачебной деятельностью. Система прошла опытную эксплуатацию в Научном центре реконструктивно-восстановительной хирургии при Министерстве Здравоохранения КР, подтвердившую её эффективность.

Ключевые слова: нейронные сети; метод самоорганизации; медицинская диагностика.

Abstract. The method of self-organizing neural network proposed in [1], used to solve the diagnostic problem of difficult intubation. The topology of the neural network is created automatically, taking into account the "stitching" of its elements on the basis of the validation. Designed by a medical classifier can improve the quality of diagnosis difficult intubation due to the experience of specialists with a long medical practice. The system has been in trial operation of the Scientific Center of Reconstructive Surgery at the Ministry of Health of the Kyrgyz Republic, which confirmed its effectiveness.

Keywords: neural networks; self-organization method; medical diagnostics.

Актуальность работы

Повсеместная компьютеризация медицинских учреждений, а также увеличение производительности вычислительных систем позволили использовать нейронные сети в области медицинской диагностики. Эффективность использования современных интеллектуальных методов принятия решений в задачах диагностирования медицинских заболеваний заключается в том, что модель, построенная на нейронной сети, может работать с большим количеством параметров, влияние которых достаточно сложно оценить на конечную формулировку диагноза. Нейронные сети способны принимать решения, которые основаны на выявляемых ими скрытых закономерностях в массивах данных.

Главная проблема решения задач с использованием технологий нейронных сетей заключается в формировании топологии нейронной сети, потенциально способной решить поставленную задачу. Как правило, в процессе обучения нейронной сети с выбранной топологией, успех решения задачи зависит от того насколько удачно была выбрана данная топология и насколько удачно было выбрано множество начальных коэффициентов обучения нейронной сети. В случае если выбранная топология сети не смогла решить поставленную задачу, то, обычно, выполняют следующие типовые действия:

1. Изменяется множество начальных коэффициентов для обучения до тех пор, пока не будет достигнут результат обучения сети. Если результат не удаётся

достигнуть, то, как правило, выполняется второй этап.

2. Усложняется топология нейронной сети, и затем повторяется первый этап.

Этот процесс может занимать длительное время интеллектуальной работы исследователя и зависит от его интуиции и не всегда приводит к успеху решения задачи.

В работе предлагается использовать метод формирования топологии нейронной сети [1] для синтеза классификатора диагностирования трудной интубации (медицинская процедура введения трубки в трахею).

Метод основан на добавлении в существующую структуру нейронной сети типового фрагмента, не ухудшающего суммарный показатель качества работы сети в процессе решения выбранной задачи. Тем самым, второй этап выполняемый, обычно, исследователем, заменяется автоматизированным выбором усложнённой топологии, а коэффициенты нейронной сети, полученные в результате её обучения на предыдущем этапе, сохраняются и переходят в следующий этап оптимизации. Таким образом, предполагается, что суммарный показатель качества настройки сети будет постоянно уменьшаться с усложнением топологии нейронной сети. При этом «накопленный опыт» уменьшения суммарного показателя качества настройки сети будет использоваться в последующем при усложнении топологии сети для решения конкретной задачи.

Постановка задачи

Необходимо создать модель классификатора, способного выявлять трудность интубации во время проведения общей анестезии.

Под термином «интубация» понимается введение специальных трубок в трахею или бронхи при общей анестезии (эндотрахеальный, эндобронхиальный наркоз) и в комплексе реанимационных мероприятий для осуществления искусственной вентиляции легких [5,6].

Приведём краткое описание метода, предложенного в работе [1]. Процесс самоорганизации топологии нейронной сети связан с главным показателем настройки сети – *интегрированной ошибкой* её обучения. В процессе самоорганизации топологии нейронной сети интегрированная ошибка обучения не должна увеличиваться в дискретные моменты времени, когда принимается решение усложнить топологию. Это позволяет учитывать предыдущий опыт настройки нейронной сети, сохраняя её предыдущую структуру и настроенные коэффициенты в ней, для следующего этапа настройки с измененной структурой.

Таким образом, для организации *процесса эволюции топологии нейронной сети* необходимо решить

следующие задачи:

1. Создать типовые фрагменты нейронной сети, не увеличивающие интегрированную ошибку её обучения при соединении их с первоначальной конфигурацией структуры.
2. Определить дискретные моменты времени, когда необходимо усложнить топологию сети.
3. Определить правила самоорганизации нейронной сети (т.е. точки подключения типовых фрагментов к исходной структуре сети) в процессе решения конкретной задачи.

Схема метода эволюции топологии нейронной сети

1. *Разработка типовых фрагментов (элементов) нейронной сети.* В качестве типовых фрагментов нейронной сети предназначенных для добавления в исходную конфигурацию, в [1] предложены следующие схемы:

- добавление нейрона параллельно в заданный слой (рис. 1);
- формирование нового слоя сети (рис. 2).

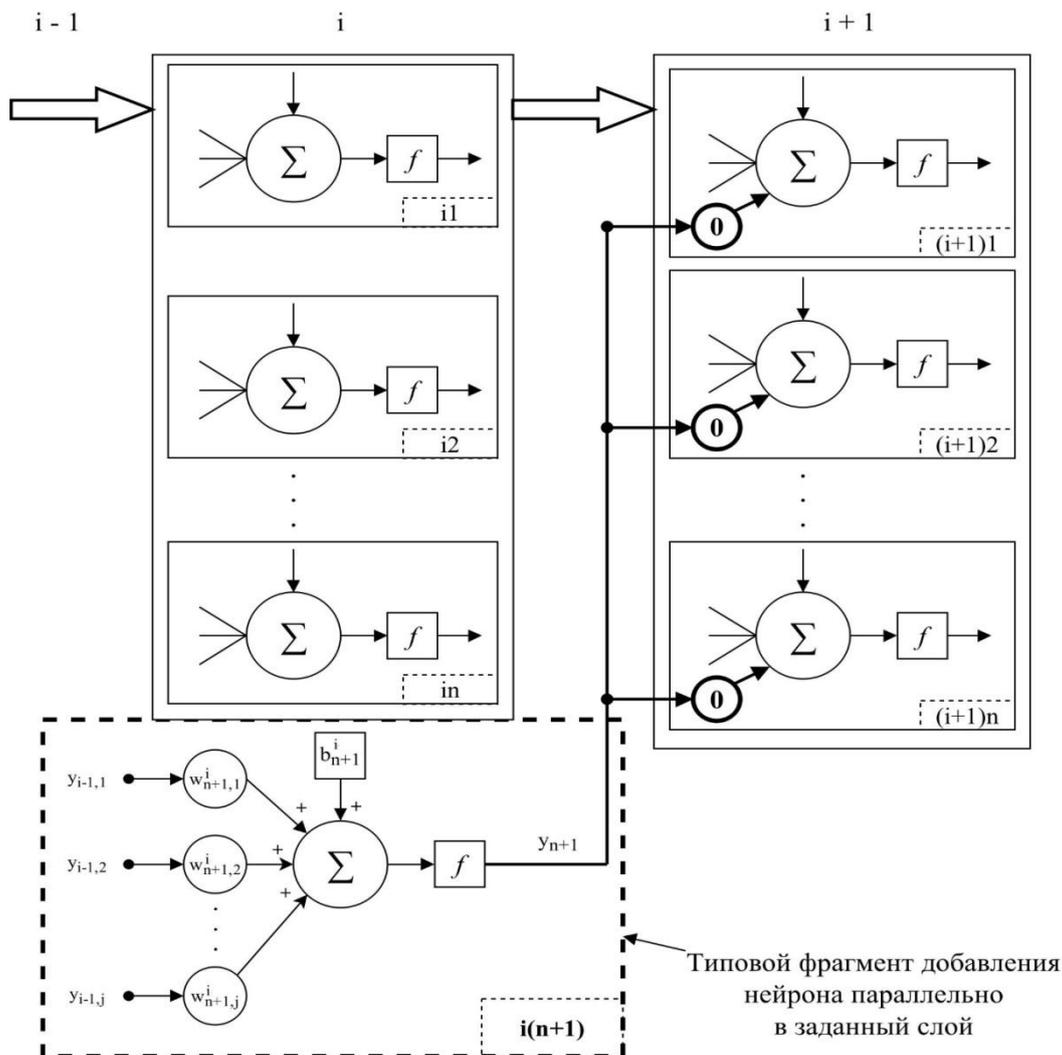


Рис. 1. Схема добавления нового нейрона параллельно в слой:

i – номер слоя, в который добавляют нейрон; n – количество нейронов в слое; f – заданная функция активации нейрона; w – настраиваемый коэффициент; y – выход нейрона; j – количество нейронов в слое $i - 1$

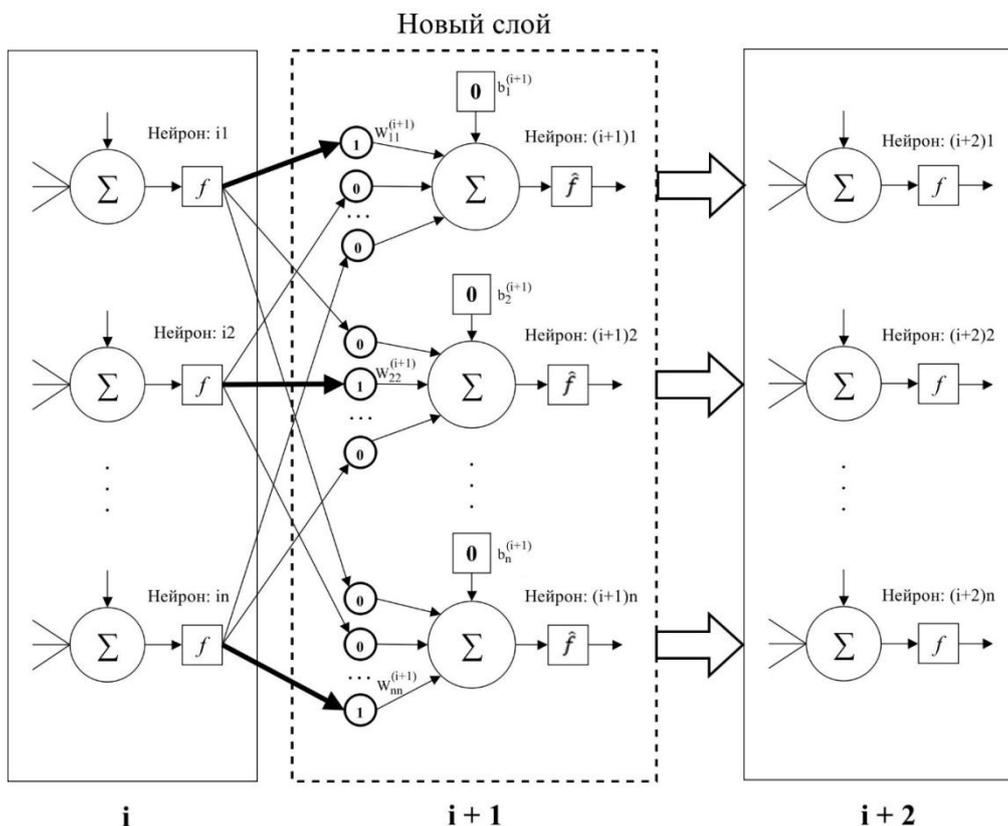


Рис. 2. Схема добавления нового ($i + 1$) слоя

Как видно из рисунков, в первом случае (рис. 1) передаточная функция типового фрагмента сети равна нулю, а во втором случае (рис. 2) равна единице. При этом функции активации \hat{f} ($i + 1$) слоя (рис. 2) должен иметь вид линейной функции с насыщением. Как видно из структуры типовых фрагментов (рис. 1, 2), будучи включёнными в сеть, предложенные фрагменты, не изменят общую передаточную функцию сети до их настройки в следующей фазе обучения.

2. *Определение дискретных моментов времени эволюции сети.* Задача определения дискретных моментов времени, когда необходимо усложнять топологию сети может быть решена, например, путём контроля порога интегрированной ошибки обучения нейронной и одновременного контроля порога градиента ошибки обучения сети. Если эти показатели не изменяются в течение нескольких эпох обучения, а система при этом считается необученной, то процесс обучения следует прервать и усложнить топологию. Как правило, проверка этих же условий и останавливает процесс обучения нейронной сети в большинстве типовых случаях, если достигнуты пороги обучения [2].

3. *Определение правил самоорганизации нейронной сети.* Этот этап предлагаемого метода является наиболее неформальным и может быть выполнен различными способами. Один из возможных способов усложнения топологии нейронной сети приведён ниже.

Синтез нейросетевого классификатора трудности интубации

Интубация трахеи является потенциально инвазивной процедурой, которая требует большого клинического

опыта [7]. Если интубация выполняется ненадлежащим образом, то связанные с ней осложнения могут быстро привести к смерти пациента [8]. Однако интубация трахеи зарекомендовала себя как наиболее эффективный способ обеспечения проходимости дыхательных путей по сравнению с другими методами механической вентиляции легких [9,10,11].

Задачей работы нейронной сети будет определение уровня сложности проведения процедуры интубации – 0 «интубация без осложнений», 1 «сложная интубация». Для построения эффективного классификатора необходимо выявить, как параметры исходных данных влияют на принятие решения о том, к какому классу принадлежит пациент.

В статье для обучения классификатора были использованы данные, полученные в Чуйской областной больнице (г. Бишкек, Кыргызстан) при подготовке и проведении хирургических операций.

В таблице 1 представлена структура базы пациентов, вышеуказанного медицинского учреждения. Количество записей соответствует 274 пациентам.

Предобработка данных

Нормализация данных является одной из распространенных форм предварительной обработки входов нейронной сети. Из таблицы 1 видно, что многие параметры обучающего вектора имеют семантически различные значения, например, возраст (количество лет), горизонтальная длина нижней челюсти (см), индекс массы тела ($\text{кг}/\text{м}^2$). Необходимо отметить, что большие значения не являются более значимыми относительно малых.

Структура базы данных пациентов

№	Параметр	Ед. измерения	Пациент 1	Пациент 2	...	Пациент 274
1	Индекс массы тела	кг/м ²	22.23	18.73	...	41.92
2	Анамнез	число	0	0		1
3	Открытие рта	мм	40	35		40
4	Класс Маллампати	число	2	1		3
5	Расстояние Патила	см	7.5	8		7
6	Размер шеи (в обхвате)	см	34	29		68
7	Расстояние подбородок-грудина	см	19	14.5		15
8	Разгибание шеи	число	0	0		1
9	Горизонтальная длина нижней челюсти	см	10	9		13
10	Состояние зубов	число	0	0		1
11	Размер и подвижность языка	число	0	0		0
12	Микрогнатия / Ретрогнатия	число	0	0		0
13	Подвижность нижней челюсти	число	0	0		1
14	Подвижность гортани	число	0	0		1
15	Исход процедуры	Число	0	0	...	1

Применяя простое линейное преобразование [3], относительные значения для всех компонент входного вектора можно привести к единому диапазону. Для этого, для каждой компоненты входного вектора независимо рассчитываются среднее значение \bar{x}_i и дисперсия $\bar{\sigma}_i^2$:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^n; \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^n - \bar{x}_i)^2. \quad (2)$$

Здесь $x^n = (x_1^n, \dots, x_N^n)$ – вектор из обучающей выборки $\{x^n\}$. Используя (1) и (2), получим новый нормализованный входной вектор $\tilde{x}^n = (\tilde{x}_1^n, \dots, \tilde{x}_N^n)$, где

$$\tilde{x}_i^n = \frac{x_i^n - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

Таким образом, новое преобразованное значение \tilde{x}^n будет иметь нулевое среднее значение и единичную дисперсию.

После предобработки данных по формулам (1-3), получена нормализованная таблица 2, предназначенная для подачи в нейронную сеть.

Создание модели самоорганизующейся нейронной сети

Синтез нейросетевого классификатора осуществим с использованием метода формирования топологии самоорганизующейся нейронной сети [1,4]. Разделим исходные данные на три группы: обучающую, валидационную и тестирующую, - это позволит устранить эффект переобучения [2]. Обучающая группа данных будет использована для настройки весов и смещений нейронной

сети, валидационная - для расчёта интегрированной ошибки обучения сети, а тестирующая группа будет использована для контроля качества прогноза обученной модели. При этом тестирующая группа не будет использована для обучения нейронной сети.

Ниже приведён алгоритм самоорганизации нейронной сети [4]:

- **Первый шаг.** Необходимо задать максимальную сложность топологии сети. Построение топологии начинается с одного нейрона, для которого задаются начальные веса w_{1x}^1 (где верхний индекс – номер слоя; нижний индекс – номер нейрона соединённый с x – индексом веса) и смещение b_1^1 , где верхний индекс – номер слоя, нижний индекс – номер нейрона в слое.

- **Второй шаг.** В дополнение к контролю интегрированной ошибки E_n (где n – номер эпохи), процесс обучения будет завершён, если интегрированная ошибка сети при обучении на валидационной группе данных E_n^{val} будет увеличиваться по отношению к E_n в течении 6 эпох. Дальнейшая последовательность действий соответствует используемому методу.

- **Каждый последующий шаг.** Параллельно в проверяемый слой добавляется один нейрон, при этом необходимо учитывать заданную максимальную сложность топологии нейронной сети. Если количество нейронов в проверяемом слое равно двум, то добавляется новый слой с одним нейроном и параметрами $b_1^{l+1} = 0$, $w_1^{l+1} = [1 \ 0]$. В течении одной итерации разрешено добавить один нейрон и/или один слой.

При этом запоминается конфигурация нейронной сети Net_i (где i – индекс точки эволюции), при которой интегрированная ошибка E_n была улучшена. Если E_n не изменялась в течении 6 эволюций сети, то текущая топология сети считается избыточной: конфигурация

Нормализованный вид исходных данных

№	Параметр	Запись 1	Запись 2	...	Запись 274
1	Индекс массы тела	1.1230	1.0190	...	-0.9324
2	Анамнез	-0.6523	1.5274		-0.6523
3	Открытие рта	-0.8347	0.3306		0.4860
4	Класс Маллампаги	1.4982	-0.2412		1.4982
5	Расстояние Патила	-0.2541	-1.1731		0.6649
6	Размер шеи (в объёме)	-0.2720	-0.1833		-0.4495
7	Расстояние подбородок-грудина	0.4364	-0.1392		0.4364
8	Разгибание шеи	-0.6866	-0.6866		-0.6866
9	Горизонтальная длина нижней челюсти	-1.9895	1.4639		0.4279
10	Состояние зубов	1.6719	-0.5959		-0.5959
11	Размер и подвижность языка	1.5966	-0.6240		-0.6240
12	Микрогнатия / Ретрогнатия	-0.6410	-0.6410		-0.6410
13	Подвижность нижней челюсти	1.5408	-0.6467		-0.6467
14	Подвижность гортани	1.7899	1.7899		-0.5567
15	Заключение эксперта	0	0	...	1

сети возвращается к последней успешной $Net_{current} = Net_i$, а количество нейронов в текущем слое в последующих шагах не изменяется.

Исходные данные были разделены следующим образом: обучающая выборка составила 80% от исходного количества, валидационная – 15%, тестирующая – 5%.

Множители максимальной сложности сети заданы в виде вектора состоящего из двух чисел [2.0 0.5], где первое число (2.0) является множителем для количества входов x нейронной сети; полученное произведение ограничит максимальное количество нейронов в первом слое ($N_{max}^1 = 14 * 2 = 28$). Второе число (0.5) используется в качестве множителя расчёта максимального количества нейронов в каждом последующем слое нейронной сети. Например, во втором слое максимальное количество нейронов равно $N_{max}^2 = N_{max}^1 * 0.5 = 14$. Начальная топология нейронной сети состоит из одного нейрона с функцией активации f – гиперболический тангенс. Начальные значения для данного нейрона заданы в виде: $b_1^1 = [0.63]$, $w_1^1 = [-0.43 -0.73 0.09 -0.88 -0.93 -0.43 0.24 0.35 0.26 0.75 -0.50 -0.59 -0.07 0.49]$. При достижении порога $\bar{E} = 0.01$, либо достижении максимальной сложности топологии, сеть будет считаться обученной.

На восьмой эпохе, первый этап обучения сети методом «обратного распространения ошибки» [3] был прерван, так как интегрированная ошибка сети на валидационной группе увеличивалась с 8 по 14-ую эпоху. Сеть считалась необученной, так как интегрированная ошибка нейронной сети уменьшилась с величины $E_0 = 1.25$ до $E_6 = 0.03$, не достигнув заданного порога \bar{E} .

В соответствии с описанной процедурой, на втором этапе в нейронную сеть были добавлены два нейрона – один параллельно в первый слой, второй в новый слой. На данном этапе эволюции сети, значение интегрированной ошибки E_{14} достигло значения 0.009, что удовлетворяет целевому пороговому уровню \bar{E} . Обучение нейронной сети было завершено.

На рисунке 3 приведён график изменения интегрированной ошибки обучения сети в процессе её эволюции.

На рисунке 4 приведены информационные матрицы, демонстрирующие эффективность работы обученной сети для каждого множества данных. Как видно из рисунка 4, для валидационного множества, общее количество записей составило 42. Из них, 15 записей имеют целевой класс 0 («интубация без осложнений»), а 27 записей – 1 («сложная интубация»). После тестирования обученного нейросетевого классификатора были получены следующие результаты:

- к целевому классу «0» были отнесены 14 записей, то есть 93.3%, соответственно 1 запись (6.7%) была ошибочно отнесена к классу «1»;
- к целевому классу «1» были отнесены 26 (96.3%) из 27 целевых записей.

Общее количество правильно классифицированных записей равно 270, что соответствует 95.2%.

Эффективность работы обученной нейронной сети на исходной выборке составила 98.5%, что является приемлемым результатом. Этот факт позволяет использовать классификатор в медицинских целях.

Заключение

В работе использован метод самоорганизации нейронной сети [1,2] для создания медицинского классификатора. При этом методика самоорганизации топологии нейронной сети была модифицирована автоматическим «сшиванием» компонентов сети по валидационному признаку. Ранняя остановка обучения нейронной сети, привела к эффективному определению дискретных моментов времени эволюции сети, тем самым позволила устранить эффект переобучения.

Система прошла опытную эксплуатацию в Научном центре реконструктивно-восстановительной хирургии при Министерстве Здравоохранения КР, подтвердившую её эффективность.

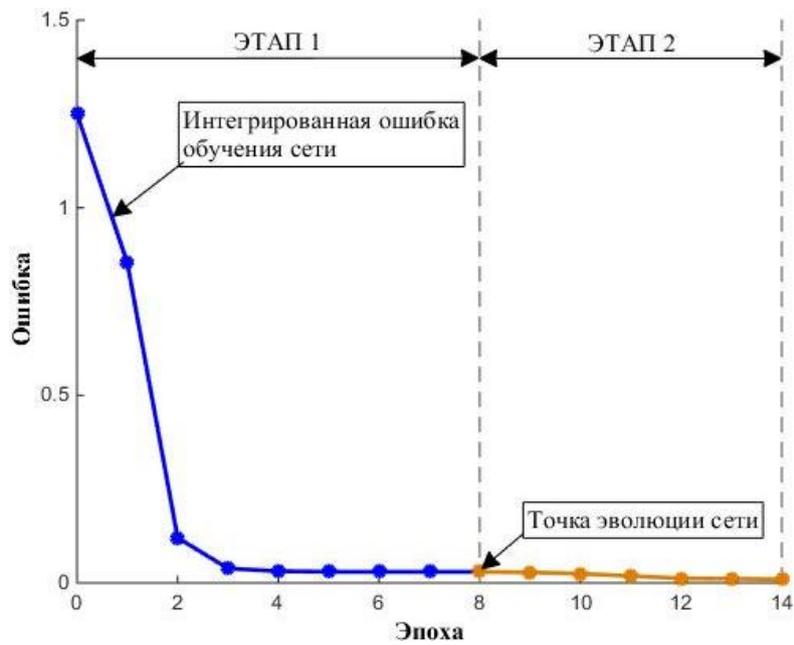


Рис. 3. Динамика изменения интегрированной ошибки обучения сети



Рис. 4. Таблицы сопряженности результата обучения нейронной сети

ЛИТЕРАТУРА

1. **Миркин, Е.Л.** Метод формирования топологии самоорганизующейся нейронной сети в процессе её обучения [Текст] / Е.Л. Миркин, С.С. Нежинских // Проблемы автоматки и управления №2. – Бишкек, 2014. – С. 28 – 36.
2. **Саймон Хайкин.** Нейронные сети. Полный курс. [Текст] / Саймон Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
3. **Аксенов, С.В.** Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) [Текст] / С.В. Аксенов, В.Б. Новосельцев. – Томск: НТЛ, 2006. – 128 с.
4. **Нежинских, С.С.** Использование метода самоорганизации нейронной сети для задачи медицинской диагностики [Текст] / С.С. Нежинских // Проблемы автоматки и управления №2. – Бишкек, 2014. – С. 37 – 46.
5. **Бунятян, А.А.** Анестезиология и реаниматология [Текст] / А.А. Бунятян, Г.А. Рябов, А.З. Маневич. – М.: Медицина, 1984. – 282 с.
6. **Руководство по анестезиологии** : руководство / под ред. проф. Т. М. Дарбиняна. – М.: Медицина, 1973. – 558 с.
7. **Cormac, RS.** Difficult intubation in obstetrics / Cormack RS, Lehane J. – Anaesthesia, 1984. – 39: 1105-11.
8. **Samsoon, GLT.** Difficult tracheal intubation: a retrospective study / Samsoon GLT, Young JRB – Anaesthesia, 1987. – 42: 487-490.
9. **Patil, V.U.** Fiberoptic Endoscopy in Anesthesia / Patil V.U., Stehling L.C., Zaunder H.L. – Chicago: Year Book Medical Publishers, 1983. – 110 – 15
10. **Frerk, C.M.** Predicting difficult intubation / Frerk C.M. – Anaesthesia, 1991. – 46: 1005-1008.
11. **Savva D.** Prediction of difficult trachea intubation / Savva D. – British Journal of Anaesthesia, 1994. – 73: 149-153.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МНОГОСЦЕНАРНОГО ОБУЧЕНИЯ КАК СРЕДСТВО ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОЦЕССОМ

Е.А. Рафальская

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина, г. Киев

INFORMATION TECHNOLOGY MULTISCENARIO LEARNING AS A TOOL FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF EDUCATIONAL PROCESS

E. Rafalska

Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

R-Lena@bigmir.net

Аннотация. В статье рассмотрены особенности организации учебного процесса в высших учебных заведениях. Установлено, что большое количество существующих сценариев учебы усложняет автоматизацию управления учебным процессом. Информационная технология многосценарного обучения обеспечит повышение качества образования.

Ключевые слова: форма обучения; многосценарное обучение; управление; информационная технология.

Abstract. In this article discusses the features of the educational process in higher education. There are forms of learning in higher education: learning from the separation of production and on the job. A large number of training scenarios complicates the automation of learning management. Multiscenario information technology learning management will improve the quality of education.

Keywords: form of training; multiscenario learning; management; information technology.

Для эффективного управления учебным заведением, в котором предусмотрены различные формы обучения, целесообразно использовать автоматизированную систему управления учебным заведением, которая позволит индивидуализировать учебную деятельность студентов за счет многосценарного обучения.

Обучение в вузах проходит по двум формам: с отрывом от производства (обучение очной формы - традиционное обучение) и без отрыва от производства. Обучение без отрыва от производства осуществляется в форме заочного и дистанционного обучения. Также имеет место обучение в сокращенный срок - обучение лиц, имеющих диплом младшего специалиста. В зависимости от учебного заведения и форм организации обучения в нем учебный процесс соответствует различным планам, а значит, обучение происходит по разным сценариям.

Работа по созданию систем управления процессом обучения была начата еще с 1969 г. в рамках проекта АСУ ВУЗ [1]. Анализ существующих технологий управления образовательным процессом [2,3,4] дает возможность отметить оторванность реализованных технологий управления вузов от основной деятельности учебного заведения.

Технологии управления учебными заведениями занимаются процессами, связанными с бухгалтерским, кадровым, плановым учетом и т.д., то есть, функционально они относятся к классу АСУ и не касаются основной деятельности учебного заведения, то есть работы со студентами. Даже в тех системах, где реализована работа со студентами, речь идет о статистических данных и учете, а не о предоставлении студентам услуг, автомати-

зирующих образовательный процесс с целью его улучшения.

Таким образом, информационная технология многосценарного обучения позволяет улучшить процесс обучения и обеспечить качественную подготовку специалистов.

Многосценарное обучение - такая организация обучения отдельного студента, которая дает возможность реализовать различные сценарии на разных этапах образовательного процесса.

Признаками многосценарного обучения есть:

- использование различных форм обучения;
- возможность обучения с выбором дисциплин;
- обучение в различных высших учебных заведениях (рис.1).

Основными *принципами* построения информационной системы (ИС) управления высшим учебным заведением есть:

- ИС должна иметь интуитивно понятный интерфейс для удобной работы пользователя;
- ИС должна максимально удовлетворить информационные потребности подразделений вузов;
- ИС должна интегрировать в себе различные методы и средства, которые решают различные задачи;
- ИС должна быть главным инструментом решения задач и обмена информацией между пользователями.

При разработке средства управления учебным заведением необходимо учитывать, что основным процессом любого учебного заведения есть образовательный процесс. Поэтому логика и структура информационной базы должны основываться на возможности



Многосценарное обучение

Рис. 1 Признаки многосценарного обучения

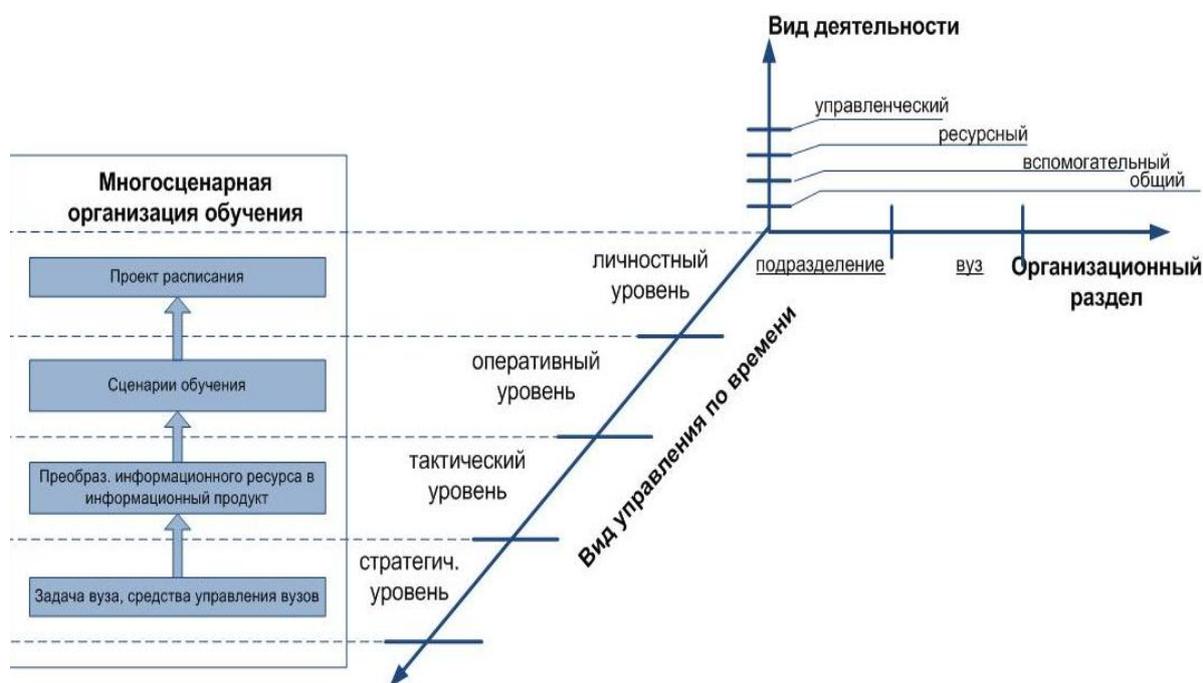


Рис.2 Структура управления высшим учебным заведением

автоматизации управления всеми стадиями основного процесса - от момента набора абитуриентов до выпуска готового специалиста и его трудоустройства.

Систему управления вузом представим как структуру в трех векторах: организационный раздел управления, временной промежуток решений и вид деятельности (рис.2).

Как видим, выделяются следующие четыре вида планирования в зависимости от направленности и характера конкретных задач - четыре уровня управления вузом:

- 1) *Стратегическое* – это управление, которое предусматривает планирование деятельности вуза, что определяет направленность деятельности.
- 2) *Тактическое управление* - планирование деятельности вуза с заданными задачами и целью.
- 3) *Оперативное управление* - управление, которое не существует без тактического управления и детализи-

рует его. Сроки реализации тактических планов больше, чем сроки реализации оперативных планов.

- 4) *Личностный управления* – такое управление, в котором участие принимает непосредственно руководитель [5].

На рис.2 так же отображено место подсистемы многосценарной организации обучения в системе управления образовательным процессом.

Информационная технология многосценарного обучения соответствует следующим *требованиям*:

- *Функциональность* - обеспечивает эффективное развитие функциональных задач вуза.
- *Надежность* - система удобна в администрировании, потому что выделен специальный модуль протоколирования всех действий в системе.
- *Стабильность* - устойчивость работы по различным режимам, обеспечение достижения целей технологии, внутренне совместима и внешне не изолирована.

• Обеспечение доступа - доступ к работе с информационной технологией управления образовательным процессом имеют работники вузов, отвечающих за разветвленную организацию образовательного процесса, и имеют данные для инициализации.

• Масштабируемость и расширяемость - возможность расширения круга пользователей, добавление новых данных.

Поскольку информационная технология направлена и на управление функциями деятельности (используется в управлении), и на преобразование информации из входного ресурса в исходный продукт (технологический процесс), то в функционировании системы можно выделить две технологии - технологию пользователя (технология формирования информационного ресурса лиц, принимающих решения) и системную технологию (технология обработки информации в программно-информационной среде).

В рамках системной технологии выделяем подсистемы: 1. получение информации; 2. обработка данных; 3. обмен данными; 4. накопление данных; 5. формирование продукта.

Подсистема получения информации обеспечивает взаимодействие пользователей с системой и, как следствие, формирование информационного ресурса, что начинается с процедуры «Сбор» и отражает предметную область (характеристики, параметры, состояние объекта управления). Информация (образовательные программы, дисциплины и учебные планы, контингент студентов, преподаватели, аудиторный фонд) должна быть соответствующим образом подготовлена.

Подсистемы обработки, обмена и накопления данных обеспечивают преобразование, передачу и хранение данных, которые получаем в процессе реализации функциональных возможностей информационной технологии многосценарного обучения.

Подсистема формирования продукта обеспечивает решение функциональных задач информационной технологии многосценарного обучения, и, как результат, получения проекта расписания для непостоянных групп при многосценарной организации образовательного процесса.

Информационная технология пользователя отображает «систему» использования программно-информационной среды в информационной технологии многосценарного обучения для решения задач по управлению функциями.

Процесс «общения» пользователя с ИТ обеспечивает интерфейс пользователя (ИП), что соответствует требованиям, которые позволяют обеспечить:

- значительную производительность работы пользователей, так как пользователи будут использовать средства решения их профессиональных задач с минимальным риском встретить трудности или препятствия;

- малое время обучения - интерфейс простой и интуитивно понятный;

- сокращение времени работы путем автоматизации процессов работы при обработке данных для создания информационного продукта.

Таким образом, информационная технология многосценарной организации образовательного процесса базируется на совокупности средств переработки и создания новой информации и является источником формирования различных отчетов, регламентирующих организацию образовательного процесса в вузе.

Такая информационная технология управления многосценарным образовательным процессом максимально обеспечивает индивидуальный характер учебной деятельности каждого студента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Андреев, А.А.** Дистанционное обучение: сущность, технологи, организация / А.А. Андреев, В.И. Солдатов – М.: Узд-во МЭСИ, 1999. – 196с.
2. **Рафальская, Е.А.** Обзор существующих информационных систем управления учебным процессом в высших учебных заведениях / Е.А. Рафальская // Автоматизированные технологии и производства: сб. науч. тр. под. ред. Б.Н.Парсункина. – 2013. – № 5. – С. 125 – 127.
3. **Яковенко, А.Е.** Проектирование автоматизированных систем принятия решений в условиях адаптивного обучения с учетом требований Болонского процесса / А.Е. Яковенко // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы.–2004.– №2.– С. 159–167.
4. **Федусенко, Е.В.** Разработка модели модуля «Траектория обучения» для системы управления обучением / Е.В. Федусенко, Е.А. Рафальская // Управление развитием сложных систем. - Киев, - 2013. - Вып. 15. С. - 152 - 155.
5. **Котлер, Ф.** Основы маркетинга / Ф.Котлер ; пер. с англ.–М.:«Ростинтэр», 1996.–704с.

УДК 621.182.23

СПОСОБ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ В ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВКАХ

М.И. Васильев¹, Б.Н. Парсункин², С.М. Андреев³

¹ООО «Газпром добыча Уренгой», г. Новый Уренгой, Россия

^{2,3}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

ENERGY-SAVING METHOD OF FUZZY CONTROL COMBUSTION PROCESS IN THERMAL PLANTS

M.I. Vasilyev¹, B.N. Parsunkin², S.M. Andreev³

¹LLC «Gazprom dobycha Urengoy», Novy Urengoy, Russia,

^{2,3}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹Misha462@yandex.ru

Аннотация. Смоделирован процесс горения в рабочем пространстве тепловой установки. Показана унимодальная статическая характеристика зависимости расхода топлива от расхода воздуха в условиях стабилизации теплоты, образующейся в результате процесса горения, следовательно, доказана возможность оптимизации данного процесса. Разработана структурная схема энергосберегающего нечёткого управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки. Оценено влияние режима управления процессом горения на величину удельного расхода топлива.

Ключевые слова: процесс горения, тепловая установка, нечёткое управление, лингвистическая переменная, функции принадлежности.

Abstract. Combustion process is modeled in the working space heating plant. Unimodal characteristic shown static fuel flow depending on the air flow in a heat stabilization, formed as a result of the combustion process, thus proved possible to optimize the process. A block diagram of energy saving fuzzy combustion control in the workspace of thermal installation. The effect of mode control the combustion process by the amount of the specific fuel consumption.

Keywords: combustion process, thermal plant, fuzzy control, linguistic variable, the membership function.

Актуальность работы

Режим управления процессом горения в рабочем пространстве тепловых установок оказывает влияние на величину удельного расхода топлива, на сохранность технологических агрегатов и на экологические условия.

Наиболее благоприятным энергосберегающим режимом автоматизированного управления процессом горения является режим, при котором обеспечивается минимальное значение тепловых потерь с подсосами холодного атмосферного воздуха и с выбиваниями горячих продуктов сгорания, а управление при этом осуществляется посредством систем, принцип действия которых основан на теории нечётких множеств и нечёткой логике.

В работе [1] предлагается осуществлять управление процессом горения за счёт стабилизации заданного значения давления в рабочем пространстве тепловой установки. Однако, в условиях ограниченных возможностей дымоотводящей системы на большинстве нагревательных промышленных печей существует ограничение

на реализуемость энергосберегающего управления газодинамическим режимом при максимальных тепловых нагрузках.

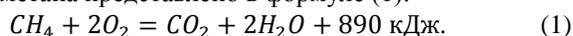
В работе [2] представлен способ энергосберегающего управления процессом горения за счёт изменения положения дымового клапана (мощности дымососа). Данный способ в «крайних» режимах работы, ввиду дестабилизации (изменения) давления в рабочем пространстве тепловой установки, приводит к нарушению технологического режима (срыву пламени с горелки), что в свою очередь может отрицательно сказаться на сохранности технологических агрегатов.

Исходя из анализа выводов выше указанных работ, задачей оптимизации процесса горения является поддержание коэффициента расхода воздуха равным заданному, посредством измерения концентрации кислорода в отходящих дымовых газах и дальнейшим регулированием расхода воздуха в рабочее пространство тепловой установки.

Основные проблемы и решения

Для обеспечения качественного горения топлива необходимо в достаточном количестве подвести воздух в зону горения и добиться хорошего перемешивания топлива с воздухом.

Если в качестве топлива используется природный газ, то в результате полного сгорания в выходящих продуктах в атмосферу отсутствуют горючие вещества. При этом углерод и водород соединяются вместе и образуют углекислый газ и пары воды. Данная реакция является экзотермической (в результате химической реакции при образовании новых связей выделяется энергии больше, чем потребовалось для разрушения "старых" связей в исходных веществах и избыток энергии высвобождается в виде тепла). Уравнение реакции горения метана представлено в формуле (1):



Визуально при полном сгорании пламя светло-голубое или голубовато-фиолетовое.

Кроме этих газов в атмосферу с горючими газами выходит азот и оставшийся кислород, которые «потребляют» часть образовавшейся в результате горения теплоты на увеличение собственной температуры до средней температуры дымовых газов (CO_2 , N_2 , O_2 и $2\text{H}_2\text{O}$). Поэтому избыток воздуха в рабочем пространстве приводит к понижению коэффициента полезного действия за счёт роста потерь тепла.

Если сгорание газа происходит не полностью, то в атмосферу выбрасываются горючие вещества – угарный газ, водород, сажа.

Неполное сгорание газа происходит вследствие недостаточного количества воздуха. При этом визуально в пламени появляются языки копоти.

Опасность неполного сгорания газа состоит в том, что угарный газ может стать причиной отравления персонала тепловой установки. Содержание CO в воздухе 0,01 – 0,02 % может вызвать легкое отравление. Более высокая концентрация может привести к тяжелому отравлению и смерти.

Образующаяся сажа оседает на стенках котлов ухудшая тем самым передачу тепла теплоносителю снижает эффективность работы котельной. Сажа проводит тепло хуже метана в 200 раз.

Теоретически для сжигания 1 м^3 природного газа необходимо $9,524 \text{ м}^3$ воздуха. В реальных условиях воздуха требуется больше для создания гарантированного условия полного сжигания природного газа. То есть необходимо избыточное количество воздуха. Эта величина, обозначаемая $\alpha_{\text{в}}(\tau)$, показывает во сколько раз воздуха расходуется больше, чем необходимо теоретически.

Во многих действующих тепловых установках задают расход воздуха исходя из расхода газа, не измеряя при этом концентрацию кислорода в отходящих дымовых газах. Во время плановых испытаний и замеров концентраций кислорода в дымовых газах подобных тепловых установок зачастую оказывается, что коэффициент расхода воздуха превышает значение 1,25, что приводит к потерям тепла на обогрев избыточного воздуха. Такое большое значение коэффициента расхода воздуха объясняется тем, что практически в любых тепловых

установках присутствуют подсосы атмосферного воздуха, которые можно учесть только с помощью использования датчика кислорода в рабочем пространстве тепловой установки.

В условиях стабилизации теплоты, образующейся в результате процесса горения статическая характеристика зависимости расхода топлива от расхода воздуха имеет унимодальный вид (рис. 1), следовательно, данный процесс можно оптимизировать.

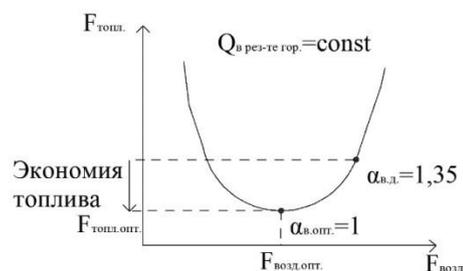


Рис. 1. Статическая характеристика зависимости расхода топлива от расхода воздуха при условии стабилизации теплоты, образующейся в процессе горения

Энергосберегающее автоматическое управление процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки, обеспечивающее минимальные потери теплоты на обогрев избыточного воздуха целесообразно осуществлять с помощью нечёткого управления в соответствии с выполнением условия (2):

$$\alpha_{\text{в}}(\tau) = \frac{V_{\text{в}}(\tau)}{(V_{\text{т}}(\tau) \cdot L_0)} = 1,05, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{в}}(\tau)$ – коэффициент расхода воздуха; $V_{\text{в}}(\tau)$, $V_{\text{т}}(\tau)$ – расходы соответственно воздуха и топлива на тепловой установке; L_0 – расчетный коэффициент, численно равный количеству воздуха, необходимого для полного сжигания единицы измерения используемого вида топлива.

Величину $\alpha_{\text{в}}(\tau)$ также можно определить по упрощенной «кислородной» формуле (3):

$$\alpha_{\text{в}}(\tau) = \frac{21}{(21 - \text{O}_2(\tau))}, \quad (3)$$

где $\text{O}_2(\tau)$ – текущее содержание кислорода в продуктах сгорания топлива на выходе из рабочего пространства тепловой установки, %.

В условиях действия множества случайных факторов, наличии существенно нелинейных связей между параметрами процесса и т.д. традиционные системы автоматического управления, основанные на типовых динамических моделях, не всегда могут справляться с задачами управления. Основной причиной этого является исходное для них предположение о линейности связи между параметрами процесса, что часто не соответствует реальным условиям газодинамического режима в рабочем пространстве тепловых установок.

В таких сложных условиях для управления процессом эффективнее использовать системы автоматического управления, принцип действия которых основан на теории нечётких множеств и нечёткой логике.

Нечёткое управление имеет преимущество перед широко используемыми типовыми системами автоматического управления за счет замены используемой упрощенной количественной линейной модели управля-

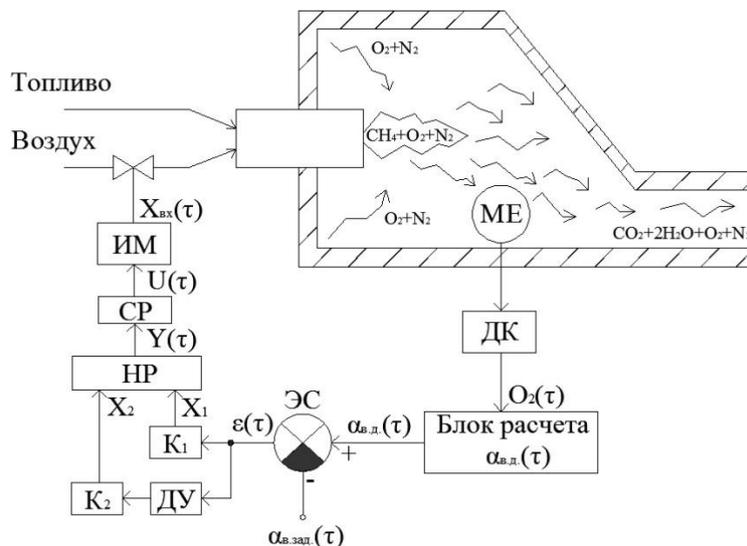


Рис. 2. Структурная схема энергосберегающего нечеткого управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки

ющей системы нелинейной многосторонней лингвистической моделью, основанной на базе формализованной имитации и обобщенно практического опыта, формирования управляющих воздействий экспертом (лучшим технологом оператором) в различных реальных производственных ситуациях.

Принцип работы нечётких автоматических систем основан на использовании лингвистической модели, составленной из логических правил, задаваемых в форме «Если есть ситуация, тогда нужно такое управление» [3].

Используя базу правил и методы синтеза нечётких алгоритмов управления, можно осуществлять автоматизацию и даже оптимизацию управления технологическими процессами без проведения всесторонних экспериментальных и математических исследований по созданию моделей управляемых процессов путем изменения базы логических правил управления в соответствии изменением реальных условий [4].

Структурная схема энергосберегающего нечёткого управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки представлена на рис. 2.

Текущее значение содержания кислорода в рабочем пространстве тепловой установки $O_2(\tau)$ измеряется датчиком (ДК) и подаётся на блок расчёта текущего значения $\alpha_{в.д.}(\tau)$ (3).

На выходе элемента сравнения (ЭС) формируется сигнал рассогласования между текущим значением коэффициента расхода воздуха и его заданным значением (4):

$$\varepsilon(\tau) = \alpha_{в.д.}(\tau) - \alpha_{в.зад.}(\tau), \quad (4)$$

который масштабируется в блоке K_1 и дифференцируется блоком ДУ. На вход нечёткого регулятора (НР) подаются два нормированных сигнала (5):

$$x_1 = K_1 \cdot \varepsilon(\tau) \text{ и } x_2 = K_2 \cdot \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}. \quad (5)$$

Формирование управляющего воздействия $Y(\tau)$ на выходе НР с использованием принципа нечёткого управления осуществляется следующим образом.

Вводятся лингвистические переменные физических нормированных предметных величин: X_1 – «рассогласование»; X_2 – «скорость рассогласования»; Y –

«управляющее воздействие». Нормированные предметные величины X_1 и X_2 фиксируют по оси аргумента функций принадлежности. Нечеткое множество функций принадлежности $\mu(x_i)$ формируется с использованием выбранных технологически обоснованных функций, которые количественно характеризуют степень приближения значения предметной переменной к нечёткому множеству. Значение $\mu(x)$ фиксируются по оси функций [5].

В области определения предметной переменной X_1 использованы пять нечётких множеств $\mu(x_1)$, определяющих значение лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности $A_i^{x_1}$: $A_1^{x_1}$ – «положительное большое»; $A_2^{x_1}$ – «положительное малое»; $A_3^{x_1}$ – «нулевое»; $A_4^{x_1}$ – «отрицательное малое»; $A_5^{x_1}$ – «отрицательное большое».

Аналогично определяем функции принадлежности $A_i^{x_2}$ для значений лингвистической переменной X_2 .

В общем случае вид функций принадлежности $\mu(x_i)$ и форма их представления может быть произвольной. Но наибольшее применение получили так называемые «стандартные» функции принадлежности: «Z» – функции; «Л» – функции; «S» – функции; «П» – функции [6].

Применительно к рассматриваемому случаю выберем следующие функции принадлежности.

Используем «S» – функции для $A_i^{x_i}$, где $i = 1 \div 2$ в виде выражения (6):

$$A_1^{x_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i > 1, \\ 1,25 \cdot X_i - 0,25, & \text{если } 0,2 \leq X_i \leq 1, \\ 0, & \text{если } X_i < 0,2; \end{cases} \quad (6)$$

Используем функции «Л» вида для представления $A_2^{x_i}, A_3^{x_i}, A_4^{x_i}$ (7)-(9):

$$A_2^{x_i} = \begin{cases} -\frac{7}{5} \cdot X_i + \frac{17}{10}, & \text{если } 0,5 \leq X_i \leq 1, \\ \frac{10}{7} \cdot X_i + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,2 \leq X_i \leq 0,5, \\ 0, & \text{если } X_i < -0,2; \end{cases} \quad (7)$$

$$A_3^{X_i} = \begin{cases} -1,25 \cdot X_i + 1, & \text{если } 0 < X_i < 0,8, \\ 1,25 \cdot X_i + 1, & \text{если } -0,8 \leq X_i \leq 0, \\ 0, & \text{если } X_i > 0,8 \text{ или } X_i < -0,8; \end{cases} \quad (8)$$

$$A_4^{X_i} = \begin{cases} -\frac{10}{7} \cdot X_i + \frac{2}{7}, & \text{если } -0,5 \leq X_i \leq 0,2, \\ \frac{7}{5} \cdot X_i + \frac{17}{10}, & \text{если } -1 \leq X_i \leq -0,5, \\ 0, & \text{если } X_i > 0,2; \end{cases} \quad (9)$$

Для отражения функций $A_5^{X_i}$ используем «Z» – функцию в виде (10):

$$A_5^{X_i} = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i < -1, \\ -1,25 \cdot X_i - 0,25, & \text{если } -1 \leq X_i \leq -0,2, \\ 0, & \text{если } X_i > -0,2. \end{cases} \quad (10)$$

Графические изображения функций принадлежности нечётких множеств $\mu(x_i)$ для входных переменных представлены на рис. 3.

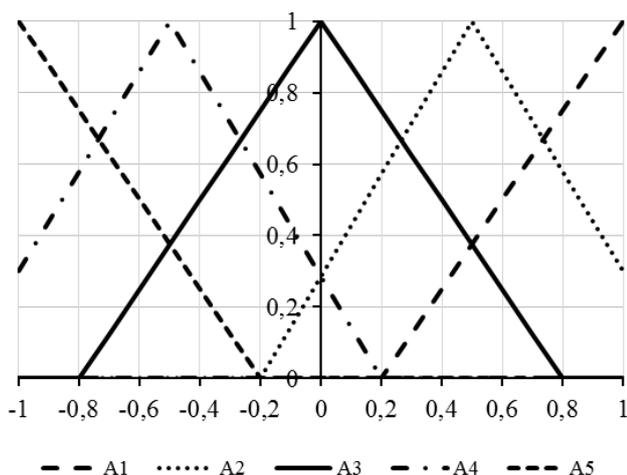


Рис. 3. Функции принадлежности нечётких множеств для входных переменных

Нечёткие множества значений выходной лингвистической переменной Y определены функциями принадлежности B_i при $i = 1 \div 5$: B_1 – «положительное большое»; B_2 – «положительное малое»; B_3 – «нулевое»; B_4 – «отрицательное малое»; B_5 – «отрицательное большое».

Нечёткие множества выходной лингвистической переменной представлены в виде

в виде вектора $B_i = [1; 0,5; 0; -0,5; -1]$ при $i = 1 \div 5$.

При формировании базы правил для реализации нечёткого управления принято основное эвристическое правило, определяющее стратегию качественного управления [7].

Это правило формулируется следующим образом:

«Если возникает рассогласование $\varepsilon(\tau)$, тогда необходимо управляющее воздействие, обеспечивающее устранение возникшего рассогласования. При $\varepsilon(\tau) \leq \varepsilon_n$ процесс управления считать завершённым, если это состояние соблюдается в течение заданного интервала времени. Здесь ε_n – заданная зона нечувствительности системы нечёткого управления».

Функционирование системы энергосберегающего управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки определяется следующей базой правил (11):

$$\begin{aligned} R_1: (X_1 = A_5^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_1; \\ R_2: (X_1 = A_1^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_5; \\ R_3: (X_1 = A_4^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_2; \\ R_4: (X_1 = A_2^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_4; \\ R_5: (X_1 = A_4^{X_1}) \cap (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_1; \\ R_6: (X_1 = A_2^{X_1}) \cap (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_5; \\ R_7: (X_1 = A_4^{X_1}) \cap (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3; \\ R_8: (X_1 = A_2^{X_1}) \cap (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3; \\ R_9: (X_1 = A_3^{X_1}) \cap (X_2 = A_4^{X_2}) &\rightarrow Y = B_2; \\ R_{10}: (X_1 = A_3^{X_1}) \cap (X_2 = A_2^{X_2}) &\rightarrow Y = B_4; \\ R_{11}: (X_1 = A_3^{X_1}) \cap (X_2 = A_3^{X_2}) &\rightarrow Y = B_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Каждое правило может быть технологически и лингвистически обосновано следующим образом.

R_1 : «Если скорость рассогласования практически нулевая и возникло большое отрицательное рассогласование, то на выходе нечёткого регулятора должно быть сформировано управляющее воздействие в направлении открытия клапана расхода воздуха «положительное большое» для устранения значительного недожога».

При формулировке базы правил обязательно следует учитывать два важных обстоятельства: условия формирования сигнала рассогласования $\varepsilon(\tau)$ на элементе сравнения ЭС и вид статической зависимости управляемого параметра от управляющего воздействия.

На выходе НР с использованием алгоритма нечёткой логики формируется управляющий сигнал $Y(\tau)$, подаваемый на вход логического элемента сигнум реле (СР). На выходе СР формируется управляющий сигнал $U(\tau)$ в соответствии с условием (12):

$$Y(\tau) = \begin{cases} +1, & \text{если } Y(\tau) > \frac{\Delta Y_n}{2}, \\ \text{при } \varepsilon(\tau) < 0 - \text{откр. (недожог);} \\ 0, & \text{если } \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right) \leq Y(\tau) \leq \frac{\Delta Y_n}{2}; \\ -1, & \text{если } Y(\tau) < \left(-\frac{\Delta Y_n}{2}\right), \\ \text{при } \varepsilon(\tau) > 0 - \text{закр. (избыток } O_2). \end{cases} \quad (12)$$

при $\varepsilon(\tau) = \alpha_{\text{в.д.}}(\tau) - \alpha_{\text{в.з.д.}}(\tau)$,

где ΔY_n – заданная зона нечувствительности системы нечёткого управления; $U(\tau) \in (+1, 0, -1)$ – переключающая функция, определяющая текущее направление движения исполнительного механизма (ИМ).

Исполнительный механизм функционирует в соответствии с выражением (13):

$$x_{\text{вх}}(\tau) = x_{\text{вх}}(\tau - 1) + U(\tau) \cdot \bar{K}_{\text{им}} \cdot \tau_d, \quad (13)$$

где $x_{\text{вх}}(\tau)$ – текущее положение ИМ; $x_{\text{вх}}(\tau - 1)$ – положение ИМ в прошлый момент времени; $\bar{K}_{\text{им}}$ – средняя скорость ИМ; τ_d – время дискретизации системы регулирования.

Исполнительный механизм приводит в движение регулирующий клапан, который зачастую имеет нелинейную характеристику (рис. 4).

Аппроксимация зависимости степени открытия клапана и величина её достоверности также представлены на графике (рис. 4).

Рассмотрим пример формирования управляющего воздействия $Y(\tau)$ при реализации нечёткого энергосберегающего управления процессом горения в рабочем пространстве тепловой установки.

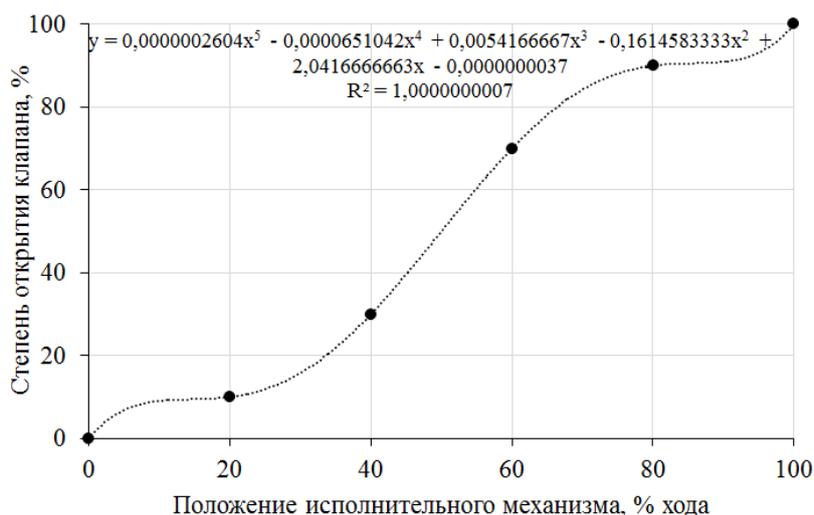


Рис. 4. Зависимость степени открытия клапана от положения ИМ

Допустим, что в начальный момент времени $\tau = 0$ процесс находится в не установившемся состоянии при условиях: расход природного газа $422 \text{ м}^3/\text{ч}$; расход воздуха $1\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$; $x_{\text{вх}}(\tau = 0) = 20\%$ хода ИМ; температура воздуха, подаваемого на горелку 30°C ; низшая теплота сгорания $35\,341,03 \text{ кДж}/\text{м}^3$; концентрация кислорода в атмосферном воздухе 21% ; расчётный коэффициент $L_0 = 1 \cdot 2 \cdot \frac{100\%}{21\%} = 9,524$; количество теплоты необходимой на обогрев одного кубометра воздуха на один градус Цельсия $0,000001298071 \text{ ГДж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$; количество подсасываемого атмосферного воздуха $425 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Система управления характеризуется следующими параметрами: заданное значение коэффициента расхода воздуха $\alpha_{\text{в,зад}}(\tau) = 1,05$; постоянная скорость перемещения исполнительного механизма $K_{\text{ИМ}} = 5\%$ хода ИМ/с; постоянная времени $T_{06} = 1 \text{ с}$; время запаздывания $\tau_3 = 0,2 \text{ с}$; средний коэффициент передачи объекта $K_{06} = 0,002 \frac{\alpha_{\text{в,д}}}{\% \text{ хода ИМ}}$; величина зоны нечувствительности сигнум-реле $\Delta Y_n = 0,01$.

Дискретность расчёта переходного процесса в контуре нечёткого управления принимаем равной $\tau_d = 0,05 \text{ с}$.

Динамические свойства инерционного с запаздыванием управляемого процесса учитываются при использовании численного метода Эйлера при решении системы уравнений (14)-(17):

$$\frac{dq_{O_2 1}(\tau-1)}{d\tau} = \frac{1}{T_{06}} \cdot [q_{O_2 2}(\tau-1) - q_{O_2 1}(\tau-1)]; \quad (14)$$

$$q_{O_2 1}(\tau) = q_{O_2 1}(\tau-1) + \frac{q_{O_2 1}(\tau-1)}{d\tau}; \quad (15)$$

$$\frac{dq_{O_2}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{\tau_3} \cdot [q_{O_2 1}(\tau) - q_{O_2}(\tau)]; \quad (16)$$

$$q_{O_2}(\tau+1) = q_{O_2}(\tau) + \frac{q_{O_2}(\tau)}{d\tau}, \quad (17)$$

здесь T_{06} , τ_3 – соответственно постоянные времени количественно характеризующие инерционность и запаздывание; τ , $\tau+1$ и $\tau-1$ – текущий, последующий и соответственно предыдущий моменты времени; $q_{O_2}(\tau)$, $q_{O_2 1}(\tau)$ и $q_{O_2 2}(\tau)$ – соответственно текущее значение концентрации кислорода в отходящих дымовых газах с учётом инерционности и запаздывания, только инерци-

онности и, соответственно, без учёта инерционности и запаздывания [8].

Для начала определим суммарный расход воздуха в рабочее пространство тепловой установки в начальный момент времени (18):

$$F_{\Sigma \text{возд.}}(\tau) = F_{\text{возд.}}(\tau) + F_{\text{возд.подс.}}(\tau), \quad (18)$$

где $F_{\Sigma \text{возд.}}(\tau)$ – суммарный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; $F_{\text{возд.}}(\tau)$ – расход воздуха через горелку, $\text{м}^3/\text{ч}$; $F_{\text{возд.подс.}}(\tau)$ – расход через подсосы атмосферного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$.

$$F_{\Sigma \text{возд.}}(\tau) = 425 \text{ м}^3/\text{ч} + 1\,000 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = 1\,425 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

Рассчитаем расход воздуха за период дискретизации системы управления (19):

$$V_{\text{возд.}}(\tau) = \left(\frac{F_{\Sigma \text{возд.}}(\tau)}{3\,600} \right) \cdot \tau_d, \quad (19)$$

$$V_{\text{возд.}}(\tau) = \left(\frac{1425 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}}{3\,600 \text{ с}} \right) \cdot 0,25 \text{ с} = 0,0198 \text{ м}^3/\tau_d.$$

По аналогичной формуле определим расход природного газа за период дискретизации системы управления (20):

$$V_{\text{газа}}(\tau) = \left(\frac{F_{\text{газа}}(\tau)}{3\,600} \right) \cdot \tau_d, \quad (20)$$

$$V_{\text{газа}}(\tau) = \left(\frac{422 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}}{3\,600 \text{ с}} \right) \cdot 0,05 \text{ с} = 0,0057 \text{ м}^3/\tau_d.$$

Зная количества воздуха и газа в рабочем пространстве тепловой установки в единицу времени (период дискретизации) определим, сколько всего природного газа приняло участие в процессе горения (21):

$$V_{\text{газа принявш. уч.}}(\tau) = \begin{cases} V_{\text{газа}}(\tau), & \text{если } V_{\text{газа}}(\tau) \cdot L_0 < V_{\text{возд.}}(\tau); \\ \frac{V_{\text{возд.}}(\tau)}{L_0}, & \text{если } V_{\text{газа}}(\tau) \cdot L_0 \geq V_{\text{возд.}}(\tau). \end{cases} \quad (21)$$

$$V_{\text{газа принявш. уч.}}(\tau) = \frac{0,0198 \frac{\text{м}^3}{\tau_d}}{9,524} = 0,00208 \frac{\text{м}^3}{\tau_d},$$

т.к. $0,0057 \cdot 9,524 > 0,0198$.

Из предыдущего расчёта видно, что исходного количества воздуха не хватает для полного сжигания газа. Теплота, полученная в результате горения, определяется по формуле (22):

$$Q_{\text{в рез-те гор.}}(\tau) = Q_{\text{низш. гор.}}(\tau) \cdot V_{\text{газа принявш. уч.}}(\tau), \quad (22)$$

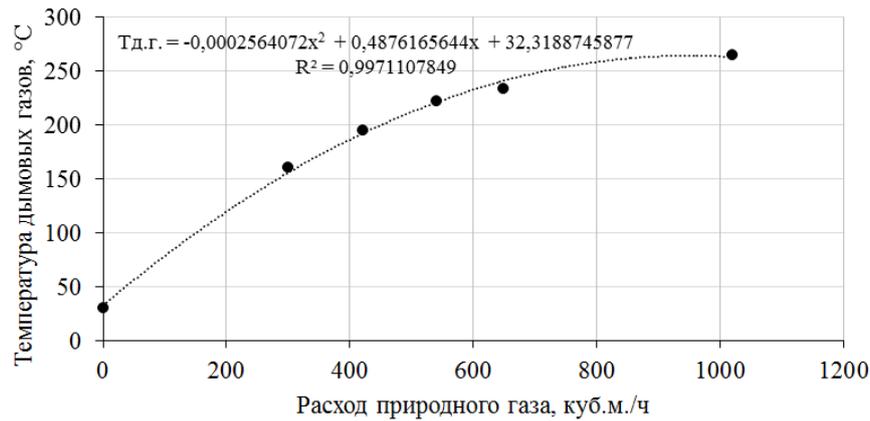


Рис. 5. Экспериментальная зависимость температуры дымовых газов от расхода природного газа

где $Q_{\text{низш. гор.}}(\tau)$ – низшая теплота сгорания природного газа.

$$Q_{\text{в рез-те гор.}}(\tau) = 35\,341,03 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \cdot 0,00208 \frac{\text{м}^3}{\tau_d} = 73,509 \frac{\text{кДж}}{\tau_d}.$$

Количество воздуха, не принявшего участия в процессе горения можно определить с помощью выражения (23):

$$V_{\text{не принявш. уч.}}(\tau) = \begin{cases} V_{\text{возд.}}(\tau) - V_{\text{газа}}(\tau) \cdot L_0, & \text{если } V_{\text{возд.}}(\tau) - V_{\text{газа}}(\tau) \cdot L_0 > 0; \\ 0, & \text{если } V_{\text{возд.}}(\tau) - V_{\text{газа}}(\tau) \cdot L_0 \leq 0. \end{cases} \quad (23)$$

$$V_{\text{не принявш. уч.}}(\tau) = 0 \frac{\text{м}^3}{\tau_d}, \text{ т.к. } 0,0198 - 0,0057 \cdot 9,524 < 0.$$

В тех случаях, когда есть избыток воздуха, необходимо определить, сколько он заберёт тепла на увеличение собственной температуры до средней температуры дымовых газов (24):

$$Q_{\text{на обогрев возд.}}(\tau) = Q_{\text{тепл. на возд.}} \cdot V_{\text{не принявш. уч.}}(\tau) * (T_{\text{д.г.}}(\tau) - T_{\text{возд.}}(\tau)), \quad (24)$$

где $Q_{\text{тепл. на возд.}}$ – количество теплоты, необходимой на обогрев одного кубометра воздуха на один градус Цельсия, $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot \text{°C}$; $T_{\text{возд.}}(\tau)$ – температура воздуха, подаваемого на горелку, °C ; $T_{\text{д.г.}}(\tau)$ – температура дымовых газов, °C .

Температура дымовых газов имеет функциональную зависимость от расхода природного газа. Данная зависимость определена экспериментально (рис. 5).

В результате аппроксимации зависимости температуры дымовых газов от расхода природного газа (рис. 5) было получено уравнение (25):

$$T_{\text{д.г.}}(F_{\text{газа}}(\tau)) = -0,0002564072 \cdot F_{\text{газа}}(\tau) + 0,487616564 \cdot F_{\text{газа}}(\tau) + 32,319 \quad (25)$$

В нашем случае количество теплоты необходимой на обогрев избытка воздуха будет равно нулю, поскольку нет избытка воздуха.

Задачей системы нечёткого регулирования расхода воздуха по концентрации кислорода в отходящих дымовых газах является минимизация тепловых потерь с избытком воздуха. Оценить работы нечёткого регулирования можно по оставшейся теплоте реакции горения (26):

$$Q_{\text{оставш.}}(\tau) = Q_{\text{в рез-те гор.}}(\tau) - Q_{\text{на обогрев возд.}}(\tau), \quad (26)$$

$$Q_{\text{оставш.}}(\tau) = 73,509 \frac{\text{кДж}}{\tau_d} - 0 = 73,509 \frac{\text{кДж}}{\tau_d}.$$

В процессе горения в отходящих дымовых газах изменяется концентрация кислорода в зависимости от расхода воздуха на горелку (27):

$$q_{O_2 2}(\tau) = \frac{V_{\text{возд. не принявш. уч.}}(\tau)}{V_{\text{возд.}}(\tau) + V_{\text{газа}}(\tau)} \cdot q_{O_2 \text{атм.возд.}} \quad (27)$$

$$q_{O_2 2}(\tau) = 0 \%.$$

Значение концентрации кислорода непосредственно у датчика кислорода будет запаздывать относительно концентрации возле пламени (см. (14)-(17)). Это объясняется небольшой задержкой на процесс горения ($\tau_3 = 0,2$ с) и расстоянием от пламени до датчика, на преодоление которого дымовым газам необходимо время ($T_{\text{об}} = 1$ с).

В начальный момент времени считаем, что концентрация кислорода возле датчика будет равна концентрации возле пламени.

$$q_{O_2}(\tau) = q_{O_2 1}(\tau) = q_{O_2 2}(\tau) = 0 \%.$$

Значение концентрации кислорода с датчика подаются на блок формирования действительного коэффициента расхода воздуха (28):

$$\alpha_{\text{в.д.}}(\tau) = \frac{q_{O_2 \text{атм.возд.}}}{q_{O_2 \text{атм.возд.}} - q_{O_2}(\tau)}, \quad (28)$$

$$\alpha_{\text{в.д.}}(\tau) = \frac{21}{21-0} = 1.$$

Действительное значение коэффициента расхода воздуха подаётся на элемент сравнения. В дальнейшем производим расчёты по ранее описанным выражениям (4)-(13):

$$\varepsilon(\tau) = 1 - 1,05 = -0,05,$$

$$x_1 = 1 \cdot (-0,05) = -0,05,$$

$$x_2 = 1 \cdot 0 = 0.$$

Используя зависимости, приведённые на рис. 3, определяем значения функций принадлежности для каждого нормированного предметного информационного сигнала $A_i^{x_1}$ и $A_i^{x_2}$ при $X_1 = -0,05$; $X_2 = 0$ (см. рис. 3).

$$\begin{aligned}
A_1^{X_1} &= 0; A_2^{X_1} = 0,214; A_3^{X_1} = 0,938; \\
A_4^{X_1} &= 0,357; A_5^{X_1} = 0; \\
A_1^{X_2} &= 0; A_2^{X_2} = 0,286; A_3^{X_2} = 1; \\
A_4^{X_2} &= 0,286; A_5^{X_2} = 0.
\end{aligned}$$

Определяем уровни «отсечений» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции минимума) в соответствии с базой правил (29):

$$\begin{aligned}
\mu_1^p &= \min(A_5^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\
\mu_2^p &= \min(A_1^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0; 1) = 0; \\
\mu_3^p &= \min(A_4^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,357; 1) = 0,357; \\
\mu_4^p &= \min(A_2^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,214; 1) = 0,214; \\
\mu_5^p &= \min(A_4^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,357; 0,286) = 0,286; \\
\mu_6^p &= \min(A_2^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,214; 0,286) = 0,214; \\
\mu_7^p &= \min(A_4^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,357; 0,286) = 0,286; \\
\mu_8^p &= \min(A_2^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,214; 0,286) = 0,214; \\
\mu_9^p &= \min(A_3^{X_1}; A_4^{X_2}) = \min(0,938; 0,286) = 0,286; \\
\mu_{10}^p &= \min(A_3^{X_1}; A_2^{X_2}) = \min(0,938; 0,286) = 0,286; \\
\mu_{11}^p &= \min(A_3^{X_1}; A_3^{X_2}) = \min(0,938; 1) = 0,938
\end{aligned} \quad (29)$$

Далее определяем чёткое значение выходной переменной (нормированного управляющего воздействия) в соответствии с выражением (30):

$$Y(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^R}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P} = \frac{\sum_{i=1}^{11} (\mu_i^R \cdot \mu_i^Y)}{\sum_{i=1}^{11} \mu_i^P} \quad (30)$$

Поскольку $0,049 > \Delta Y_n (0,01)$, то ИМ начинает движение в направлении открытия клапана расхода воздуха на горелку.

Расчётные траектории переходного процесса системы регулирования на основе нечёткой логики представлены на рис. 6.

Из графика (рис. 6) видно, что время регулирования составляет $\tau_{p1} = \tau_{p2} = 10$ с, а значит система управления, основанная на нечёткой логике достаточно быстро действенная, к тому же данная система не допускает перерегулирования.

Достоинством регуляторов основанных на нечёткой логике является не только их быстродействие, но и возможность поддержания определённой траектории выхода на задание.

Для того, чтобы оценить экономический эффект системы нечёткого регулирования рассчитаем расход газа при той же оставшейся теплоте в установившемся режиме ($Q_{\text{оставш.}}(\tau) = 207,13 \frac{\text{кДж}}{\tau_d}$), но при коэффициенте расхода воздуха равным $\alpha_{\text{в.д.}}(\tau) = 1,35$, что приблизит расчеты к реальным объектам, которые работают в соответствии с режимами (прописанными в режимных картах).

Программный расчёт показал, что для получения остаточной теплоты в процессе горения $Q_{\text{оставш.}}(\tau) = 207,13 \frac{\text{кДж}}{\tau_d}$, необходимо поддерживать расход газа равным $431 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Проверим результат ручным расчётом. Зная расход газа, коэффициент расхода воздуха, коэффициент L_0 можно рассчитать суммарный расход воздуха на горение (31):

$$F_{\Sigma \text{возд.}}(\tau) = \alpha_{\text{в.д.}}(\tau) \cdot L_0 \cdot F_{\text{газа}}(\tau), \quad (31)$$

$$F_{\Sigma \text{возд.}}(\tau) = 1,35 \cdot 9,524 \cdot 431 \text{ м}^3/\text{ч} = 5\,541,54 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Учитывая, что коэффициент расхода воздуха больше единицы, можно сделать вывод, что весь газ принял участие в процессе горения. Тогда теплота, полученная в результате горения $Q_{\text{в рез-те гор.}}(\tau) = 35\,341,03 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \cdot 431 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = 15\,231\,983,93 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$.

Количество воздуха, не принявшего участия в процессе горения:

$$\begin{aligned}
V_{\text{возд. не принявш. уч.}}(\tau) &= \frac{5\,541,54 \text{ м}^3}{\text{ч}} - 431 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \cdot 9,524 = \\
&= 1\,436,696 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.
\end{aligned}$$

Температура дымовых газов и теплота на обогрев избытка воздуха до этой температуры составят:

$$T_{\text{д.г.}} = 194,85 \text{ }^\circ\text{C}.$$

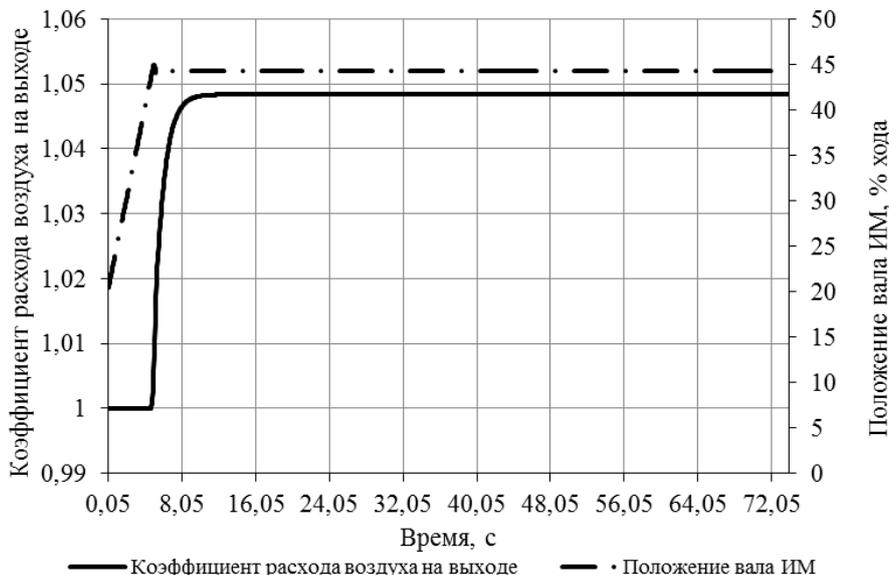


Рис. 6. Переходный процесс системы регулирования



Рис. 7. Зависимости расхода газа от оставшейся теплоты

$$Q_{\text{на обогрев возд.}}(\tau) = 1\,436,696 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}\right) \cdot 1,298071 \cdot \left(\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \cdot \text{°C}\right) \cdot (194,85 \text{ °C} - 30 \text{ °C}) = 307\,492,69 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$$

$$Q_{\text{оставш.}}(\tau) = 15\,231\,983,93 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} - 307\,492,69 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} = 14\,924\,491,24 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}}$$

$$14\,924\,491,24 \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} = 207,28 \frac{\text{кДж}}{\tau_{\text{д}}} \approx 207,13 \frac{\text{кДж}}{\tau_{\text{д}}}$$

Таким образом, экономия системы составит:

- за час работы $431 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} - 422 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = 9 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$;
- за сутки $9 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \cdot 24 \text{ ч} = 216 \text{ м}^3/\text{д}$;
- за год $216 \frac{\text{м}^3}{\text{д}} \cdot 365 \text{ д} = 78\,840 \text{ м}^3/\text{год}$.

Графики зависимостей расхода газа от оставшейся теплоты в результате процесса горения с нечетким регулированием и без регулирования представлены на рис. 7.

Из графиков (рис. 7) видно, что система с нечетким регулированием позволяет экономить газ во всём диапазоне производительности тепловой установки.

Заключение

Энергосберегающее управление процессом горения в рабочем пространстве тепловых установок при использовании системы управления, основанной на принципе нечеткой логики, имеет ряд преимуществ над традиционными стабилизирующими системами управления, в условиях действия множества случайных факторов и существенно нелинейной связи между входными и выходными величинами, а именно: возможность поддержания определённой траектории выхода на задание, быстрдействие, меньшее значение динамической ошибки и переходный процесс протекает без перерегулирования и колебаний, что благоприятно скажется на ресурсе исполнительного механизма.

Значимость данного изобретения заключается в том, что режим управления процессом горения в рабочем пространстве тепловых установок оказывает влияние на величину удельного расхода топлива, на сохранность технологических агрегатов и на экологические условия. Внедрение данного изобретения позволит повысить КПД

тепловых агрегатов и снизить содержание вредных выбросов (таких как оксид углерода и окислы азота) в продуктах сгорания.

Энергосберегающее управление процессом горения в рабочем пространстве тепловых установок позволяет достичь высоких технико-экономических показателей, благодаря экономии топлива (природного газа).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев, М.И.** Управление давлением в рабочем пространстве промышленных печей при использовании принципа нечеткой логики / М.И. Васильев, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.У. Ахметов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – Издательство: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2014 г., с. 35-45.
2. **Парсункин, Б.Н.** Энергосберегающее нечеткое управление давлением в рабочем пространстве нагревательных печей. АВ ОВО ... (С САМОГО НАЧАЛА ...) / Б.Н. Парсункин, М.И. Васильев // ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Издательство: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2014 г., с.81-90.
3. **Рассел, С.** Искусственный интеллект: современный подход [Текст]: научное пособие / С. Рассел, П. Норвиг – М.: Издательский дом «Вильямс», 2010. – 408 с.
4. Вестник «МГТУ им. Г.И. Носова» №4 (36) декабрь 2011 г., с.69-73.
5. **Заде, Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166с.
6. **Dadios, E.P.** (ред.) Fuzzy Logic - Algorithms. Techniques and Implementations / издательство ИнТех, 2012 – 294 с.
7. **Syropoulos, A.** Theory of Fuzzy Computation / издательство Springer, 2014 – 170 с.
8. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский // М.: «Горячая линия – Телеком», 2004 – 452 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРНО-ИМПУЛЬСНОГО ПУСКА ПРИ НАЛИЧИИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И БЕЗ НИХ

К.В. Лицин¹, В.В. Орехов², Т.М. Сарманов³

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
^{2,3}Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE VECTOR-PULSE START CONTROL SYSTEM IN THE PRESENCE OF THE INTERMEDIATE TRANSFORMERS AND WITHOUT

K.V. Litsin¹, V.V. Orekhov², T.M. Sarmanov³

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
^{2,3}Novotroitsk branch MISIS, Russia

¹k.litsin@rambler.ru

²skat056@yandex.ru

³stm.94@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние промежуточных трансформаторов в схеме управления векторно-импульсного пуска на синхронный двигатель. Получены качественные показатели переходного процесса скорости, позволяющие сделать вывод об эффективности использования промежуточных трансформаторов в этой системе. Проанализировано динамическое изменение потерь при векторно-импульсном пуске с промежуточными трансформаторами и без них.

Ключевые слова: синхронный двигатель, векторно-импульсный пуск, система управления, трансформатор, сравнительный анализ.

Abstract. The effect of the intermediate transformers in the vector-pulse start control system on the synchronous motor is explored. Qualitative indicators of the transient speed process allows to conclude the efficiency of using the intermediate transformers in this system are obtained. The dynamic change of loss in vector-pulsed start with intermediate transformers without them is analyzed.

Keywords: synchronous motor, vector-impulse start, control system, transformer, comparative analysis.

Введение

При рассматриваемом плавном пуске высоковольтного синхронного двигателя с промежуточными трансформаторами в составе устройства плавного пуска имеются полупроводниковые преобразователи, которые работают по принципу векторно-импульсного управления с импульсной и широтно-импульсной модуляцией напряжения. При этом осуществляется нагрев двигателя, а так же оказывается влияние на показатели качества электроэнергии питающей сети [1]. Предлагаемое устройство пуска представляет собой систему дискретного управления параметрами электроэнергии, которая подводится к синхронной электрической машине. Таким образом, имеем, что на двигатель приходит периодическое несинусоидальное напряжение. Оно включает в себя основную и высшие гармоники. Наличие гармоник высшего порядка приводит к росту различных показателей, которые связаны с несинусоидальностью. Кроме того, происходит рост реактивной мощности и возникает необходимость решения задачи электромагнитной совместимости вентиляльных электроприводов с питающей сетью [2,3].

При векторно-импульсном пуске должны достигаться более благоприятные энергетические характерис-

тики, нежели при использовании других устройств, обеспечивающих пуск электродвигателей. Однако их все же важно исследовать. К параметрам, которые должны быть рассмотрены, относятся: активная и реактивная мощность, коэффициент и потери мощности [4].

Кроме того, в предлагаемой схеме имеются понижающий и повышающий трансформаторы. При использовании трансформаторов в вентиляльных преобразователях в цепи их вторичных обмоток включают электрические вентили, пропускающие ток только в одном направлении [5].

Таким образом, необходимо провести сравнение схемы векторно-импульсного пуска при наличии и отсутствии промежуточных трансформаторов с целью получения ответа об эффективности их использования.

Функциональная схема системы векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя с промежуточными трансформаторами и бездатчиковым определением углового положения представлена на рисунке 1.

Силовая часть схемы содержит два трехфазных трансформатора, понижающий (Tr1) и повышающий (Tr2), два трехфазных диодных моста VD₁ – VD₄ и VD₅ – VD₈, а так же два IGBT-транзистора VT₁ и VT₂, коммутирующих обмотки статора на стороне постоянно-

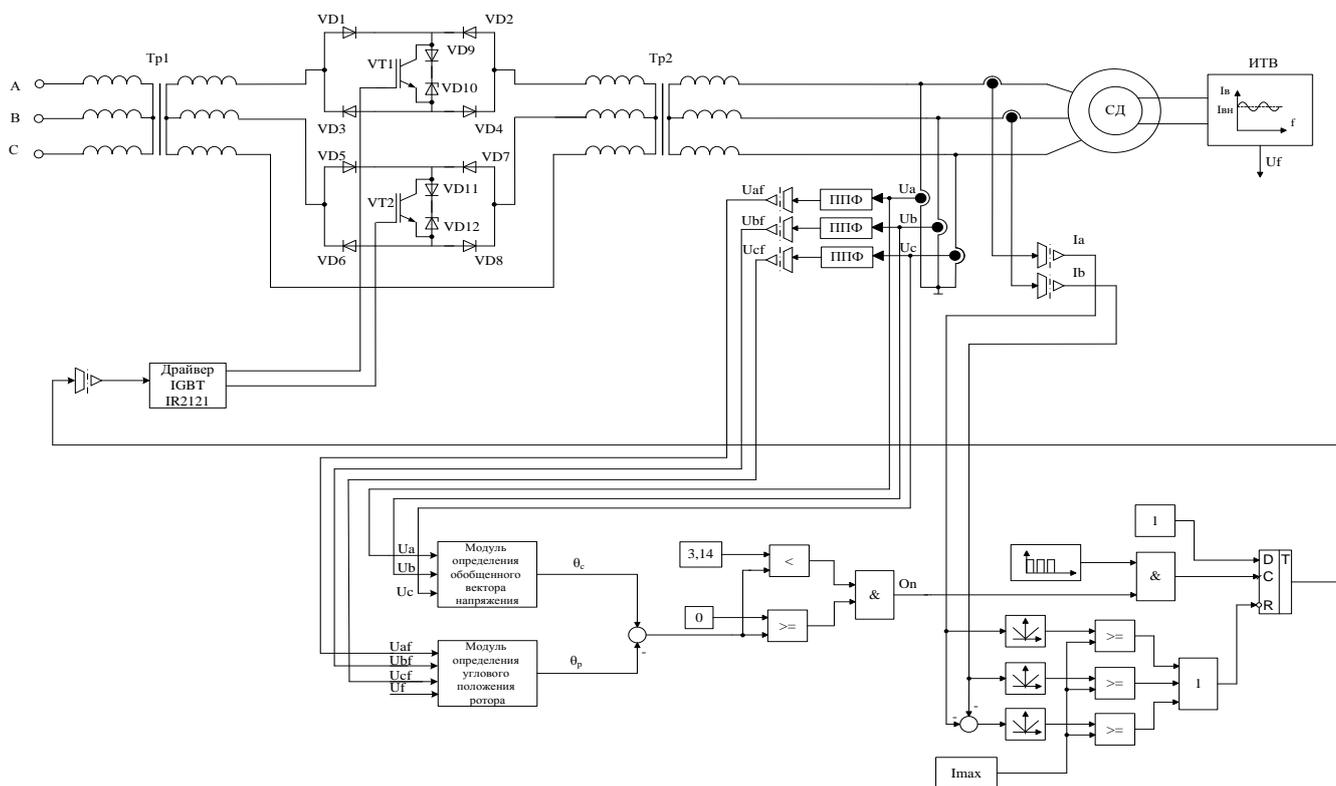


Рис. 1. Функциональная схема системы векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя

го тока. Элементы $VD_9 - VD_{12}$ являются снабберной цепью для защиты транзистора от бросков напряжения при коммутации [6].

В результате, были определены качественные показатели для переходных процессов скорости с промежуточными трансформаторами и без них (таблица 1).

Точное определение потерь энергии в переходных процессах пуска СД с помощью полупроводниковых преобразователей, работающих в импульсном режиме, нельзя выполнять по статическим зависимостям, так как электромагнитные переходные процессы вносят существенные коррективы в динамические характеристики асинхронных электроприводов и влияют на энергопотребление [7]. На основании этого для вычисления КПД и потерь энергии при пуске была применена модель, собранная в среде Matlab Simulink, изображенная на рис.2.

У нее входными переменными выступают угловая скорость, момент и величина потребляемой активной мощности. Выходные переменные:

- величина механической мощности, которая отдаётся двигателем в нагрузку (о.е.), $P2^*$;
- КПД, kpd ;
- суммарные потери энергии, dW .

С помощью схемы, изображенной на рис. 2, были произведены вычисления потерь (dW) для схемы векторно-импульсного пуска синхронного двигателя с промежуточными трансформаторами и без них (рис.3).

В результате, использование промежуточных трансформаторов приводит к возрастанию времени регулирования, перерегулирования и времени нарастания;

Сравнительный анализ потерь, возникающих в системе векторно-импульсного пуска, показал, что при наличии промежуточных трансформаторов их число становится в три раза больше, нежели при их отсутствии.

Однако экономическая выгода, достигаемая за счёт использования трансформаторов вместо дорогих высоковольтных IGBT-транзисторов, обуславливает их применение в схеме векторно-импульсного пуска.

Таблица 1

Качественные показатели переходного процесса скорости

Параметр	Без промежуточных трансформаторов	С промежуточными трансформаторами
Время регулирования, t_{REG} , с	1,5	2,2
Перерегулирование, σ , %	4,96	6,94
Время достижения максимума, t_{max} , с	1,41	2,02
Время нарастания, t_H , с	1,38	1,99

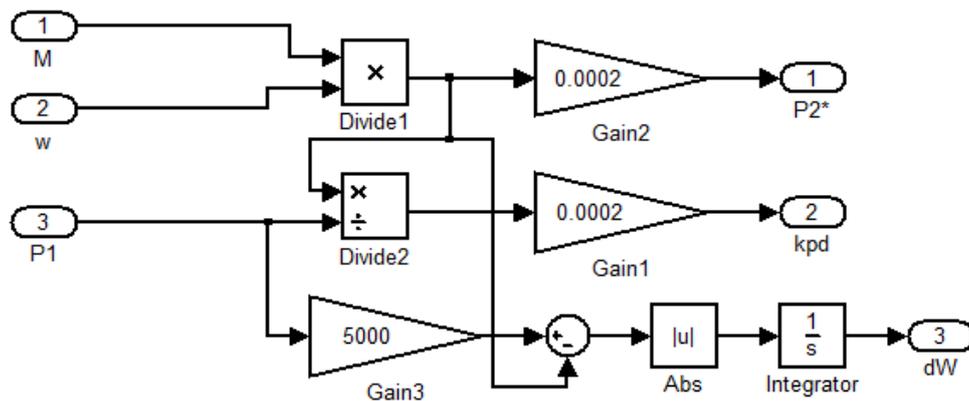


Рис. 2. Схема измерения потерь мощности и КПД в среде Matlab Simulink

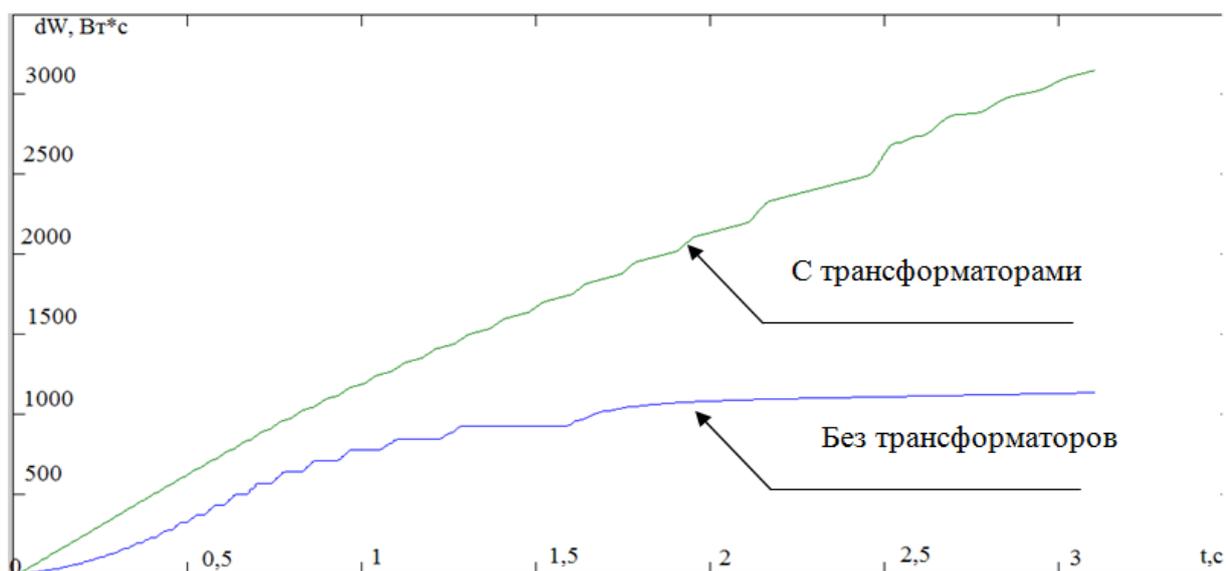


Рис.3. Динамическое изменение потерь при векторно-импульсном пуске с промежуточными трансформаторами и без них

ЛИТЕРАТУРА

1. Басков, С.Н. Принцип векторно-импульсного управления электродвигателями переменного тока / С.Н. Басков, К.В. Лицин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". – 2013. – Т. 13, №1. – С. 92-95.
2. Корельский, Д.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Д.В. Корельский, Е.М. Потапенко, Е.В. Васильева // Научный журнал "Радиоэлектроника. Информатика. Управление". – 2001. – С. 155-159.
3. Куксин, А.В. Математическая модель адаптивно-векторной системы управления бездатчикового асинхронного электропривода / А.В. Куксин, А.В. Романов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 11. – С. 85-87.
4. Басков, С.Н. Исследование положения вектора потокоцепления ротора при векторно-импульсном пуске / С.Н. Басков, А.С. Коньков, Т.В. Черкас, К.В. Лицин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". – 2012. – №37. – С. 68-72.
5. Басков, С.Н. Высокочастотная инжекция сигналов при бездатчиковом методе определения углового положения ротора синхронного двигателя / С.Н. Басков, К.В. Лицин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 28-33.
6. Басков, С.Н. Пусковое устройство для асинхронного электродвигателя с реализацией векторно-импульсного принципа управления / С.Н. Басков, А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый // Труды IV международной конференции по автоматизированному электроприводу: "Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития". 2004 г. С. 343 -346.
7. Baskov S.N., Litsin K.V. Determination of the angular position of the rotor of a synchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding (2015) International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015. С. 7146993.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Жаданос¹, И.В. Деревянко², О.Н. Кукушкин³

^{1,2,3}Национальная Металлургическая Академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

RESEARCH OF HEAT ENGINEERING PROCESSES OF SECONDARY METALLURGY TO DEVELOPMENT THE AUTOMATED INFORMATIONAL SYSTEM

A.V. Zhadanos¹, I.V. Derevyanko², O.N. Kukushkin³

^{1,2,3}National metallurgical academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

¹Alexjad@mail.ru, ²Thorsic@meta.ua, ³olkuk37@mail.ru

Аннотация. Проведены теоретические и экспериментальные исследования теплоэнергетических процессов в расплаве во время внепечной обработки, и по их результатам получены аналитические зависимости, которые обеспечивают точность прогноза температуры металла в пределах $\pm 5^\circ$, что дает возможность дальнейшего применения в АСУ ТП участка внепечной обработки стали. С применением метода динамического программирования разработан алгоритм расчета оптимального энергетического режима на каждом этапе нагрева на УКП, что позволяет выдавать оперативные рекомендации по управлению режимом обработки. На основании результатов исследований разработана структура автоматизированной информационной системы (АИС) участка внепечной обработки стали (УВОС).

Ключевые слова: внепечная обработка стали, установка ковш-печь (LF), вакуумная установка (VD), энергоэкономичный режим, теплоэнергетические процессы, энергетический баланс, автоматизированная информационная система.

Abstract. The theoretical and experimental researches of heat engineering processes in liquid steel during secondary metallurgy have been completed and according to the results of these researches analytical dependencies have been obtained. The dependencies allow predicting the temperature of liquid steel within an accuracy of $\pm 5^\circ$ and make a possibility of further application in automated control system of secondary metallurgy. With applying of dynamic programming method the algorithm of calculation of optimal regime on every stage of ladle-furnace process has been developed, that allows issuing of urgent recommendations to processing mode control. According to the results of the researches a structure of automated information system for secondary metallurgy has been developed.

Keywords: secondary metallurgy, ladle-furnace (LF), vacuum degassing (VD), energy-saving mode, heat engineering processes, power balance, automated information system (AIS).

Актуальность работы

Внепечная обработка стали расплавов на электродуговой установке ковш-печь (УКП) и вакуумной установке - одно из инновационных направлений в современной металлургии. Важным направлением по усовершенствованию технологии внепечной обработки стали являются снижение удельного расхода электрической энергии, обеспечение стабильной, регламентируемой технологическими условиями температуры металла перед разливкой, предотвращение выплесков металла при ковшевом вакуумировании.

В условиях плохой наблюдаемости основного регулируемого параметра процесса - температуры расплава, необходимо прогнозировать её с помощью математических моделей, что является важным условием для оптимизации затрат электроэнергии.

Большинство систем автоматизированного управления внепечной обработкой стали, выполняют в основном информационные функции, но не выдают рекомендаций по ведению процесса обработки металла и

не обеспечивают оперативного контроля температуры стали. Поэтому во время обработки расплава достаточно сложно достичь энергоэкономичного режима работы УКП, гарантировать регламентированные технологическими условиями температуры металла перед разливкой. Таким образом, интеграция разработанных моделей в АСУ ТП позволит реализовать новые функции - прогнозирование температуры металла, выдачу оператору технологических рекомендаций по ведению процесса нагрева и режима продувки металла инертным газом при вакуумной обработке. При этом необходимо учитывать взаимовлияние агрегатов внепечной обработки стали.

Проблемам математического моделирования теплоэнергетических процессов в агрегатах внепечной обработки стали посвящены работы [1-4]: показана взаимосвязь между напряжением на вторичной обмотке трансформатора УКП и длиной дуги, а также зависимость скорости нагрева металла от толщины шлакового покрова [1]; приведены результаты экспериментальных исследований энергетических показателей УКП при различных технологических режимах, показано влияние устойчи-

ности горения дуги на эффективность теплообмена в системе дуга-расплав [2]; исследована эффективность преобразования энергии, определен энергетический к.п.д. при нагреве и тепловой баланс установки с учетом технологических остановок и нестационарных начальных условий внутри футеровки ковша перед обработкой [3]; приведена экспериментальная зависимость изменения температуры расплава от времени вакуумной обработки [4].

Для обеспечения заданной точности математической модели целесообразно дополнительно учесть влияние продувки инертным газом на тепловые потери вследствие оголения поверхности расплава. Также необходимо получить аналитические выражения, описывающие изменение температуры металла в зависимости от значений входных параметров процесса (подводимая электрическая мощность, толщина шлакового покрова, масса расплава, температура футеровки ковша, расход аргона, начальная температура расплава). На ряде металлургических заводов внедрены АСУ внепечной обработки стали, в которые заложены модели, прогнозирующие температуру металла с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$ [5, 6]. Однако принципы построения и структура данных моделей не приведена. Таким образом, решение поставленных в работе задач весьма актуально.

Структура автоматизированной информационной системы

Для обеспечения рациональных режимов внепечной обработки стали предлагается автоматизированная информационная система участка внепечной обработки стали (АИС УВОС) (рис. 1). Основное назначение АИС УВОС заключается в выдаче оператору на пульте управления информации о текущей температуре металла по ходу процесса внепечной обработки стали, уровне

металла в ковше при вакуумировании, выдаче рекомендаций по ведению электрического режима обработки металла в УКП. АИС для одного из обрабатываемых ковшей состоит из следующих подсистем: «модель транспортировки на УКП»; «модель УКП»; «рекомендации по энергетическому режиму УКП»; «прогноз конечной температуры на УКП»; «модель транспортировки УКП – VD»; «модель VD»; «архивация данных».

Входными параметрами системы являются температура футеровки ковша выпуском расплава ($T_{фут.0}$), начальная температура расплава ($T_{расп.0}$), масса расплава ($M_{расп}$), количество, время и вид вводимых в расплав легирующих, раскислителей и шлакообразующих материалов ($mCaO_i$, $mCaF_{2i...mNi_i}$), расход аргона (Q_{Ar}), задействованные ступени напряжения трансформатора (u_0, u_1, \dots, u_n), уровень металла в ковше ($H_{расп}$).

Математическое обеспечение АИС УВОС

В основу математической модели теплоэнергетических процессов внепечной обработки стали положены балансовые уравнения, которые учитывают потери энергии сквозь стенки и днище ковша, потери энергии с поверхности металла, нагрев металла от электрических дуг и изменение температуры за счет легирующих, раскислителей и шлакообразующих материалов. В качестве объекта для адаптации моделей выбран участок внепечной обработки стали, на котором обрабатываются углеродистые стали. Внепечной обработке длительностью 120-150 минут (в том числе 20-50 минут обработка на УКП мощностью 14,4 МВ·А) подвергаются ковши с $M_{расп} = 95-115 \text{ т}$ [7].

Изменение температуры расплава в период между окончанием выпуска из сталеплавильной печи и началом обработки на УКП (подсистема «модель транспортиров-

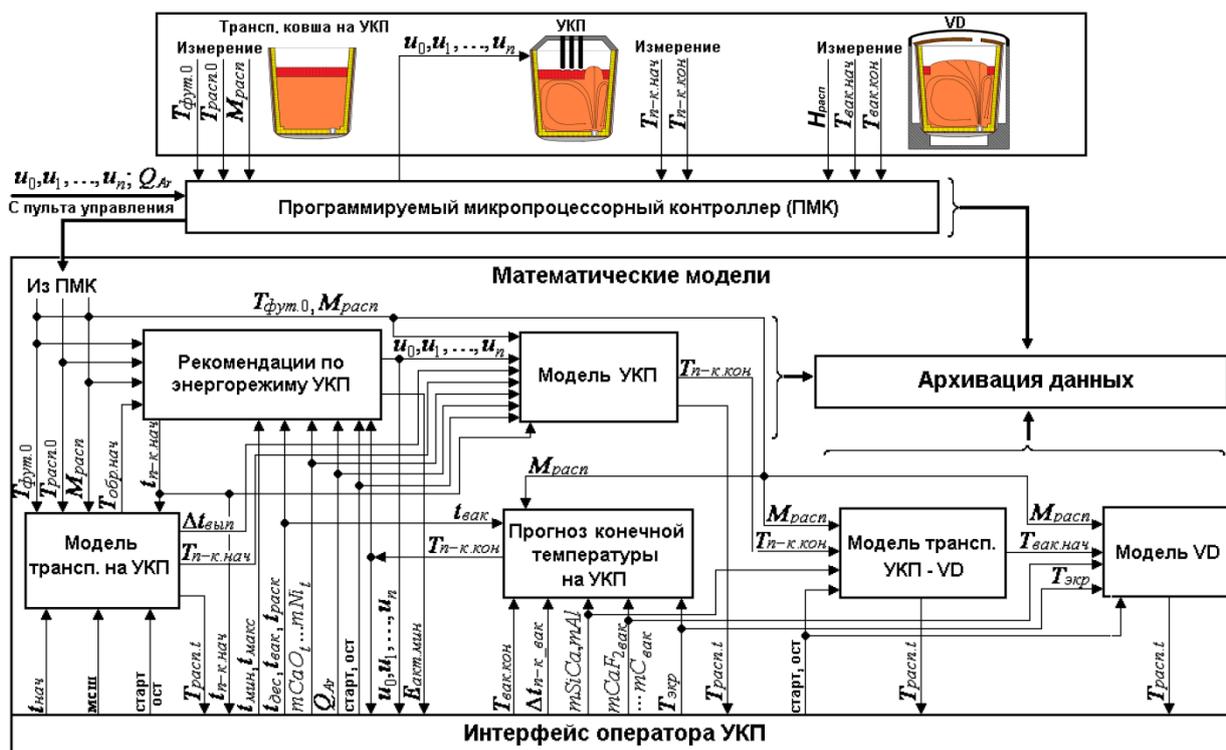


Рис. 1. Структура АИС УВОС

ки на У КП») происходит вследствие влияния двух взаимосвязанных факторов: тепловых потерь с поверхности расплава излучением и конвекцией (зависят от вида шлакового покрова), и теплопередачей через футеровку ковша.

Для оценки изменения тепловой энергии расплава $\Delta E_{расн.1}$ предложена аналитическая зависимость:

$$\Delta E_{расн.1} = k_1 \cdot t_{выд} + k_2 \cdot \sqrt{t_{выд}},$$

где $t_{выд}$ – время выдержки металла в ковше; k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от $T_{фут.0}$ (1020...1470 К) и $T_{расн.0}$ (1850...1890 К).

В подсистеме АИС УВОС «модель У КП» выполняется определение температуры расплава на У КП. Необходимо учитывать, что У КП является сложным теплофизическим объектом с переменными состояниями. Переменность состояний обусловлена переключениями мощности трансформатора, а также остановками нагрева для контроля температуры металла. Динамика температуры стали зависит от подводимой электрической мощностью дугами и тепловых потерь вследствие расплавления легирующих и шлакообразующих материалов, излучения с поверхности металла и шлака, теплопередачи через футеровку ковша, интенсивности продувки аргоном.

При определении тепловых потерь излучением учитывали наличие открытой поверхности металла, которая образуется восходящими потоками аргона. Считали, что приведенная степень черноты поверхности расплав/шлак в период нагрева $\varepsilon_{р-ш.нр.2}$, степень черноты открытой поверхности металла $\varepsilon_{расн}$ – постоянные величины. Во время технологических остановок, в связи с затвердеванием шлакового покрова, тепловые потери с покрытой шлаком поверхности уменьшаются. Поэтому принималось допущение, что приведенная степень черноты поверхности расплав/шлак описывается уравнением $\varepsilon_{р-ш.нр.3} = a \cdot (t_{ост} + 1)^b$, где $t_{ост}$ – продолжительность остановки. В результате сопоставления теплофизических расчетов с результатами промышленных экспериментов получены следующие величины теплофизических параметров:

$$\alpha_{расн} = 1095 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

$$\varepsilon_{расн} = 0,82; \varepsilon_{р-ш.нр.2} = 0,59;$$

$$\varepsilon_{р-ш.нр.3} = 0,59 \cdot (t_{ост} + 1)^{-0,45}.$$

Максимальное отклонение температуры между модельными и экспериментальными данными не превышает $\pm 5^\circ$, то есть пребывает в пределах точности измерительных приборов.

Установлено, что увеличение энергии расплава во время хорошо описывается уравнением вида [8]:

$$\Delta E_{расн.2} = \left(a_j \cdot H_{шл} + b_j \cdot Q_{Ar} + c_j \cdot t_{выд} + d_j \cdot T_{н-к.нач} + e_j \cdot T_{фут.0} + f_j \right) \cdot t_{нагр},$$

где $Q_{Ar} = 0,8-2,0$ л/мин·т; $t_{выд}$ – время выдержки стали

в ковше, мин; $a_j, b_j, c_j, d_j, e_j, f_j$ – коэффициенты уравнения, зависящие от ступени напряжения трансформатора.

При этом затраты энергии за счет ввода шлакообразующих, легирующих добавок, раскислителей должны рассчитываться дополнительно.

Полученные математические модели были использованы при разработке алгоритма расчета рационального энергетического режима на каждом этапе нагрева металла на У КП (подсистема «рекомендации по энергетическому режиму У КП»).

Задача энергоэкономии формулируется следующим образом: за заданное время, при минимально возможном расходе активной электрической энергии, передать расплаву необходимый запас теплоты для выполнения последующих технологических операций. Целевая функция определяется выражением [8]:

$$E_{акт} = \sqrt{3} \cdot \sum_{j=1}^n U_{2,j} \cdot I_{2,j} \cdot \cos \varphi_j \cdot t_{нагр,j} \rightarrow \min,$$

где $t_{нагр,j}$ – время нагрева на ступени напряжения j .

Отличие поставленной задачи от классических задач этого вида заключаются в следующем:

- момент времени, когда можно определить наиболее благоприятное время начала нагрева металла и последовательность переключений ступеней напряжения, зависит от обработки предыдущей заявки (ковша);
- момент начала обработки расплава на У КП определяется временем, к которому необходимо завершить нагрев металла, а также случайным характером входных параметров ($M_{расн}, T_{фут.0}, T_{расн.0}$);
- задана не конечная точка траектории нагрева (температура), а задан диапазон допустимых температур по окончании следующей операции – вакуумирования;
- временной период между окончанием обработки на У КП и началом вакуумирования является случайной величиной.

Решение задачи состоит в определении времени начала нагрева металла на У КП и временной последовательности переключений ступеней напряжения трансформатора. Таким образом, поставленная задача является стохастической задачей динамического программирования.

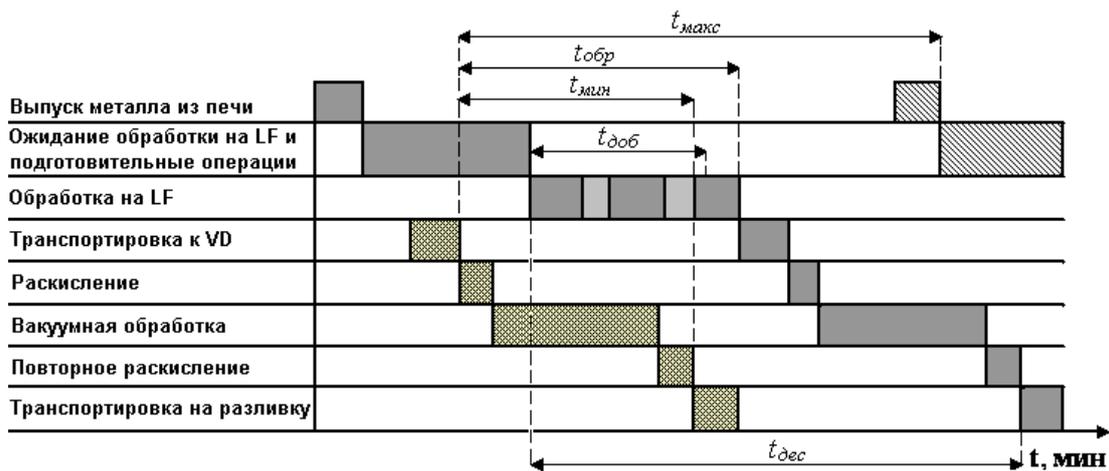
При разработке алгоритма учитывали влияние на работу У КП смежных технологических агрегатов участка внепечной обработки стали – машины скачивания шлака и вакуумной установки, а также сталеплавильных печей. Это порождает ограничения по времени на длительность обработки стали на У КП (рис. 2 а).

$$t_{мин} \leq t_{обр} \leq t_{макс};$$

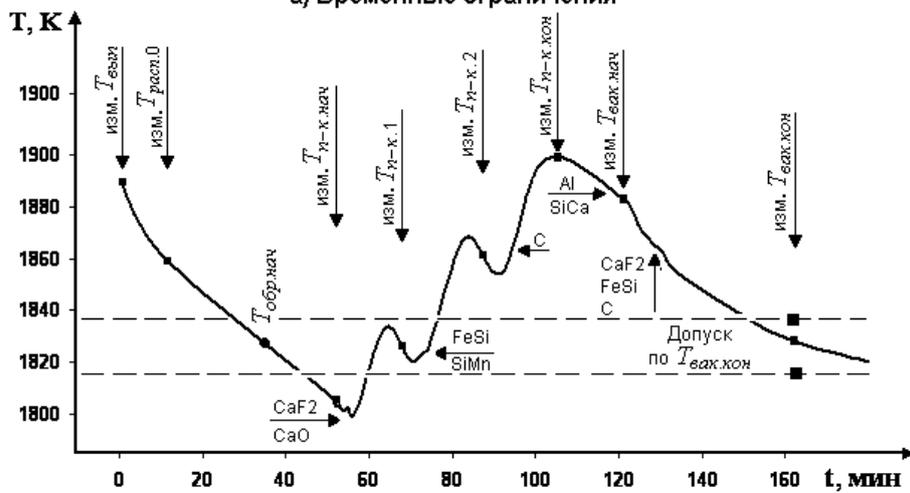
$$t_{дес.мин} \leq t_{обр.п-к};$$

$$t_{доб} + t_{усв} \leq t_{нагр},$$

где $t_{обр} = t_{обр.п-к} + t_{см}$ – время внепечной обработки, включающее обработку расплава на У КП и выдержку под слоем утепляющей смеси до нагрева; $t_{мин}$ – минимально возможное время внепечной обработки, по достижении



а) Временные ограничения



б) Ограничение по температуре расплава

Рис. 2. Технологические ограничения обработки стали на УКП

которого возможно вакуумирование данного ковша; t_{\max} – максимально возможное время внепечной обработки, определяемое периодичностью выпуска последующих плавов из сталеплавильных агрегатов;

$$t_{\text{обрл-к}} = \sum_{j=1}^n t_{\text{нагр.}j} + t_{\text{ост}} - \text{время обработки на УКП,}$$

включающее нагрев на ступенях напряжения и технологические остановки; $t_{\text{дес.мин}}$ – минимальное время обработки на УКП, которое обеспечивает проведение десульфурации стали; $t_{\text{дооб}}$ – время ввода последней порции легирующих, раскислителей и шлакообразующих материалов; $t_{\text{усв}}$ – время усвоения добавок.

Процесс десульфурации начинается сразу после наведения шлака на УКП и продолжается (рис. 2 а) во время раскисления и вакуумной обработки металла. Тогда минимальное время десульфурации стали при обработке на УКП:

$$t_{\text{дес.мин}} = t_{\text{дес.техн}} - t_{\text{вак}} - t_{\text{раск}},$$

где $t_{\text{дес.техн}}$ – необходимое по технологии общее время десульфурации (40-60 минут), $t_{\text{вак}}$ – время вакуумирования, $t_{\text{раск}}$ – время раскисления стали.

С учетом, что температура стали перед разливкой должна находиться в заданном технологическими требо-

ваниями диапазоне $T_{\min} \leq T_{\text{вак.кон}} \leq T_{\max}$, который зависит от марки стали (например, для ряда углеродистых сталей 1818-1838 К), уравнение теплового баланса является основным ограничением задачи энергоэкономии (рис. 2 б):

$$E_{\text{расп}} = \sum_{t_{\text{обр}}=1}^n \Delta E_{\text{расп}i},$$

где $E_{\text{расп}}$ – энергия, которую необходимо передать во время обработки; $\Delta E_{\text{расп}i}$ – приращение энергии расплава за шаг обработки, которое происходит вследствие подвода энергии во время работы УКП и тепловых потерь, связанных с нагревом футеровки ковша и теплопередачей через нее, излучением с поверхности металла и шлака. Величину $E_{\text{расп}}$ определяли из выражения:

$$E_{\text{расп}} = M_{\text{расп}} \cdot C_{\text{расп}} \cdot (T_{\text{н-к.кон}} - T_{\text{обр.нач}}) + E_{\text{дооб}},$$

где $E_{\text{дооб}}$ – затраты энергии, связанные с нагревом и расплавлением химических добавок; $T_{\text{н-к.кон}}$ – температура расплава, при превышении которой должна закончиться обработка на УКП; $T_{\text{обр.нач}}$ – температура на начальном шаге решения задачи динамического программирования.

Для определения температуры, по достижении которой необходимо закончить процесс обработки стали на У КП, рассмотрены теплоэнергетические процессы в расплаве во время транспортирования ковша со сталью с этой установки в вакуумную камеру и во время вакуумной обработки (подсистемы «**модель транспортирования У КП – VD**»; «**модель VD**»). Основная сложность оценки тепловых потерь во время вакуумирования заключается в необходимости учета процесса сложного теплообмена между поверхностью расплава, защитным экраном и водоохлаждаемой крышкой. Выполненные расчеты и машинные эксперименты на полученных моделях позволили получить аналитическую зависимость, которая позволяет определить конечную температуру нагрева металлу на У КП (подсистема «**прогноз конечной температуры на У КП**»):

$$T_{n-к.кон} = t_{вак} - k_3 \cdot M_{расп} - k_4 \cdot T_{экр} + k_5 \cdot T_{вак.кон} + \Delta T_{доб}$$

где $k_3 - k_5$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от $t_{вак}$ – длительность вакуумной обработки, $T_{вак.кон}$ – регламентированная конечная температура вакуумирования, $\Delta T_{доб}$ – изменение температуры стали за счет введения химических добавок.

Решение задачи энергоэкономии на каждом из n шагов обработки заключается в том, чтобы найти такую последовательность технологических режимов u_0, u_1, \dots, u_n , при которых целевая функция принимает минимальное значение. По ходу процесса возможны следующие технологические режимы: $u_n = 0$ – выдержка под слоем утепляющей смеси; $u_n = 1 \dots 6$ – нагрев на ступенях напряжения 4-9; $u_n = 7$ – технологические остановки по ходу нагрева. Для процесса выдержки расплава под слоем утепляющей смеси и последующей его обработки на У КП уравнение Беллмана имеет вид [8]:

$$E_{акт}(u) = \min \left[E_{акт,n}(u_n) + f_{n+1}(E_{расп,n} - \Delta E_{расп,n}(u_n)) \right],$$

где $E_{акт}(u)$ – активная электрическая энергия, затраченная за время обработки; $\Delta E_{акт,n}(u_n)$ – активная электрическая энергия, затраченная за n шагов обработки при технологическом режиме u ; $f_{n+1}(E_{расп,n} - \Delta E_{расп,n}(u_n))$ – минимальное значение целевой функции на $n+1$ -ом шаге с учетом режима обработки на шаге n ; $E_{расп,n}$ – энергия, которую необходимо сообщить расплаву на момент выполнения n шага обработки, $\Delta E_{расп,n}(u_n)$ – энергия, переданная расплаву на шаге n .

Функция f_{n+1} связана с активной энергией следующим соотношением:

$$f_{n+1}(E_{расп,n} - \Delta E_{расп,n}(u_n)) = n(u=1) \cdot \Delta E_{акт}(u=1) + \dots + n(u=6) \cdot \Delta E_{акт}(u=6)$$

где $n(u=1) \dots n(u=6)$ – число шагов с режимами $u = 1 \dots 6$; $\Delta E_{акт}(u=1) \dots \Delta E_{акт}(u=6)$ – активная электрическая энергия, затраченная за шаг обработки при режимах $u = 1 \dots 6$.

Число шагов с режимами $u = 1 \dots 6$ определяли путем решения неравенства:

$$E_{расп,n+1} - \Delta E_{расп,n}(u_n) \geq n(u=0) \cdot \Delta E_{расп}(u=0) + \dots + n(u=7) \cdot \Delta E_{расп}(u=7)$$

где $\Delta E_{расп}(u=0) \dots \Delta E_{расп}(u=7)$ – приращение запаса теплоты за шаг обработки при режимах $u = 0 \dots 7$. При решении задачи динамического программирования учитывается переменность структуры возможных режимов:

$$\left. \begin{aligned} \text{если } u_{n-1} = 0 \text{ то } u_n \in [0 \dots 6], u_n \in Z \\ \text{если } u_{n-1} \neq 0 \text{ то } u_n \in [1 \dots 7], u_n \in Z \end{aligned} \right\}$$

Моделирование и анализ результатов

В качестве примера, для численного решения задачи динамического программирования рассмотрена реальная производственная ситуация:

- расплав массой 113,2 т и начальной температурой 1873 К выпущен в ковш с $T_{фут,0} = 1173$ К;
- через 23 минуты после выпуска стали, в связи с занятостью У КП, зеркало металла по окончании скачивания шлака утеплено специальной смесью;
- после выдержки под слоем утепляющей смеси в течение 27 минут появилась возможность решить задачу оптимального управления, при этом необходимо учитывать, что раскисление и вакуумная обработка данной плавки может начаться не ранее чем через 56 минут, т.е. $t_{обр} \geq 56$;
- температура, по достижении которой необходимо завершить нагрев металла $T_{n-к.кон} = 1884$ К.

При решении задачи динамического программирования предполагалось, что заранее известен расход аргона $Q_{Ar} = 1,5$ л/мин·т, а также количество, вид и время ввода химических добавок.

При предлагаемом нами режиме обработки нагрев металла ведется без промежуточных остановок, а время начала нагрева на У КП выбирается таким образом, чтобы энергетический КПД установки, зависящий от толщины шлака, на каждом шаге обработки был максимальным. Расход активной электрической энергии составил 17,2 МДж (4780 кВт·ч). При обработке металла под управлением оператора израсходовано 20,6 МДж (5730 кВт·ч) активной электрической энергии – на 20 % больше, чем в первом случае (рис. 3).

Существенное снижение удельного расхода электрической энергии при предложенном технологическом режиме, в отличие от существующего, происходит за счет нагрева металла без технологических остановок, обеспечения рационального перегрева стали над линией ликвидус по окончании обработки на У КП, рационального выбора времени начала обработки металла на У КП таким образом, чтобы завершить работу установки до заданного времени при максимальном энергетическом к.п.д. на каждом этапе нагрева металла. Увеличение мощности, подводимой на нагрев расплава, происходит в определенные моменты времени по мере увеличения

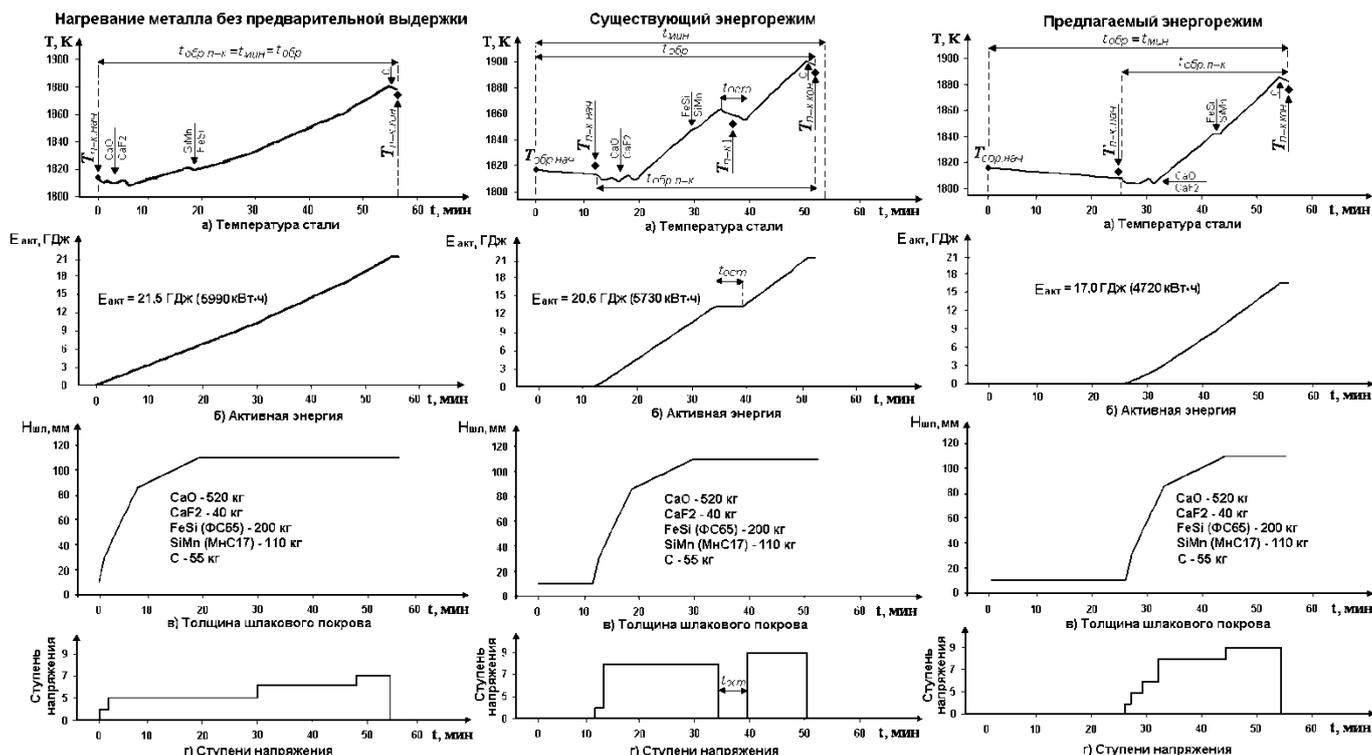


Рис. 3. Сравнительные результаты энергетических режимов: существующего, предложенного, режима нагрева без предварительной выдержки

толщины шлакового покрова, которая должна обеспечить полное экранирование электрических дуг.

Реализация предлагаемой АИС УВОС возможна в двух вариантах: вариант 1 предполагает поставить полностью новую систему; вариант 2 – модернизация действующей АСУ.

Выводы

1. На основе теплофизических расчетов и промышленных экспериментальных исследований разработана модель динамики теплового состояния расплава в ковше во время технологических операций внепечной обработки стали. Модель отличается от разработанных ранее тем, что учтено изменение коэффициента теплоотдачи металла и степени черноты расплава, а также тепловые потери с открытой поверхности стали, при разной интенсивности продувки аргоном. Это позволило обеспечить точность прогнозирования температуры стали в пределах $\pm 5^\circ$. Получены аналитические зависимости динамики температуры стали во время внепечной обработки, что дает возможность дальнейшего применения их в составе АИС УВОС.
2. С применением метода динамического программирования, разработан алгоритм определения энергоэкономичного режима на каждом этапе обработки металла на УКП, что позволяет давать оперативные рекомендации по управлению режимом нагрева.
3. Синтезирована структура АИС УВОС, основой которой являются математические модели, позволяющие обеспечить энергоэкономичный режим УКП, прогнозирование температуры металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследования с помощью математической модели теплового состояния агрегата ковш-печь при внепечной обработке металла / Н. Ф. Ахметшин, И. Ю. Зиннуров, В. С. Галян [и др.] // *Электрометаллургия*. - 2001. - №10. - С. 23-26.
2. Управление тепловым и электрическим режимами агрегата ковш-печь / Е. Б. Агапитов, Г. П. Корнилов, Т. Р. Храпшин [и др.]. // *Электрометаллургия*. - 2006. - №6. - С. 11-16.
3. Hoppmann, W. Energiehaushalt eines Pfannenofens / W. Hoppmann, F.N. Fett, T. Klages, L. Fiege // *Stahl und Eisen*. - Band (108) 5. September 1988. - № 18. - S. 841-847.
4. Knüppel Helmut. *Desoxydation und vakuumbehandlung von Stahlschmelzen*. Bad 2.: Grundlagen und verfahren der Pfannenmetallurgie / Helmut Knüppel. - **Dusseldorf**: Verlag Stahleisen MBM, 1983. - 417 s.
5. Романо М., Зоччи Г. Установки ковш-печь на заводах с полным металлургическим циклом // *Электрометаллургия*. - 2004. - №3. - С. 24-26.
6. Teworte, R. Aspects of variant RH plant design / R. Teworte, V. Wiegmann, A. Kubbe // *MPT*. - 2004. - №6 - p. 44.
7. Малик, А. А. Оснащение сталеплавильных цехов установками внепечной обработки стали / А. А. Малик, В. А. Уголков, В. Ю. Довгач // *Электрометаллургия*. - 2005. - №4. - С. 21-25.
8. Оптимизация управления энергетическим режимом электродугового агрегата ковш-печь методом динамического программирования / А. В. Жаданос, И. В. Деревянко, О. Н. Кукушкин, В. И. Головки // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2007. - № 5. - С. 37-42.

УПРАВЛЕНИЕ ОЧИСТКОЙ ГАЗОВ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

В.Ю. Шелухин¹, М.Ю. Рябчиков², Е.С. Рябчикова³, Е. Гибаяева⁴

^{1,2,3,4}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия

PROCESS CONTROL OF SINTERING MACHINES GAS PURIFICATION WITH THE USE OF A PROCESS MODEL

V. Yu. Shelukhin¹, M. Yu. Ryabchikov², E.S. Ryabchikova³, E. Gibayeva⁴

^{1,2,3,4}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹newlifemen@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены результаты внедрения автоматической системы управления очисткой газов агломерационных машин. Рассмотрены проблемы управления, связанные с переходными процессами по водородному показателю. Предложено использование математической модели процесса для повышения качества переходных процессов. За счет использования модели предлагаемая система управления будет обладать адаптивным свойством, что позволит учитывать индивидуальные характеристики объекта управления, а также их изменения в процессе эксплуатации технологического оборудования.

Ключевые слова: агломерационный процесс; газоочистка; сероулавливающая установка.

Abstract. The paper presents results of commission of an automatic control system for purification of sintermachine gases. The problems of management connected with transition processes on a hydrogen indicator are considered. We suggest using mathematical process model for quality improvement of transition processes. Using the model the proposed control system will obtain adaptive property that will allow consideration of individual characteristics of management object as well as their changes during the operation of processing equipment.

Keywords: sintering process; gas purification; sulfur recovery unit.

Описание установки газоочистки и проблемы управления водородным индексом

Агломерационный процесс является неотъемлемой частью металлургического производства, обеспечивая доменные печи сырьем с заданными физическими и химическими свойствами. От качества агломерата зависит не только качество получаемого на домне чугуна, но также эффективность и экологическая безопасность всего доменного процесса. При этом агломерационное производство является основным источником загрязнения воздушного бассейна.

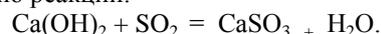
Агломерационные машины дают наибольшую долю выбросов сернистого газа среди всех металлургических переделов. Поэтому, на Магнитогорском Металлургическом Комбинате среди приоритетных задач не только повышение эффективности технологического процесса, а также качества продукции, но и улучшение экологической составляющей [1,4].

В аглоцехе это связано со строительством новой сероулавливающей установки №2 (СУУ-2). Данный объект уже обеспечивает очистку отходящих газов с аглофабрики №2, но еще не вышел на полную мощность. Также для аглофабрик №№3,4 используется СУУ-4, реконструкция которой является одним из приоритетов для производства.

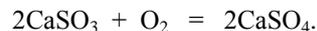
Поглотительные системы сероулавливающих установок предназначены для очистки аглогазов, отходящих

от агломерационных машин аглофабрик, от диоксида серы. Для десульфурации отходящих агломерационных газов применяется мокрый известковый метод, где в качестве поглотительного раствора используется гидроксид кальция Ca(OH)₂.

Очистка аглогазов от диоксида серы происходит за счет контакта с известковым поглотительным раствором, по схеме противотока, при этом происходит абсорбция диоксида серы по реакции:



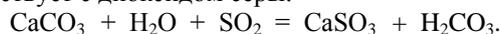
В процессе абсорбции часть сульфита кальция окисляется кислородом, который содержится в аглогазах, в сульфаты:



Полученные соли кальция обладают низкой растворимостью и выпадают из раствора в виде кристаллов. Одновременно известью абсорбируется двуокись углерода:



Карбонат кальция, образующийся в результате абсорбции двуокиси углерода известью, также взаимодействует с диоксидом серы:



На СУУ №4 предусмотрено 3 поглотительные системы для очистки отходящих газов аглофабрики № 3 и 5 поглотительных систем для очистки отходящих газов аглофабрики № 4. Принципиальная схема цепи аппаратов поглотительной системы СУУ-4 представлена на рис. 1.

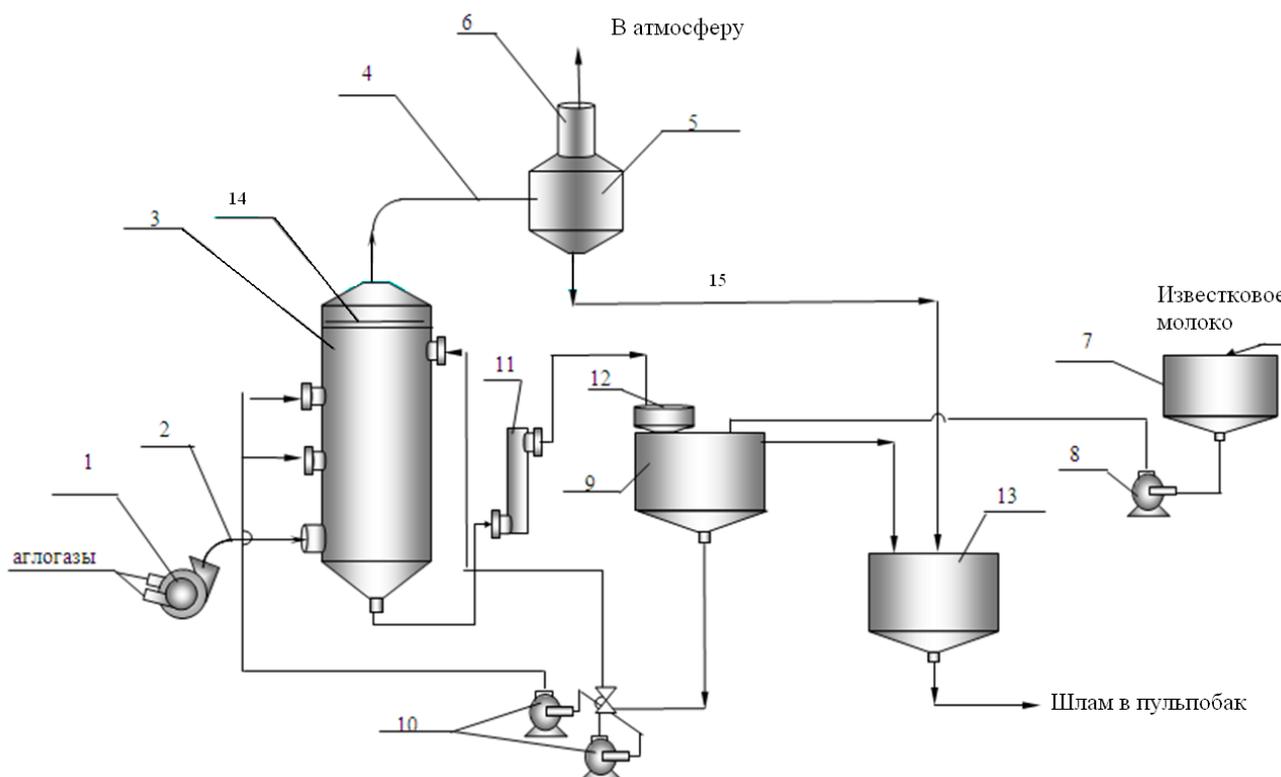


Рис. 1. Принципиальная схема цепи аппаратов поглотительной системы СУУ-4:

1 - дымосос; 2 - газоход «грязного» газа; 3 - полый скруббер с тремя ярусами орошения; 4 - газоход «чистого» газа; 5 - каплеуловитель; 6 - выбросная труба; 7 - молочный сборник; 8 - насос молочного сборника; 9 - циркуляционный сборник; 10 - циркуляционные насосы; 11 - гидрозатвор; 12 - гравитационный фильтр; 13 - шламовые сборники; 14 - встроенный каплеуловитель; 15 – конденсаторопровод

Газы от аглофабрики №4, после очистки от пыли в батарейных циклонах, эксгаустерами отводятся в подземный боров аглофабрики №4. Далее дымососами подаются через газоходы неочищенного газа в нижнюю часть скрубберов. Газы движутся к верхней части скруббера, где установлены встроенные каплеуловители.

Известковое молоко из корпуса приготовления известкового молока поступает в молочные сборники. Далее, насосами молоко подается в циркуляционные сборники, из которых двумя насосами подается на орошение аглогазов через форсунки полого скруббера. После абсорбции поглотительным раствором аглогазов, рабочий раствор собирается в конусе скруббера, откуда самотеком, через гидрозатвор, поступает в гравитационный фильтр. Фильтр разделен на две зоны перегородкой для вывода крупных частиц из суспензии, которые оседают в гидрозатворе. Слив гравитационного фильтра поступает в циркуляционный сборник поглотительной системы, где смешивается со свежим известковым молоком и вновь подается насосами в скруббер. Таким образом, осуществляется циркуляция рабочего раствора и непрерывная очистка аглогазов от диоксида серы. Отработанный раствор по шламовому желобу поступает в шламовые сборники.

Очищенный газ из верхней части скруббера по газоходу чистого газа поступает в каплеуловитель, где происходит отделение конденсата из газа, затем очищенный газ выбрасывается через дымовые трубы в атмосферу.

Уловленный конденсат по конденсаторопроводам отводится в шламовый желоб, откуда поступает в шламовые сборники. Оттуда, насосами откачивается в пульпобак РОФ.

Чтобы измерять рН, требуется средство измерения чувствительное к ионам водорода, которые определяют значение рН. Принцип измерения состоит в наблюдении реакции между сенсором со стеклянной мембраной, чувствительной к ионам водорода, и раствором образца. Наблюдаемый потенциал не обеспечивает достаточно информации, поэтому необходим еще один сенсор – электрод сравнения. Он обеспечивает калибровочный сигнал или потенциал для рН-сенсора. Необходимо использовать разницу потенциалом обоих электродов вместе, чтобы определить значение рН измеряемого образца.

Отклик рН-чувствительного электрода зависит от концентрации ионов водорода и, таким образом, дает сигнал, определенный тем, насколько кислотным или щелочным является раствор.

Электрод сравнения, с другой стороны, не реагирует на концентрацию ионов водорода в растворе и всегда производит один и тот же постоянный потенциал, относительно которого измеряется потенциал рН-сенсора. Потенциал между двумя электродами является линейной функцией концентрации ионов водорода в растворе, что позволяет проводить количественные измерения.

Для измерения рН отработанного молока используется рН-датчик Yokogawa PH8EFP [3].

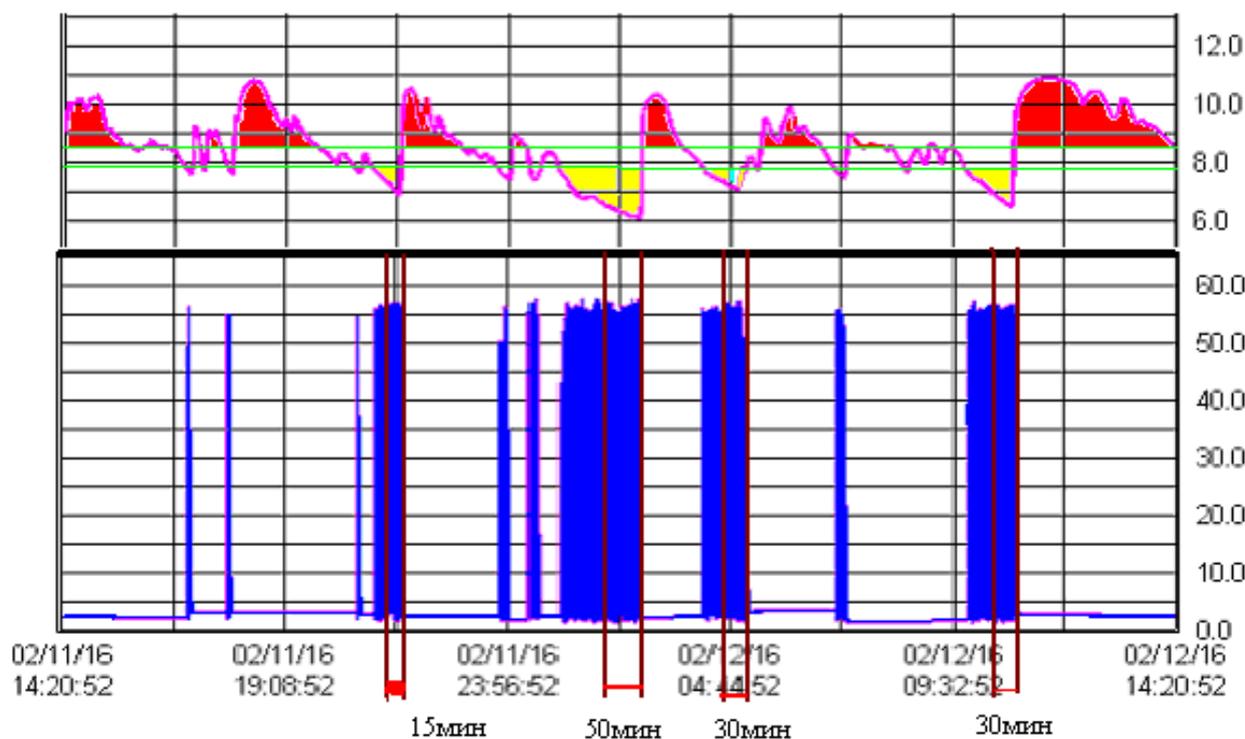


Рис. 2. Графики изменения рН и положения исполнительного механизма (ИМ) за смену

Действующая на данный момент система автоматического управления подачи свежего известкового молока имеет импульсный принцип действия. Задается определенный интервал времени подачи раствора и степень открытия регулирующего клапана для этого интервала. После прекращения подачи известкового раствора система не производит никаких воздействий в течении определенного промежутка времени (180 с), учитывающего запаздывание объекта управления. После того как время паузы окончено система управления оценивает текущее отклонение от заданного значения уровня рН. Если цель управления не была достигнута, управляющий импульс повторяется.

Так как в данный момент многие факторы, влияющие на величину уровня рН, не могут быть учтены, действующая система автоматического управления обеспечивает стабильную работу контура управления, но не может обеспечить заданные нормы качества технологического процесса. Как видно из графика на рис. 2 уровень рН колеблется от 6 до 11 при заданном 8. При этом суммарное время превышения задания по рН составляет не менее 8 часов.

Проанализируем графики, представленные на рис. 2. Красным цветом выделены участки превышения допустимого технологической картой значения уровня рН, желтым – рН ниже допустимого уровня.

Для оценки перерасхода извести выбирается четыре интенсивных участка движения исполнительного механизма, следствием которых стало изменение уровня рН в двое от необходимого уровня. То есть время открытия ИМ должно было быть в два раза меньше. С учетом этого замеряется время работы ИМ, затраченной на перерегулирование:

$$t_{\text{пер}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 15 + 50 + 30 + 30 = 125 \text{ мин} = 2,08 \text{ ч},$$

где $t_{\text{пер}}$ - включает в себя не только время движение ИМ, но время паузы, то есть:

$$t_{\text{пер}} = (t_{\text{имп}} + t_{\text{пауз}}) \cdot n,$$

где n количество импульсов за время регулирующего воздействия на ОУ.

Времени расхода известкового молока через трубопровод определяется:

$$t_p = t_{\text{пер}} \cdot \frac{t_{\text{имп}}}{t_{\text{имп}} + t_{\text{пауз}}} = 125 \cdot \frac{40}{40 + 180} = 22,7 \text{ мин} = 0,37 \text{ ч}.$$

Для расчета принимается средний расход свежего известкового молока равным $30 \text{ м}^3/\text{ч}$, тогда, при количестве извести на м^3 равной 40кг, перерасход извести будет определяться по следующему выражению:

$$Q_{\text{изв}} = t_p \cdot 30 \cdot 40 = 444 \text{ кг} = 0,444 \text{ т}.$$

Это будет перерасход на одну систему. Перерасход извести на всю СУУ-4 составит:

$$Q = Q_{\text{изв}} \cdot 8 = 3,552 \text{ т}.$$

Таким образом, повышение качества управления рН является актуальной задачей.

Предлагаемая структура системы управления водородным показателем

Предлагаемая структура системы управления водородным показателем представлена на рис. 3.

На ЭС1 поступает измеренный уровень рН_и и заданный сигнал уровня рН_з. Сигнал рассогласования ΔрН с ЭС1 подается в блок расчета необходимой дозы извести для получения заданного рН. Блок представляет собой обратную статическую характеристику ОУ1, которая в зависимости от скорости изменения уровня рН меняет свой наклон.

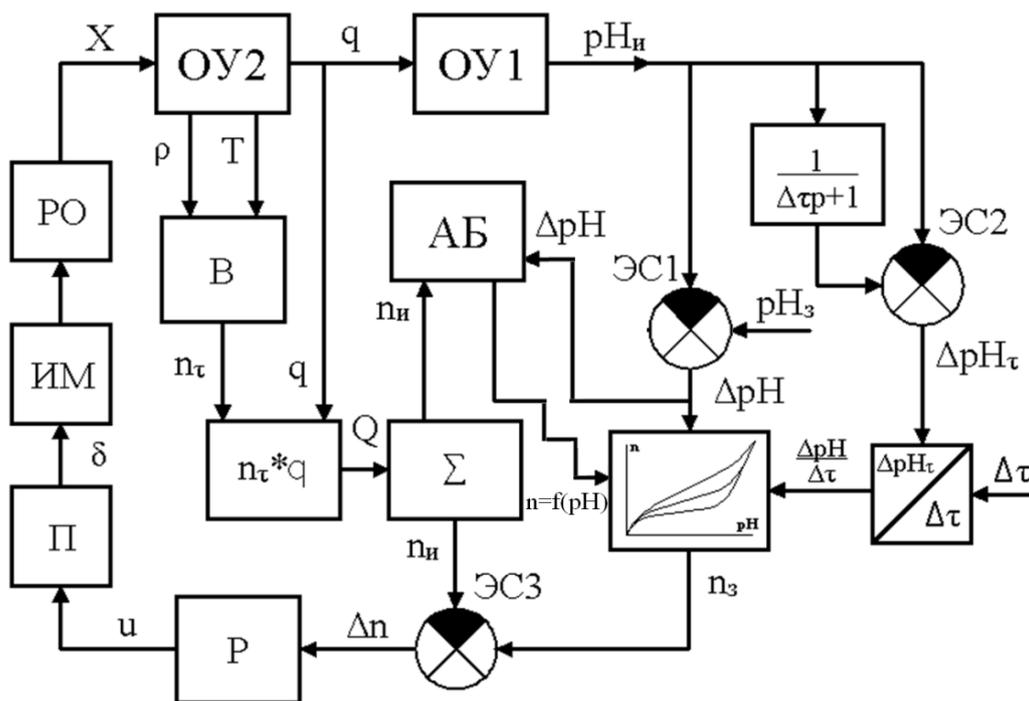


Рис. 3. Структурная схема контура управления. Условные обозначения на структурной схеме: ОУ1 – объект управления, состоящий из скруббера и трубопровода поглотительного раствора; ОУ2 – объект управления, характеризующий трубопровод подачи свежего известкового раствора; ЗП – звено запаздывания; pH_3 – задание уровня pH; pH_n – измеренный уровень pH; $n(pH)$ – модель обратной статической характеристики процесса; ЭС1,2,3 – элементы сравнения; Δn – разница между текущей и требуемой концентрации $Ca(OH)_2$; ΔpH – разница между заданным и измеренным pH; $\Delta \tau$ – заданный промежуток времени для расчета скорости изменения pH; P – регулятор; ρ – плотность известкового раствора; T – температура известкового раствора; У – усилитель сигнала управления; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; В – блок вычисления для расчета концентрации извести в растворе; АБ – блок, адаптирующий математическую модель процесса к реальному объекту

Скорость изменения уровня pH определяется с помощью элемента запаздывания ЗП, который создает необходимую выдержку времени $\Delta \tau$ для вычисления рассогласования ΔpH на ЭС2. Далее вычисляется производная $\Delta pH / \Delta \tau$. Максимальное значение производной поступает в блок расчета статической характеристики процесса.

Согласно ΔpH и $\Delta pH / \Delta \tau$ по обратной статической характеристики ОУ1 определяется n_3 – необходимое количество $Ca(OH)_2$ для получения заданного уровня pH отработанного раствора.

Значение рассчитанной дозы извести n_3 подается на ЭС3, на который также заведена отрицательная обратная связь с контура управления подачи извести. Сигнал рассогласования идет на регулятор с определенным законом управления. При рассогласовании больше заданной зоны нечувствительности регулятор P подает сигнал на подачу известкового раствора. С помощью усилителя У сигнал преобразуется для управления исполнительным механизмом ИМ. ИМ открывает регулирующий орган РО. В трубе (ОУ2) появляется поток жидкости. Измеренные температура T и плотность ρ раствора поступают в блок вычисления концентрации извести В. Рассчитанный сигнал перемножается с измеренным расходом, что определяет количество $Ca(OH)_2$ за фиксированный промежуток времени. На сумматоре Σ вычисляется количество $Ca(OH)_2$,

прошедшее через расходомер. Как только через расходомер пройдет заданное количество извести сигнал рассогласования Δn станет равным нулю регулятор P дает команду на прекращение подачи известкового раствора.

После окончания подачи рассчитанной дозы извести полученные значения ΔpH , Δn и $\Delta pH / \Delta \tau$ передаются в блок адаптации модели процесса. Через заданную выдержку времени, которая учитывает запаздывание ОУ1 и время переходного процесса, оценивается результат управления. Окончанием переходного процесса считается момент, когда $\Delta pH / \Delta \tau = 0$. После переходного процесса оценивается величина отклонения ΔpH в установившемся режиме от pH_3 . При превышении допустимого отклонения производится коррекция коэффициента наклона статической характеристики для значения $\Delta pH / \Delta \tau$.

Процесс оптимизации управления сводится к определению и подачи такого количества $Ca(OH)_2$, которое выводит уровень pH на заданное значение с минимальным отклонением и за максимально возможное время.

В реальных производственных условиях текущее положение и вид статической характеристики могут меняться из-за изменения концентрации реагирующих. Поэтому система управления анализирует текущий отклик процесса на предыдущее управляющее входного воздействие, определяя коррекцию статической характе-

ристики процесса способом, рассмотренным в работе [2].

При работе предлагаемой системы автоматического управления количество импульсов необходимых для достижения заданного рН должно снизиться. При этом время бездействия системы должно сократиться в несколько раз. Для приведенного на графиках примера время переходного процесса сократилось бы примерно в 4 раза, а благодаря минимальному перерегулированию экономия извести за сутки при среднем расходе 20 м/ч составила бы около 250 кг.

Заключение

Предлагаемая система автоматического управления дозирования извести по заданному уровню рН позволяет уменьшить отклонение от заданного значения и избежать перерегулирования за счет точного расчета необходимого расхода $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Точность работы системы может быть повышена за счет установки электромагнитного расходомера и датчика плотности известкового раствора. Влияние изменения концентрации реагирующих веществ в скруббере, а также изменения степени их смешивания оценивается по скорости изменения уровня рН. На основе оценки вводится корректирующий уровень наклона используемой модели статической характеристики коэффициент. Благодаря данной коррекции САУ адаптируется к изменению характеристик процесса десульфурации отходящих газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **ММК не будет загрязнять воздух серой** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lentachel.ru/articles/48722>, свободный. – Загл. с экрана.
2. **Рябчиков, М.Ю.** Повышение эффективности управления бесконусным загрузочным устройством в доменном цехе ОАО «ММК» / М.Ю. Рябчиков, Л.М. Трофимов // Автоматизированные технологии и производства. 2009. № 3. С. 118-124.
3. **Технические характеристики. рН и ОВП электроды** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://yokogawa.ru/upload/iblock/c54>, свободный. – Загл. с экрана.
4. Ермаков, А.В. «ПЫЛЕГАЗООЧИСТКА-2012» итоги пятой международной конференции / А.В. Ермаков // Металлург. 2012. №10. С. 89-90.

УДК 621.865.8

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ ИГРЫ В БОУЛИНГ

А.Г. Рыбаков¹, Е.П. Кильдюшкина², Н.Ю. Шкуропатский³, Ю.Ф. Муратова⁴,
Е.С. Алейникова⁵

¹ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия

^{2, 3, 4, 5}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

DEVELOPMENT OF THE MICROPROCESSOR-BASED AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ROBOTIC SYSTEMS FOR BOWLING GAME

A.G. Rybakov¹, E.P. Kil'dyushkina², N.Y. Shkuropatskiy³, J.F. Muratova⁴, E.S. Aleynikova⁵

¹CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia

^{2, 3, 4, 5}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹rybakov.a@konsom.ru

Аннотация. В статье представлено описание разработки аппаратной архитектуры мобильного робота для игры в боулинг, включая системы очувствления и управления приводами механизмов, проработка схмотехнических и программных решений обработки данных. Объектом исследования является отладочный набор Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI).

Ключевые слова: мобильный робот DaNI 2.0, myRIO, боулинг, сервопривод, датчик освещенности, веб-камера.

Abstract. The article describes the development of a mobile robot hardware architecture for bowling game, including sensitization and management systems of the driving gear, the elaboration of circuit and software processing solutions. The object of this research is a debug set called Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI).

Keywords: mobile robot DaNI 2.0, myRIO, bowling, servo drive, light sensor, webcam.

В качестве проектной работы для реализации подключения к роботу различных датчиков, актуаторов была выбрана игра в боулинг по регламенту студенческой категории «Всемирной Робототехнической Олимпиады».

Задача участников студенческой категории – построить робота, цель которого взять шар для боулинга (красный бильярдный шар) со стойки для шаров, бросить его на дорожку и заработать очки, сбив как можно большее количество кеглей.

Схематичное изображение расположения кеглей и их размеры представлены на рисунке 1.

Отладочный набор Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI)

DaNI 2.0 – это аппаратная платформа, используемая совместно с программным модулем LabVIEW Robotics Starter Kit. В её составе имеются датчики, исполнительные устройства и вычислительный модуль Single-Board Reconfigurable I/O (sbRIO). Внешний вид DaNI изображен на рисунке 2.

В состав отладочного набора DaNI входит: собранный робот с рамой, колесами, приводом на ведущие колеса, двигателями, комплектом датчиков, и комплектом

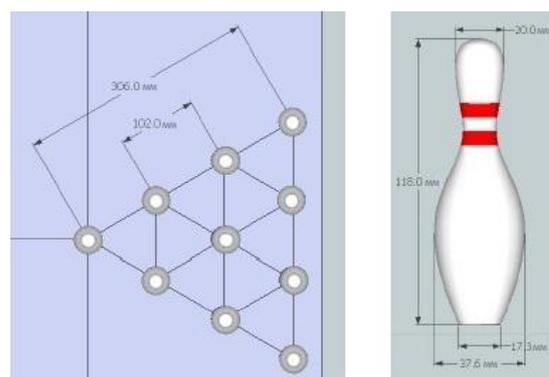


Рис. 1. Размеры кеглей

присоединительных кабелей. Модификация 2.0 отладочного набора включает в себя ультразвуковой датчик «(PING)» и оптический датчик положения, вместе с тем реконфигурируемая система ввода/вывода сигналов позволяет подключать широкую номенклатуру датчиков.

Датчики, исполнительные устройства и вычислительный модуль робота установлены на раме, собранной из робототехнического конструктора TETRIX, от PITSCO Education.

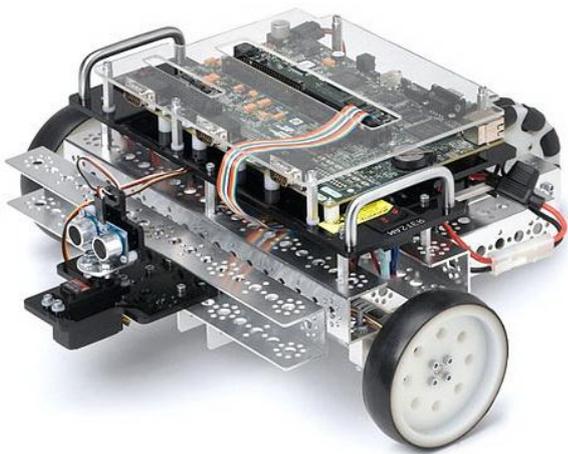


Рис. 2. Внешний вид подвижного робота DaNI 2.0

Блок-диаграмма отладочного набора представлена на рисунке 3.

Из-за ограничений платформы NI sbRIO было принято решение заменить её на NI myRIO.

Сравнительная характеристика платформ myRIO и sbRIO представлена в таблице 1.

Как показано в таблице 1, процессор myRIO является более мощным, чем sbRIO, так как обладает двумя ядрами и тактовой частотой, превышающей тактовую частоту процессора sbRIO. Мощный процессор позволяет гораздо быстрее обрабатывать сложные данные, увеличивает скорость выполнения программы и имеет более высокую степень параллелизма, чем в sbRIO. Также в myRIO процессор реального времени и ПЛИС реализованы на одной интегральной микросхеме, что обеспечивает более быстрый обмен данными между ними. К тому же наличие Wi-Fi модуля позволяет управлять роботом на расстоянии.

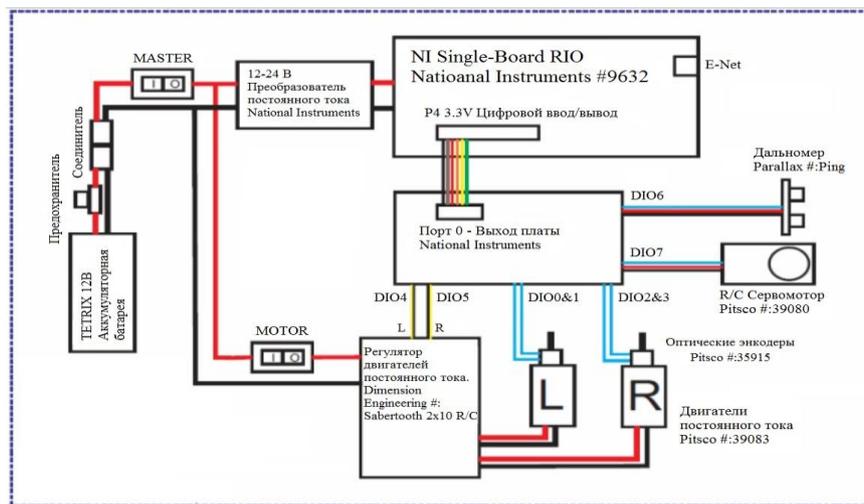


Рис. 3. Блок-диаграмма отладочного робота DaNI 2.0

Таблица 1

Сравнительная характеристика платформ myRIO и sbRIO[5, 6]

Характеристики	sbRIO	myRIO
Процессор	Freescale MPC 5200 (400 МГц)	ARM Cortex-A9 (667МГц, 2 ядра)
ПЛИС	Xilinx Spartan (46 080 логических блоков)	Zynq-7010 (28 000 логических блоков)
Количество памяти	256 Мб - энергонезависимой 128 Мб - системной	256 Мб – энергонезависимой 512 Мб - системной
Ethernet соединение	Есть	Нет
Wi-Fi модуль	Нет	Есть
USB порт	Нет	Есть
UART	Есть	Есть
Количество линий цифрового ввода/вывода	110	40
Количество аналогового входа/выхода	32 входные линии 4 - выходные	10 входных линий 6 – выходных аудиовход/выход
Акселерометр	Нет	Есть
Программируемые светодиоды, кнопки	2 светодиода 1 переключатель	4 светодиода 1 кнопка
Напряжение питания	19 – 30 В	6 – 16 В
Утилита настройки и обслуживания	Нет	Есть

Модификация отладочного набора DaNI 2.0

Производилась модификация рамы, на которой собран робот. К ней добавились такие элементы, как захват с мобильной подложкой, опускающаяся дорожка для шара (пандус), толчок и штатив для камеры.

Ультразвуковой датчик прикрепляется к правому борту рамы робота. Такое положение датчика позволяет определить местоположение шара во время проезда робота мимо стойки с шарами.

Для поднятия шара на раму, сервопривод с подложкой соединяется через две шестеренки с соотношением количества зубьев 2:1, что дает увеличение мощности серводвигателя в два раза, при проигрыше в угле поворота. То есть при подъеме подложки на 90 градусов сервопривод совершает оборот на 180.

Конструкцией робота предусматривается специальная позиция для шара на раме робота, в которой он находится с момента захвата и до броска. Стенки этой позиции не дают упасть шару во время движения.

Для того чтобы бросок был совершен, необходимо чтобы пандус опускался, а шару сообщалась кинетическая энергия посредством толчка, для чего, непосредственно на раме робота, еще один сервопривод управляет толкающим «молоточком».

Структурная кинематическая схема робота приведена на рисунке 4.

Веб-камера закреплена над правым колесом робота. Такое расположение камеры позволяет более удобно настраиваться на положение кеглей, так как необходимо совершать поворот относительно одного колеса.

Платформа myRIO управляет с помощью контроллеров двигателями постоянного тока и сервоприводами, а так же получает и обрабатывает информацию с датчиков освещения, расстояния и веб-камеры.

Структурная схема подключения внешних устройств к платформе NI myRIO приведена на рисунке 5.

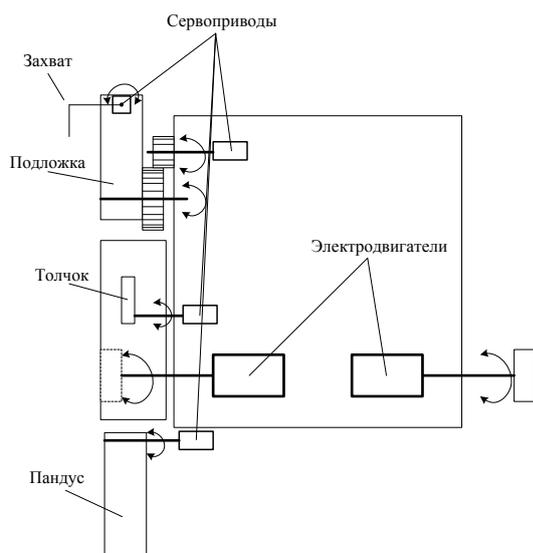


Рис. 4. Кинематическая схема робота

Все системы подвижного робота DaNI подключены к контроллеру myRIO аналогично тому, как были подключены к sbRIO. Используемые цифровые входы

коннектора MXP A представлены в таблице 2. Напряжение питания потребляется с выхода 1, цифровая земля подключается к портам 16, 20, 24, 28, 30.

Для выполнения поставленной задачи потребуется подключение нескольких сервоприводов, дополнительно с тем, который использовался в отладочном наборе DaNI ранее. Все используемые сервоприводы, включая уже входящий в комплект отладочного набора, одной модели HiTec HS-485HB. Так как платформа myRIO имеет выходное напряжение питания только 5 В, подходящее под характеристики серводвигателей, для увеличения их скорости и крутящего момента используется дополнительный источник питания, выдающий 6 В постоянного напряжения. В качестве этого источника питания выступает HiTechnic Servo Controller for TETRIX, входящий в стандартную комплектацию конструктора TETRIX.

Внешний вид робота после подключения всех устройств и описанных ранее конструкций, представлен на рисунке 6.

Программная реализация

Подпрограмма, реализующая инициализацию всех портов, прописанных в ПЛИС myRIO и систем робота, таких как, двигатели, датчик PING)), энкодеры представлен на рисунке 7.

В данной подпрограмме идет запуск программы, заранее загруженной в ПЛИС myRIO, отвечающей за обработку данных со всех портов и управление двигателями и сервоприводами, открытие портов ШИМ0, ШИМ1 и ШИМ2 (V/DIO8, V/DIO9, V/DIO10 соответственно), через которые управляются подложка, захват и толчок. Сервопривод, управляемый через ПЛИС, отвечает за движение пандуса. После его инициализации происходит установка в нулевое положение, которое было заранее записано в памяти myRIO.

Так как границы игрового поля обозначены черными линиями для ориентирования по ним используется датчик освещенности «PmodALS» от компании «Digilent», подключаемый по интерфейсу SPI. Программа для получения данных с датчика изображена на рисунке 8.

Управление сервоприводами, подключенными к ШИМ выходам myRIO, осуществляется генерацией импульсов разной ширины, с частотой 50 Гц. Крайним положениям серводвигателя соответствует ширина импульса 1,0 и 2,0 мс. Нейтральное положение – 1,5 мс. Подпрограмма, написанная для управления серводвигателями, не входящими в состав отладочного набора, приведена на рисунке 9.

Вход «Position» устанавливает положение серводвигателя, с помощью входа «null offset» можно установить текущую позицию за нулевое положение. Выход «offset» показывает отклонение от нулевого положения в процентах, «pulse width» - ширину импульсов, «duty cycle» - коэффициент заполнения сигнала (величина обратная скважности). На вход «PWM Ref In» приходит информация об используемом канале ШИМ-сигнала.

Подпрограмма движения к стойке с шарами включает в себя движение прямо на определенное расстояние

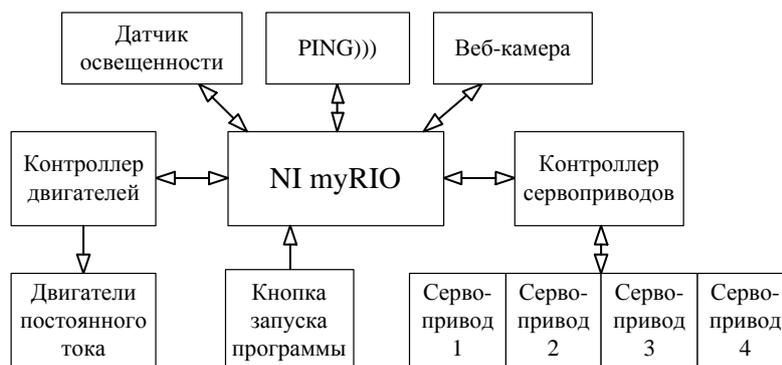


Рис. 5. Структурная схема робота

Таблица 2

Входы myRIO для подключения робота

№ ножки	Наименование	Назначение
11	DIO0	левый энкодер, канал А
13	DIO1	левый энкодер, канал В
15	DIO2	правый энкодер, канал А
17	DIO3	правый энкодер, канал В
19	DIO4	левый двигатель
21	DIO5	правый двигатель
23	DIO6	дальномер PING)))
25	DIO7	сервопривод

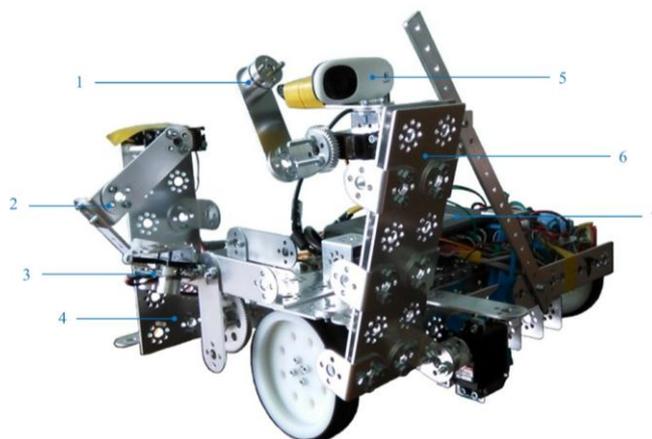


Рис. 6. Внешний вид робота после всех модификаций:
 1 – толчок; 2 – захват; 3 – датчик PING))) ; 4 – мобильная подложка;
 5 – веб-камера; 6 – пандус; 7 – контроллер myRIO

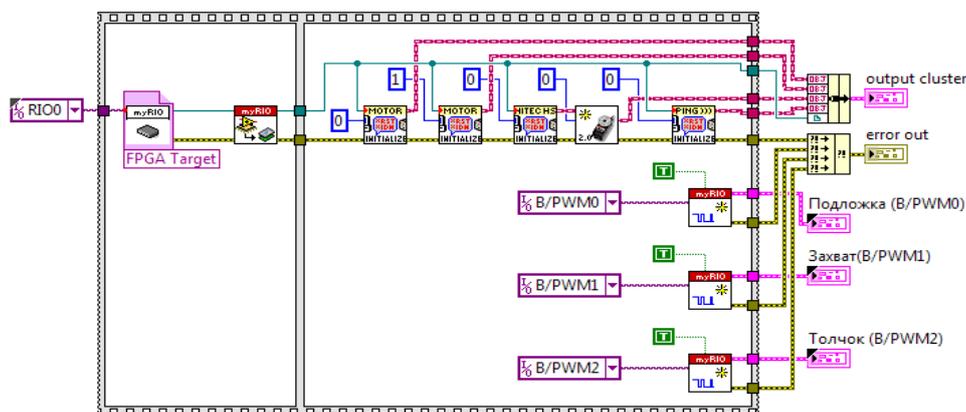


Рис. 7. Подпрограмма инициализации

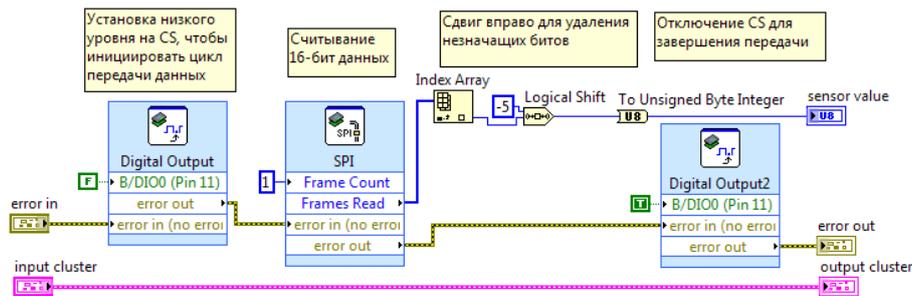


Рис. 8. Программа для получения данных с датчика освещенности

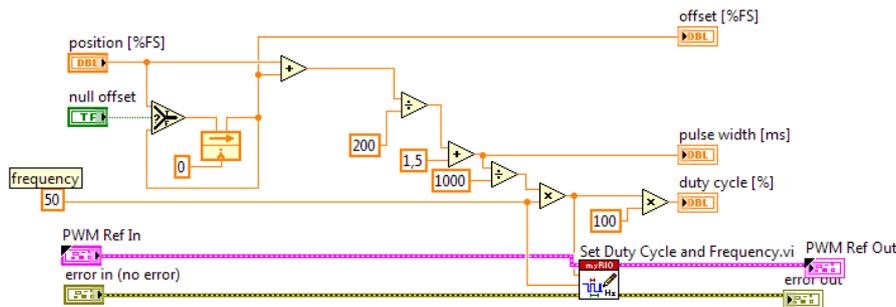


Рис. 9. Подпрограмма по управлению серводвигателем

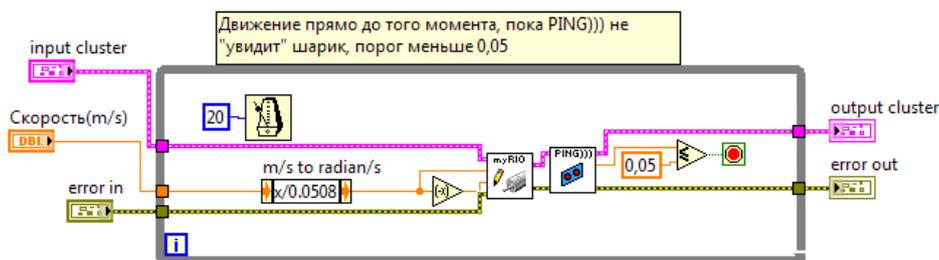


Рис. 10. Подпрограмма обнаружения шара

и поворот налево на 90° . Движение на заданное расстояние и поворот на определенное количество градусов осуществляется с помощью энкодеров. Далее реализуется движение вперед, пока датчик PING))) не обнаружит шар. На рисунке 10 изображена подпрограмма обнаружения шара.

После того как шар обнаружен идет подготовка к захвату, включающая в себя опускание подложки и отодвигание руки-захвата.

После подготовки, робот двигается вперед на расстояние 10 см, чтобы обнаруженный шар оказался непосредственно возле захвата. Затем происходит остановка робота и захват шара.

После того как шарик был взят происходит движение в направлении кеглей.

Из каждой полученной фотографии извлекается параметр Lightness по цветовой модели HSL (Hue, Saturation, Lightness). Далее используется специальная подпрограмма обнаружения граней Edge Detection из пакета LabVIEW Vision Development Module (VDM). Пример обработки изображения с кеглями с помощью данного модуля представлен на рисунке 11.

Для того чтобы зафиксировать положение кеглей относительно робота, полученное после извлечения

граней изображение, преобразуется в двумерный массив значений пикселей. В данном массиве значение пикселя, попадающего на белую грань, равно 255, а значение всех остальных – 0. Не весь этот массив используется далее в программе, из него извлекается только часть пикселей, соответствующая центру изображения и примерному положению кеглей на фотографии.

Извлекается линия с координатами: от 200 до 400 пикселей по горизонтали и 212 – 213 по вертикали. Чтобы выделить пиксели со значением 255, используется функция Search 1D Array. Координата каждого найденного пикселя с таким значением записывается в новый массив и вычисляется их среднее значение. Блок-диаграмма этой программы представлена на рисунке 12.

Найденное среднее положение сравнивается с координатой центра экрана. При достаточно большой разнице (больше 20 пикселей) этих координат, робот совершает поворот относительно правого колеса (над которым установлена камера) в необходимую сторону и затем повторяет проверку. При разнице 20 пикселей или меньше, можно совершать бросок.

Бросок происходит следующим образом: сначала опускается пандус, затем происходит толчок и пандус поднимается.

После того как совершен второй бросок, робот возвращается на базу.

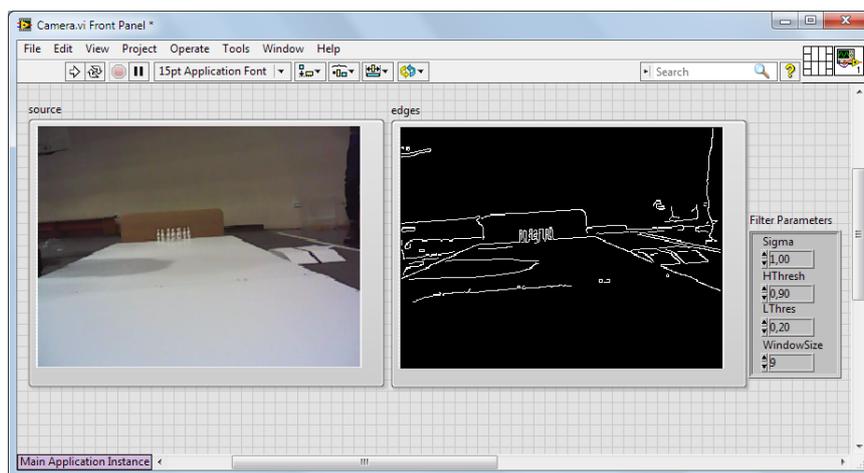


Рис. 11. Обработка данных с помощью Edge Detection

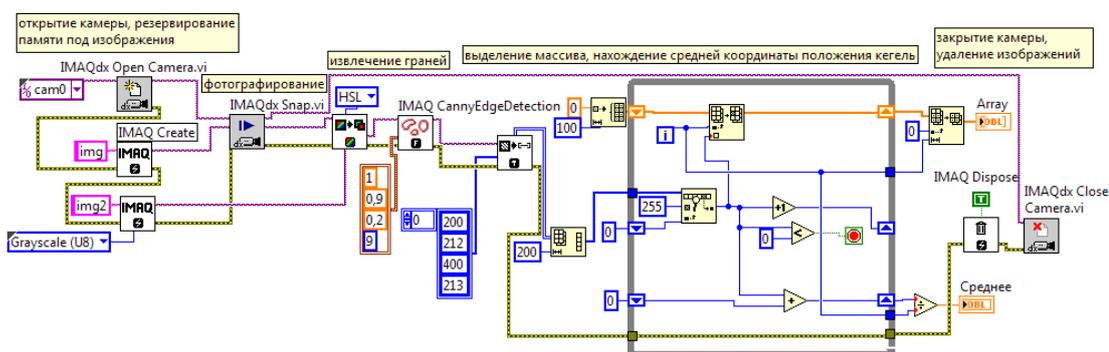


Рис. 12. Подпрограмма нахождения среднего положения кеглей

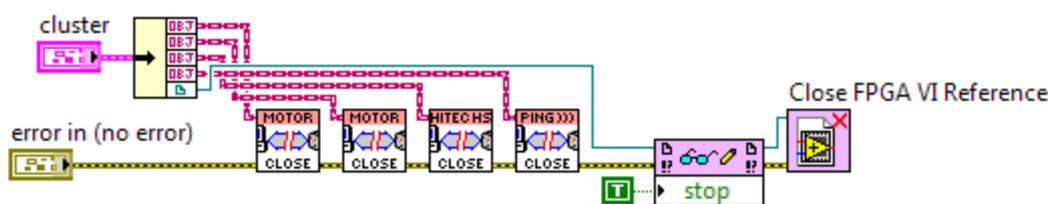


Рис. 13. Подпрограмма завершения

Когда робот находится на базе, начинается завершающий этап программы, включающий в себя отключение всех систем робота и остановку программы в ПЛИС. Подпрограмма этого этапа приведена на рисунке 13.

Была решена задача архитектурного проектирования робота и схмотехнического проектирования подключения к нему датчиков расстояния и освещенности, веб-камеры, сервоприводов и двигателей.

Собранный робот может обнаруживать положение шара, производить его захват, ориентироваться на положение кеглей и совершать бросок.

При необходимости робот может быть модернизирован, к нему могут быть подключены дополнительные датчики и двигатели, расширяющие его возможности.

В данном случае создание робототехнического проекта для игры в боулинг является примером того, как к роботу подключаются основные виды датчиков и внешних устройств, что может послужить для студентов хорошей проектной практикой, что позволит закрепить их знания об устройстве и подключении микроконтроллеров, датчиков, о программировании и сопряжении их между собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **WRO University Regular Category “WRO Bowling” Game rules** [Электронный ресурс], - <http://robolymp.ru/rules-and-regulations/bowling/>.
2. **Dr. Robert King.** Работа с подвижным роботом DaNI.- Colorado School of Mines. – 161с.
3. **Parallax PING))) ultrasonic distance sensor** [Электронный ресурс], - <https://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/28015-PING-Documentation-v1.6.pdf>.
4. **TETRIX DC Drive Motor** [Электронный ресурс], - <https://c10645061.ssl.cf2.rackcdn.com/resources/tetrix/152motor739530.pdf>.
4. **User Guide NI sbRIO-961x/ 963x/ 964x and NI sbRIO-9612XT/ 9632XT/ 9642XT** [Электронный ресурс], - <http://www.ni.com/pdf/manuals/375052c.pdf>.
5. **User Guide and Specifications NI myRIO-1900** [Электронный ресурс], - <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047a.pdf>.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКТОРА

И.М. Ячиков¹, Е.О. Кряжев²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR MEASUREMENT OF THERMAL PARAMETERS OF THE COOLING SYSTEM OF THE LABORATORY HIGH-FREQUENCY INDUCTOR

I.M. Yachikov¹, E.O. Kryazhev²

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹jachikov@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено устройство на базе контроллера «Arduino» для автоматизации измерения расхода воды и мощности тепловых потерь в лабораторном высокочастотном индукторе. Рассмотрены датчики температуры и расхода, используемые в устройстве. Приведено описание работы устройства и алгоритм программы для контроллера. Созданный аппаратный комплекс отображает на дисплее расход, температуры и мощность тепловых потерь. Предусмотрена возможность с использованием монитора последовательного порта полученные данные выдавать на монитор компьютера и сохранять их в виде файла.

Ключевые слова: высокочастотный индуктор; микроконтроллер; автоматизация; тепловые параметры; датчик температуры; расходомер.

Abstract. Considered the device on the basis of «Arduino» controller for automation of flow measurement water and power of heat loss in a laboratory high-frequency inductor. Considered temperature and flow sensors that are used in the device. The description of the device and the program algorithm for the controller. Created hardware system displays the flow, temperature and heating power losses. The possibility of using Serial Port Monitor to issue findings on the computer monitor and save them as a file.

Keywords: high-frequency inductor; microcontroller; automation; thermal properties; temperature sensor; flow sensor.

Актуальность работы

Высокий интерес к высокочастотному индукционному нагреву связан, прежде всего, с появлением простых, надежных и дешевых высокочастотных источников питания. Такие устройства не сложнее бытовых сварочных инверторов с питанием от 220 В. Высокочастотное электромагнитное поле с частотой 30- 200 кГц, создаваемое такими источниками, позволяет легко нагревать и плавить различные металлы и их сплавы.

С использованием дешевой китайской элементной базы такой инвертор легко собрать в лабораторных условиях для использования для самых различных целей. В частности, в работах [1, 2] описаны эксперименты по изучению положения тела, находящегося во взвешенном состоянии в индукторе специальной формы. В качестве базовой схемы инвертора использовалась конструкция, предложенная С.В. Кухтецким [3]. Блок-схема инвертора, эквивалентная схема нагрузки для индукционного нагрева и подключение основных измерительных приборов показано на рис. 1. Мощность инвертора плавно изменялась до 2 кВт грубо с помощью ЛАТРа и плавно - регулятором мощности на симисторе.

Медные трубки, образующие индуктор L и подводы к нему, при больших мощностях довольно сильно

нагреваются, поэтому используется водяное охлаждение. Вода циркулирует по замкнутому контуру. Посредством водяного насоса (помпы) из бака она проходит через контур индуктора, далее попадает в радиатор где отдает тепло в окружающую среду и далее вода возвращается в бак (рис. 2). Поскольку в контуре имеется высокое напряжение, поэтому предусмотрена электрическая развязка индуктора. Для этого подвод воды осуществляется тонкими длинными диэлектрическими трубами.

При проведении лабораторных исследований очень важно следить за процессом нагрева или плавления тела в индукторе. Во многом эти процессы определяются полезной мощностью, поглощаемой обрабатываемым материалом, которая в свою очередь во многом определяется мощностью, снимаемой охлаждаемой водой. Надо сказать, что для рассматриваемого индуктора расход охлаждающей воды относительно небольшой 1-3 л/мин. Анализ литературы и интернет ресурсов показал, что полноценные устройства, по приемлемой цене, которые могли бы справиться с этой задачей, практически отсутствуют. Существующие на рынке измерители тепловой мощности и теплосчетчики, для данного диапазона расхода воды, имеют относительно высокую стоимость при минимальном функционале, в частности, невозможность работы в автономном режиме или возможностью сохранения данных в памяти компьютера.

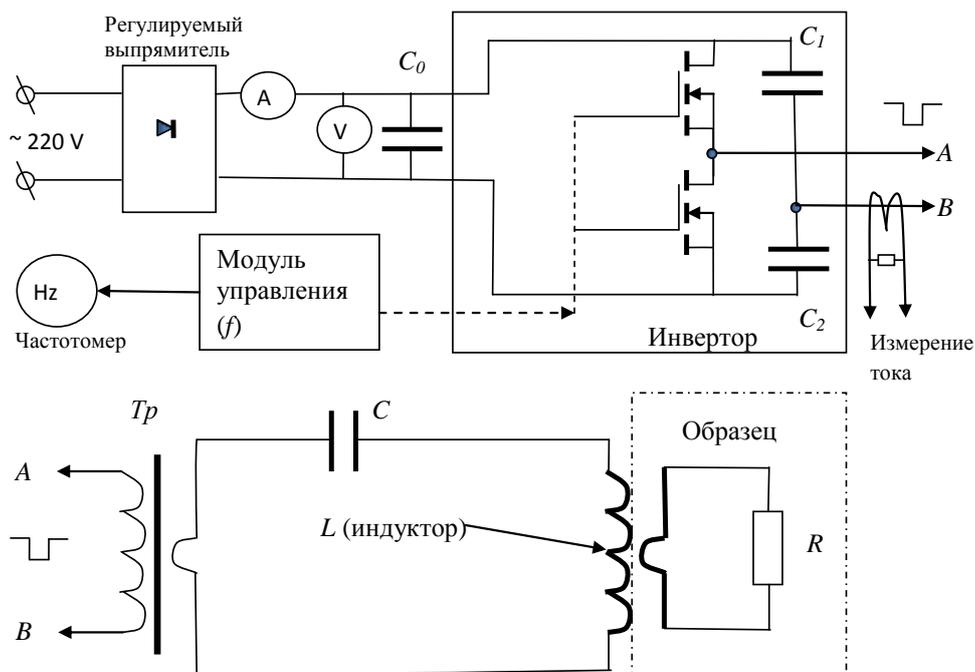


Рис. 1. Блок-схема полумостового инвертора и эквивалентная схема нагрузки для индукционного нагрева

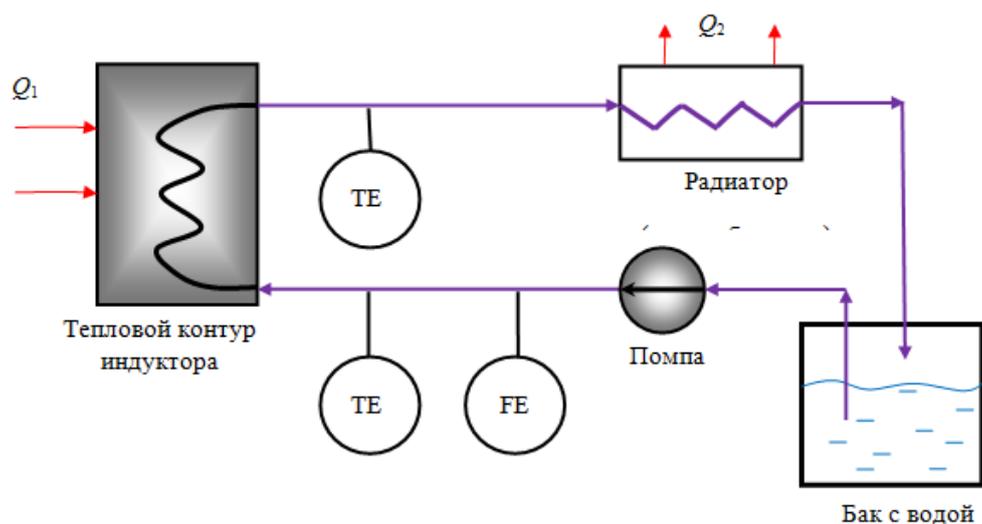


Рис. 2. Функциональная схема измерения мощности тепловых потерь индуктора: FE- датчик расхода воды; TE - датчик температуры (обозначения элементов по ГОСТ 21.404-85)

Целью данной работы являлось разработка простого и дешевого устройства для определения тепловых характеристик индуктора с возможностью визуализации получаемых данных и возможностью передачи их в компьютер.

Для достижения этой цели были решены задачи по выбору аппаратных компонентов; сборки устройства и написание программы обеспечивающей корректную работу аппаратной части и удобную визуализацию измеряемых величин.

Сборка устройства

Для определения мощности, снимаемой охлаждаемой водой, необходимо измерять расход воды G (л/мин) и разницу температур воды подаваемой t_1 и выходящей из

индуктора t_2 . Мощность тепловых потерь определяется по формуле $Q = cG(t_2 - t_1)/60$, где $c=4190$ Дж/(кг град) - теплоемкость воды. Наглядная схема подключения датчиков для измерения мощности тепловых потерь приведена на рис. 2.

В качестве базового компонента устройства был выбран контроллер «Arduino Uno». Данный выбор был обусловлен тем, что данное семейство контроллеров при цене 4-6\$, имеют хорошие технические характеристики и широкую поддержку в виде форума разработчиков, где можно найти ответы на многие вопросы. Также под контроллеры «Arduino» в бесплатном доступе есть множество различных библиотек программ, которые позволяют существенно упростить программную разработку, так как отпадает необходимость программировать многие датчики на машинном уровне [4]. Кроме

этого, исходную программу можно писать на очень удобном Си-подобном языке высокого уровня.

Прибор состоит из платы «Arduino Uno», двух датчиков температуры на основе микросхем «Dallas 18B20», датчика расхода воды «G3/4 Water Flow Sensor Fluid Flowmeter Switch Counter 1-30 L/min Meter» и дисплея «IC/I2C/TWI 2004 204 20X4 Character LCD Display», позволяющего выводить 4 строки по 20 символов в строке.

Температурный датчик 18B20 изображен на рис. 3.



Рис. 3. Датчик температуры Dallas 18B20:
а) в корпусе TO-92; б) в водонепроницаемой трубке из нержавеющей стали [5]

Он подключается к контроллеру тремя контактами, где 1 – земля (GND), 2 – сигнал (DQ), 3 – питание (VDD). Диапазон измерения датчика от -55 до +125 градусов Цельсия. Точность измерения в области температур от -10 до +85 градусов Цельсия составляет $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Датчик DS18B20 является цифровым термометром с программируемым разрешением, от 9 до 12-бит, которое может сохраняться в EEPROM памяти прибора. DS18B20 обменивается данными по 1-Wire шине и при этом может быть как единственным устройством на линии так и работать в группе. Каждый DS18B20 имеет уникальный 64-битный последовательный код, который позволяет общаться с множеством датчиков DS18B20 установленных на одной шине 1-Wire. Все процессы на шине управляются микроконтроллером «Arduino Uno».

Из 5 датчиков температуры были выбраны два, которые при измерении жидкости в диапазоне 20-50 $^{\circ}\text{C}$ давали отличие показаний в пределах $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Используемый датчик расхода воды изображен на рис. 4, он позволяет измерить расход от 1 до 30 литров в минуту, точность измерения $\pm 3\%$, температура жидкости не должна превышать 120 $^{\circ}\text{C}$, давление ≤ 2.0 МПа.



Рис. 4. Датчик расхода воды «G3/4 Water Flow Sensor Fluid Flowmeter Switch Counter 1-30 L/min Meter» [6]

Принцип работы датчика основан на изменении скорости вращения ротора при изменении скорости потока воды, ротор связан с датчиком Холла, который выдает импульсный сигнал.

Была проведена тарировка датчика расхода. Для этого найдена зависимость расхода воды (л/мин) от количества импульсов, выдаваемым датчиком. Результаты экспериментальных данных показаны на рис. 5. При $G > 0,7$ л/мин. данные хорошо ложатся на прямую линию $G(N) = 0,0747N + 0,2424$.

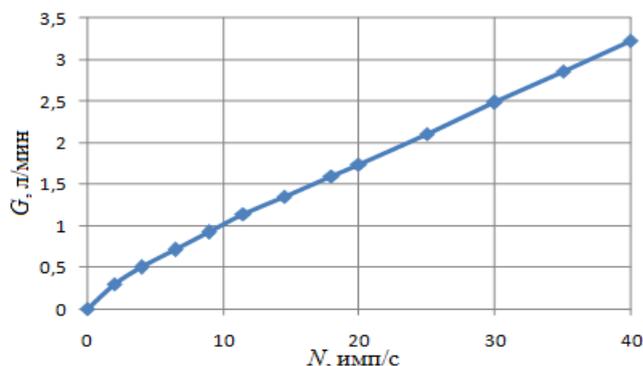


Рис. 5. График зависимости расхода л/мин от частоты получаемых импульсов

С использованием датчиков температуры и расхода воды был создан программно-аппаратный комплекс для измерения тепловых параметров системы охлаждения лабораторного высокочастотного индуктора (рис. 6). Стоимость двух датчиков температуры, датчика расхода воды, дисплея и контроллера составляет около 20\$.

Программная реализация

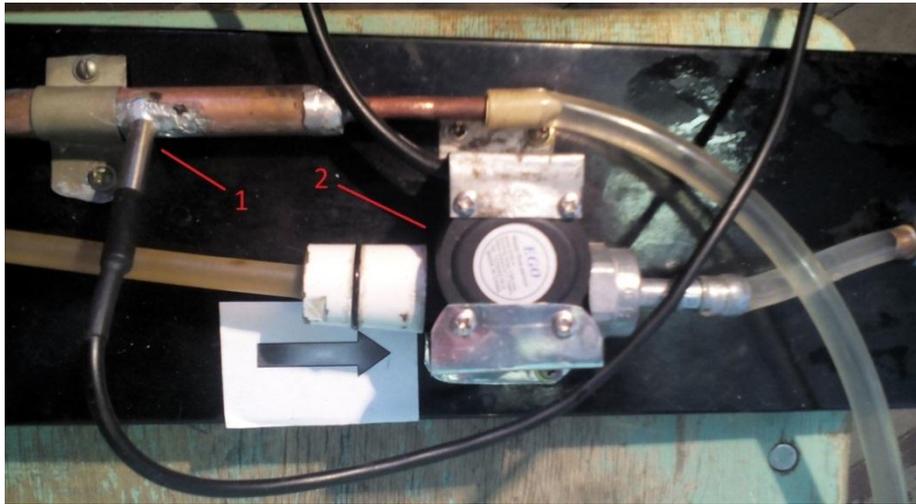
В программе для обеспечения соединения с датчиками температуры были использованы библиотеки *Wire.h*, *OneWire.h*, *DallasTemperature.h*, для вывода данных на LCD дисплей - библиотека *LiquidCrystal_I2C.h*.

Программа работает по следующему алгоритму.

1. Инициализация датчиков температуры, расхода и дисплея.
2. Далее следует цикл (п. 2-4), который будет работать пока устройство включено.
3. Опрос датчиков.
4. Вывод результата на дисплей.
5. Задержка по времени на одну секунду.

Ниже приведен фрагмент кода, который описывает опрос двух температурных датчиков и вывод результатов измерений на LCD дисплей.

```
sensors.requestTemperatures();
float temp1 =
sensors.getTempC(insideThermometer);
float temp2 =
sensors.getTempC(outsideThermometer);
lcd.print("t1=");
lcd.print(temp1);
lcd.print((char)223);
lcd.print("C");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("t2=");
lcd.print(temp2);
lcd.print((char)223);
lcd.print("C");
```



**Рис. 6. Устройство для измерения расхода воды и мощности тепловых потерь в сборе:
1 – датчик температуры, 2 – датчик расхода воды**

При подсчете импульсов с расходомере использовалась работа с прерываниями. В функции обслуживания прерывания происходит подсчет импульсов, выдаваемым датчиком (переменная *NbTopsFan*).

```
NbTopsFan = 0;
//включение прерываний
sei();
//задержка на 0,5 секунды
delay (500);
//отключение прерываний
cli();
Calc = 0.0747*NbTopsFan+0.2424;
```

Функция прерывания:

```
voidrpm()
{
NbTopsFan++;
}
```

Работа с экраном организована таким образом, что сначала инициализируется дисплей, для этого задаются необходимые настройки с помощью функции *begin*. Затем можно выводить символы функцией *print*, для перемещения курсора используется функция *setCursor*. Было установлено, что данный дисплей не поддерживает русские символы (кириллицу), поэтому было принято решение закодировать необходимые символы кириллицы вручную как матрицу точек, и далее, загрузить их в память знакогенератора дисплея. Те буквы, у которых есть графические аналоги в латинском алфавите нарисованы не были, вместо них были использованы похожие латинские символы [7]. Ниже приведено использование новых символов.

```
//Кодировка символов в виде массива байт
(8*5) (буквы л, м, и, н, т)
byte l[8] =
{ B00000, B00000, B00110, B01010,
B01001, B10001, B10001, B00000 };
byte m[8] =
{ B00000, B00000, B10001, B11011,
B10101, B10001, B10001, B00000 };
byte i[8] =
{ B00000, B00000, B10001, B10011, B10101,
B11001, B10001, B00000 };
```

```
byte n[8] =
{ B00000, B00000, B10001, B10001, B11111,
B10001, B10001, B00000 };
byte t[8] =
{ B00000, B00000, B11111, B00100, B00100,
B00100, B00100, B00000 };
//инициализация дисплея
lcd.begin(20, 4);
//загрузка символов в память дисплея
lcd.createChar(1, l);
lcd.createChar(2, m);
lcd.createChar(3, i);
lcd.createChar(4, n);
lcd.createChar(5, t);
/*печать символа из памяти дисплея,
аргумент функции write это номер символа
загруженного в память дисплея*/
lcd.write(byte(1));
```

Вывод данных на дисплей о расходе воды выглядит следующим образом:

```
lcd.print("L=");
lcd.print(Calc);
lcd.print(" ");
lcd.write(byte(1));
lcd.print("/");
lcd.write(byte(2));
lcd.write(byte(3));
lcd.write(byte(4));
```

Остальные значения выводились аналогично.

Работа устройства

После загрузки программы в контроллер «Arduino» устройство выдает на дисплей основные данные: температура на входе и на выходе из индуктора, расход воды и тепловой поток. Пример показаний дисплея устройства представлен на рис. 7. Созданный программно-аппаратный комплекс был опробован для измерения тепловых параметров системы охлаждения лабораторного высокочастотного индуктора и показал



Рис. 7. Дисплей устройства в момент работы

ЛИТЕРАТУРА

свою работоспособность и надежность.

В разработанной программе (кроме автономного использования) предусмотрена возможность анализировать полученные данные на экране монитора персонального компьютера. Для этого необходимо подключить «Arduino» к USB порту и в меню «Инструменты» подключить «Монитор последовательного порта». Поступающие данные с контроллера «Arduino» можно также сохранить, записав их в файл на жесткий диск компьютера. Для этого необходимо открыть программу «HyperTerminal», зайти в меню передача (Transfer) и выбрать запись протокола последовательного порта в файл (Capture text).

Заключение

Таким образом, разработано и опробовано устройство, позволяющее измерять расход воды и тепловые потери лабораторного индуктора. Написана, отлажена и записана в контроллер программа для подсчета тепловых потерь. Созданное устройство в отличие от существующих измерителей тепловой мощности и счетчиков тепловой энергии имеет меньшую себестоимость, при этом позволяет решать более широкие задачи с возможностью работы как элемента компьютерного комплекса, так и автономно.

1. **Ячиков, И.М.** Положение равновесия тела во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе с обратным витком // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 3. С. 66-72.
2. **Ячиков, И.М.** Экспериментальное исследование положения тела во взвешенном состоянии в цилиндрическом высокочастотном индукторе с обратным витком / И.М. Ячиков, Т.П. Ларина // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 2(27). С. 39-43.
3. **Кухтецкий, С.В.** Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева: [Электронный ресурс] <http://www.icct.ru/Practicality/Papers/30-03-2010/Invertor-01.php> или <http://ku.nextmail.ru/pdf/Invertor-01.pdf>.
4. **Петин, В. А.** Проекты с использованием контроллера Arduino. - СПб.: БХВ-Петербург, 2014. - 400 с.
5. **DatasheetDS18B20:** [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (дата обращения: 09.03.2016).
6. **DatasheetG3/4 WaterFlowSensor:** [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.seeedstudio.com/wiki/G3/4_Water_Flow_sensor (дата обращения: 09.03.2016).
7. **DatasheetLCDDisplay 16x2:** [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.engineersgarage.com/sites/default/files/LCD%2016x2.pdf> (дата обращения: 09.03.2016).

