

ISSN (Print) 2306-3173

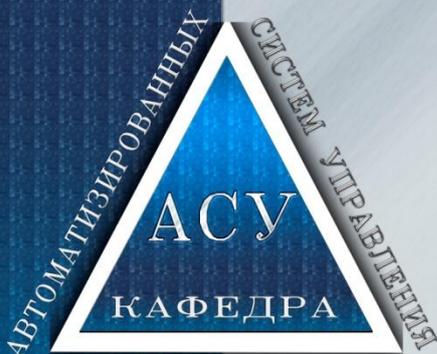
ISSN (Online) 2413-1601

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

№ 4(10), 2015



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№4 (10) октябрь 2015 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.

Редакционная коллегия

Парсункин Борис Николаевич - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Лисиенко Владимир Георгиевич - Вице-президент АИН, президент РУО АИН, профессор, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

Салганик Виктор Матвеевич - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Вдовин Константин Николаевич - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой литейного производства и материаловедения ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Логунова Оксана Сергеевна - д-р техн. наук, заведующий кафедрой кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Спирин Николая Александрович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплофизики и информатики в металлургии, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

Рябчиков Михаил Юрьевич - канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Контакты

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

Редакционный совет: Андреев Сергей Михайлович
Тел.: (3519) 29-84-32
E-mail: atp@magtu.ru
Рябчиков Михаил Юрьевич
Тел.: +79028910112
E-mail: mr_mgn@mail.ru

Дизайн и верстка: Рябчикова Елена Сергеевна

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Тел.: (3519) 29-85-58.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 12.2015. Тираж 100 экз. Цена свободная.

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматизированные системы управления

<i>Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, А.И. Сунарзулова, Р.В. Танков, В.Ю. Перевалов.</i> Сравнительный анализ систем экстремального регулирования, основанных на статистических критериях наличия тренда, на примере управления электрическими параметрами ДСП.....	4
<i>В.М. Москвин, С.В. Витик.</i> Управление толщиной полосы за первой клетью стана холодной прокатки с помощью дополнительного канала распространения внешнего возмущения.....	9
<i>Б.Н. Парсункин, О.С. Логунова, М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова, Ю.А.Калугин, А.И. Сунарзулова.</i> Оптимизация управления процессом измельчения шихтовых материалов в металлургическом производстве.....	14
<i>В.Л. Евстигнеев, Т.В. Майорова.</i> Концепция построения систем автоматического управления дроблением.....	20

Информационные системы

<i>В.Б. Кузнецова, А.И. Сергеев, Д.В. Кондусов.</i> Центр мониторинга эксплуатации в среде PLM как технология контракта жизненного цикла изделия.....	24
<i>Т.В. Усатая, Д.Ю. Усатый, Е.А. Свистунова.</i> Трехмерное компьютерное моделирование в проектно-технологической деятельности.....	28

Математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов

<i>В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный.</i> Решение проблемы дообучения классических нейронных сетей.....	32
<i>К.В. Лицин.</i> Обоснование выбора частоты переменной составляющей сигнала возбуждения при определении углового положения ротора синхронного двигателя методом высокочастотной инъекции сигнала.....	41
<i>О.В. Березюк.</i> Моделирование состава биогаза при анаэробном разложении твердых бытовых отходов.....	44
<i>И.Б. Прохоров, Д.А. Юшкин, С.А. Евдокимов, П.А. Гребеничиков.</i> Моделирование количественных характеристик беспилотного летательного аппарата мультироторного типа на основе расчета определяющих параметров.....	48

Технические средства автоматизации

<i>И.Б. Прохоров, П.А. Гребеничиков.</i> Алгоритм угловой ориентации объекта.....	53
---	----

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

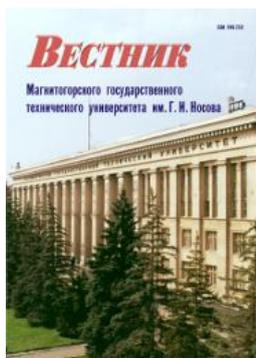
Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом.
Ключевые слова: *ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова.*
Abstract, italic. Abstract, italic.
Keywords: *keywords; keywords; keywords; keywords; keywords.*

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЯХ НАЛИЧИЯ ТРЕНДА, НА ПРИМЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДСП

Е.С. Рябчикова¹, М.Ю. Рябчиков², А.И. Сунаргулова³, Р.В. Танков⁴, В.Ю. Перевалов⁵
^{1,2,3,4,5}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMUM CONTROL SYSTEMS BASED ON TREND STATISTICAL CRITERIA: THE CASE STUDY OF EAF ELECTRICAL PARAMETERS CONTROL

E.S. Rybchikova¹, M.Yu. Rybchikov², A.I. Sunargulova³, R.V. Tankov⁴, V.Yu. Perevalov⁵
^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹mika.elena@mail.ru

Аннотация. В работе показано, что для управления электрическими параметрами ДСП целесообразно применение систем экстремального регулирования статистического типа. Произведен сравнительный анализ работы систем, основанных на различных критериях наличия тренда. Рассмотрена работа системы с модуляцией скорости электрода.

Ключевые слова: ДСП, система экстремального регулирования, критерий, тренд, серия, модуляция.

Abstract. The paper shows statistical optimum control systems are most efficient for EAF electrical parameters control. We present comparative analysis of systems based on various trend criteria in operation. We also study system operation in the mode of electrode velocity modulation.

Keywords: EAF, optimum control system, criteria, trend, series, modulation.

Известно [1,12-14], что при определенной длине электрической дуги обеспечивается максимум активной мощности дуговой сталеплавильной печи (ДСП) для выбранного вторичного напряжения трансформатора. Экстремальную зависимость мощности можно представить как функцию от различных параметров, например тока фазы или напряжения дуги.

Изучение статистических данных работы ДСП-180 в течении шестисот плавок показало значительный дрейф статической характеристики в зависимости от условий работы печи [8, 11].

Причины дрейфа экстремальной зависимости

могут быть связаны как с переходом на новые ступени переключателей вторичного напряжения трансформатора nT и реактора nR, так и с другими типами воздействий в широком диапазоне частот. Пределы разброса значений активной мощности в зависимости от тока фазы показаны на рис.1 [1].

Для управления объектами с экстремальной статической характеристикой, функционирующими в условиях действия возмущений, целесообразно применять системы экстремального регулирования [3-7, 10], использующие статистически обоснованные критерии оценки достижения экстремума.

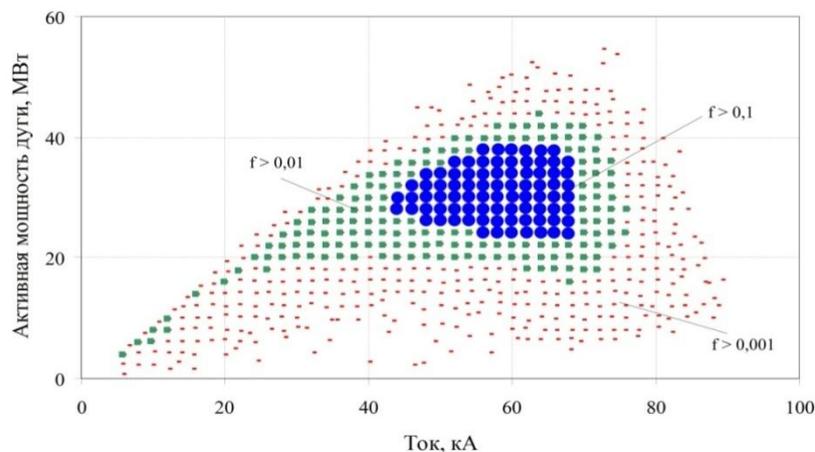


Рис.1. Разброс значений фильтрованной активной мощности дуги в зависимости от тока при фиксированных ступенях напряжения питания трансформатора (nT=21) и реактора (nR=5): f – отношение максимальной к минимальной вероятности попадания в область

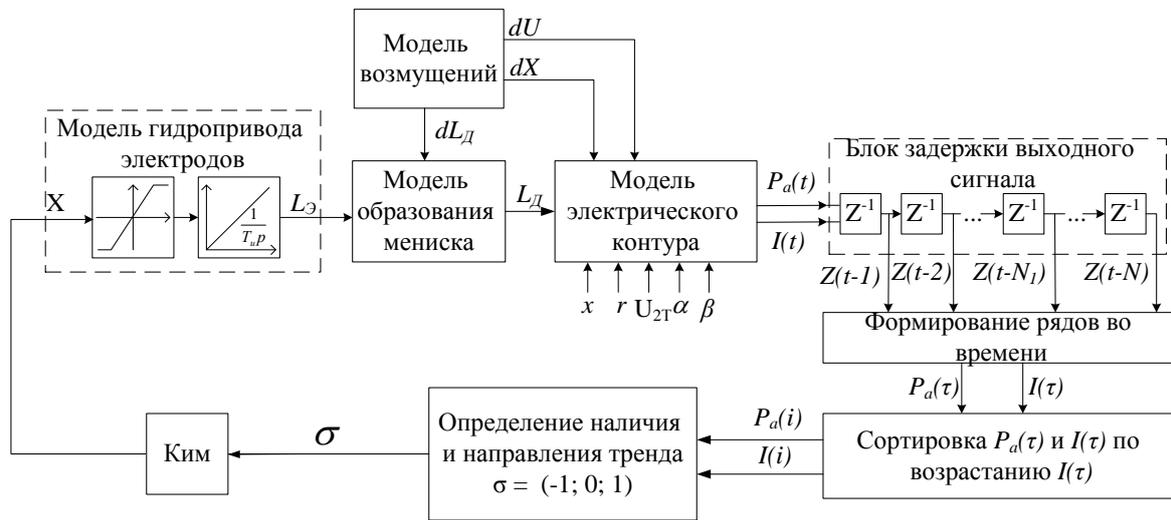


Рис. 2. Структурная схема СЭР статистического типа, основанной на критериях определения тренда:
 P_a – активная мощность дуги; I – рабочий ток; L_z – положение электрода; T_u – постоянная времени, характеризующая скорость перемещения электрода; x – индуктивное сопротивление токоподвода; r – сопротивление короткой сети; U – напряжение; t – текущее время; τ – шаг моделирования; σ – направление тренда, которое характеризует направление перемещения электродов; $\tau \in [0 \dots N \cdot \Delta \tau]$; $i \in [1 \dots N]$

К статистическим методам относится, например, использование знака коэффициента корреляции между входным и выходным (оптимизируемым) параметром процесса. Смена знака коэффициента свидетельствует о необходимости изменения направления движения электрода на противоположное, а нулевое значение свидетельствует о достижении экстремума.

В работе [2] Усачевым М.В. рассматривается применение данного подхода для решения задачи поддержания мощности дуги отдельной фазы электрического контура в ДСП на максимальном уровне.

Кроме корреляционного метода возможен другой метод экстремального регулирования, связанный с оценкой наличия тренда в зависимости $P=f(I)$ активной мощности от тока фазы по накопленным в буфере данным. При этом отсутствие тренда в зависимости $P=f(I)$ свидетельствует о достижении экстремума, а направление тренда – о текущем положении относительно него. Структурная схема такой СЭР приведена на рис.2.

Принцип работы системы основан на том, что в буфер заносятся данные по мощности и току фазы за заданный интервал времени. Далее по данным формируется и сортируется по току набор точек зависимости мощности от тока. Полученный ряд исследуется на наличие трендовой составляющей с использованием одного из известных критериев.

Существует ряд критериев для проверки наличия или отсутствия неслучайной и зависящей от времени составляющей (тренда). В данной работе рассматриваются два критерия – критерий "восходящих" и "нисходящих" серий и критерий последовательных разностей (критерий Аббе).

Критерий "восходящих" и "нисходящих" серий улавливает постепенное смещение среднего значения в исследуемом распределении. При этом исследуется последовательность знаков – плюсов и минусов. Если текущее значение мощности больше предыдущего, то ставится «плюс», а если меньше, то «минус».

Если же соседние значения мощностей равны, то ничего не ставят. Таким образом, если с ростом тока мощность растет, то знак серии положительный и процесс находится на левой ветви экстремальной зависимости, если мощность падает, то на правой ветви. Количество наборов значений, где мощность последовательно растет или убывает называют длиной серии. Критерий основан на следующем утверждении: если выборка случайна, то есть тренда нет, то в образованной последовательности знаков общее число серий не может быть слишком малым, а их протяженность – слишком большой. Поэтому в данном критерии рассматривают одновременно два условия:

$$\begin{cases} v_n(n) > \frac{2n-1}{3} - 1,96 \sqrt{\frac{16n-29}{90}}, \\ \tau_n(n) < \tau_{кр}(n) \end{cases}$$

$$\text{где } \tau_{кр}(n) = \begin{cases} 5, \text{ при } n \leq 26; \\ 6, \text{ при } 26 < n \leq 153; \\ 7, \text{ при } 153 < n \leq 1170. \end{cases}$$

Здесь $v_n(n)$ – общее количество серий, а $\tau_n(n)$ – протяженность самой длинной серии.

Если хотя бы одно из неравенств окажется нарушенным, то гипотеза о случайности и независимости экспериментальных данных (отсутствии тренда) отвергается с вероятностью ошибки $\alpha = 0,05$.

Критерий разностей Аббе применяется для обнаружения изменяющейся во времени систематической составляющей. Он основан на сравнении дисперсии результатов наблюдений (1) и суммы квадратов последовательных (в порядке проведения измерений) разностей (2):

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

$$Q^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2. \quad (2)$$

Полученное в результате сравнения расчетное значение критерия разностей $\Psi_n = \frac{Q^2}{S^2}$ сравнивается с критическим значением критерия разностей, которое можно определить по табл. 1.

Таблица 1

Критическое значение критерия разностей
 $\Psi_{кр} = \Psi(\gamma; n)$

n	P		n	P	
	0,95	0,99		0,95	0,99
4	0,390	0,256	19	0,642	0,510
5	0,410	0,269	20	0,650	0,520
6	0,445	0,281	25	0,676	0,542
7	0,468	0,307	30	0,704	0,508
8	0,491	0,331	35	0,725	0,611
9	0,514	0,354	40	0,742	0,636
10	0,531	0,376	45	0,757	0,658
11	0,548	0,397	50	0,769	0,674
12	0,564	0,414	60	0,789	0,702
13	0,578	0,431	70	0,804	0,724
14	0,591	0,447	80	0,817	0,741
15	0,603	0,461	90	0,827	0,756
16	0,614	0,475	100	0,836	0,767
17	0,624	0,487	110	0,843	0,778
18	0,633	0,499	120	0,850	0,788

Отношение $\Psi_n = Q^2/S^2$ является критерием для обнаружения систематических смещений центра группирования результатов наблюдений.

Если условие $\Psi_n > \Psi_{кр}$ выполняется, принимается гипотеза об отсутствии тренда.

В программной среде ViSsim было произведено моделирование СЭР на основании рассмотренных статистических критериев выделения тренда. Расчет критерия тренда интегрирован в контур в виде динамически подключаемой библиотеки, разработанной в среде Delphi. При этом работа каждой СЭР исследовалась при разных значениях количества точек тренда и предельной скорости электрода, определяемой коэффициентом усиления управляющего сигнала СЭР $K_{ум}$. Кроме того, в каждой системе были реализованы разные критерии определения направления тренда, которое соответствовало требуемому направлению перемещения электрода при движении к экстремуму: а) знаку длиннейшей серии; б) по знаку величины $P(I_{макс}) - P(I_{мин})$, где $I_{макс}$ и $I_{мин}$ – максимальное и минимальное значение тока в ряде данных; в) по знаку величины $\sum_{i=1}^N sign(P(i+1) - P(i)) \cdot (P(i+1) - P(i))^2$, где $P(i)$ – ряд мощности, упорядоченный по возрастанию соответствующих значений тока I ; г) по коэффициенту a уравнения линейной регрессии зависимости $P(I) = a \cdot I + b$.

По результатам моделирования работы СЭР в составе комплексной модели дугового процесса [9, 15] контролировались потери на поиск и средняя скорость перемещения электрода.

Результаты моделирования СЭР для двух критериев наличия тренда представлены на рис. 3,4.

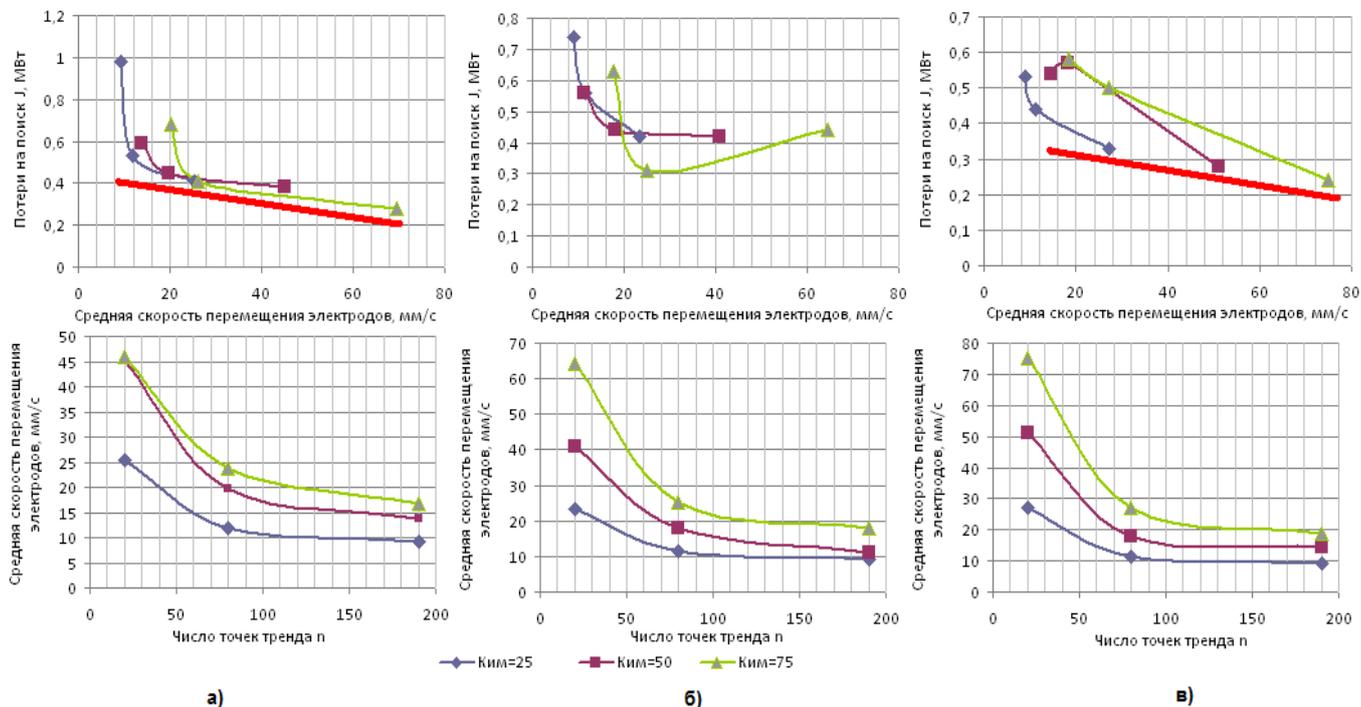


Рис. 3. Зависимости средней скорости электрода от числа точек определения тренда по критерию нисходящих и восходящих серий и зависимости потерь на поиск от средней скорости электрода при различных предельных его скоростях, определяемых коэффициентом усиления $K_{ум}$ и способами определения направления тренда по: а) знаку длиннейшей серии; б) по знаку величины $P(I_{макс}) - P(I_{мин})$, где $I_{макс}$ и $I_{мин}$ – максимальное и минимальное значение тока в ряде данных; в) по знаку величины $\sum_{i=1}^N sign(P(i+1) - P(i)) \cdot (P(i+1) - P(i))^2$, где $P(i)$ – ряд мощности, упорядоченный по возрастанию соответствующих значений тока I ; г) по коэффициенту a уравнения линейной регрессии зависимости $P(I) = a \cdot I + b$

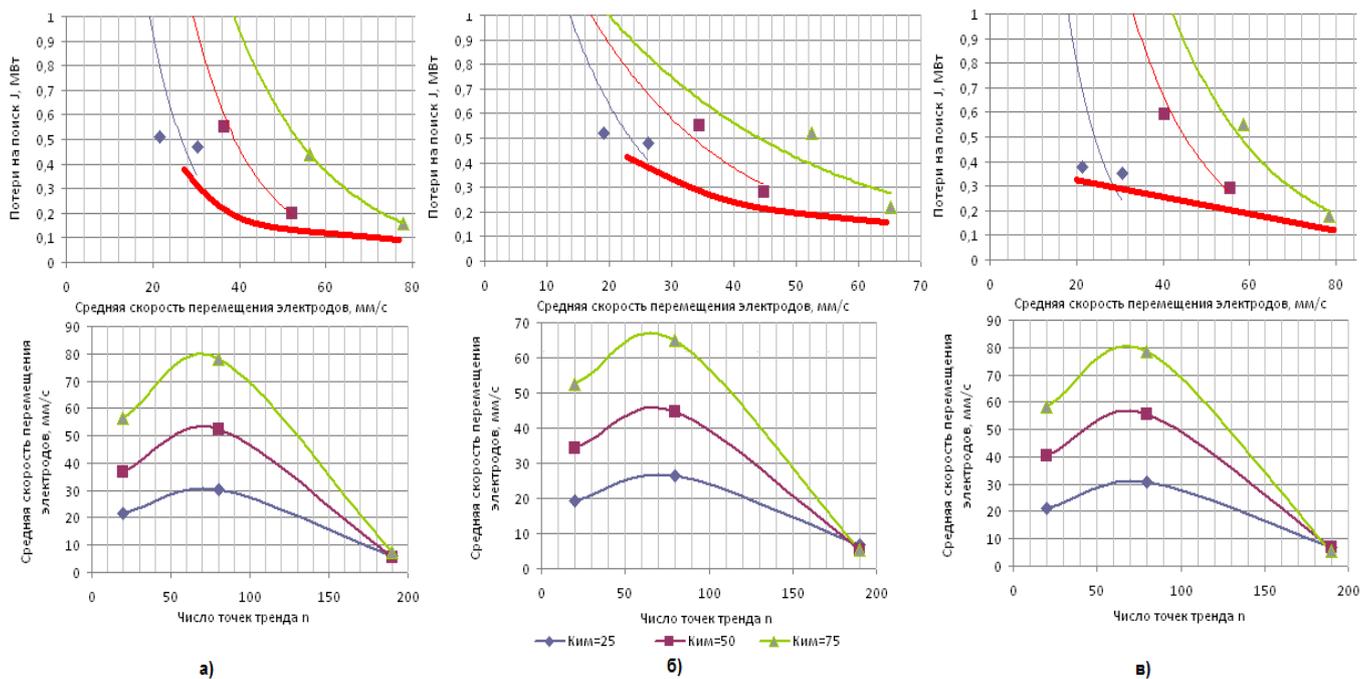


Рис. 4. Зависимости средней скорости электрода от числа точек определения тренда по критерию Аббе и зависимости потерь на поиск от средней скорости электрода при различных предельных его скоростях, определяемых коэффициентом усиления $K_{им}$ и способах определения направления тренда по: а) по знаку величины $P(I_{макс}) - P(I_{мин})$; б) по знаку величины $\sum_{i=1}^N \text{sign}(P(i+1) - P(i)) \cdot (P(i+1) - P(i))^2$, где $P(i)$ – ряд мощности, упорядоченный по возрастанию соответствующих значений тока I ; в) по коэффициенту a уравнения линейной регрессии зависимости $P(I) = a \cdot I + b$

Из зависимостей средней скорости электрода от числа точек определения тренда по критерию нисходящих и восходящих серий можно сделать вывод о высокой степени их соответствия друг другу при одинаковой предельной скорости электрода, определяемой коэффициентом усиления управляющего сигнала СЭР $K_{им}$. Различия, связанные со способом оценки направления тренда проявляются при малом числе точек ($N = 20$). При определении тренда по критерию Аббе на зависимости средней скорости электрода способ определения направления тренда практически не оказывает влияния.

Для обоих рассматриваемых критериев характерно снижение скорости при большом числе точек, однако, критерий серий демонстрирует постоянство средней скорости в диапазоне 70-200 точек, в то время как для критерия Аббе скорость в этом диапазоне снижается.

Схожие минимальные потери на поиск для обоих критериев достигаются при схожей максимальной средней скорости перемещения электродов. Однако, для критерия серий максимум скорости достигается при минимуме точек, а настройка системы с критерием Аббе требует поиска экстремума зависимости средней скорости от числа точек при выбранном коэффициенте усиления и периодичности опроса датчиков. Форма зависимостей средней скорости при использовании критерия серий в большей степени пригодна для выбора компромисса между потерями на поиск и нагрузкой на гидропривод электродов.

Сравнение зависимостей потерь на поиск от средней скорости электрода показывает, что при использовании критерия Аббе на форму зависимостей способ

определения направления тренда не оказывает значимого влияния. Однако, снижение средней скорости по отношению к максимальной приводит к большему росту потерь на поиск, чем при использовании критерия серий. При использовании критерия серий способ определения направления тренда оказывает существенное влияние на потери. Среди рассмотренных вариантов наиболее рациональным является использование знака уравнения линейной регрессии зависимости мощности от тока.

При использовании рассмотренных систем экстремального регулирования важной задачей является совместный выбор числа точек для определения тренда и дискретности сбора данных во времени. С этой целью рассмотрим работу СЭР, основанной на критерии «восходящих» и «нисходящих» серий, в режиме модуляции скорости электрода, когда при определении отсутствия тренда движение электрода возобновляется только спустя заданное время выдержки.

Для модуляции с выдержкой получены зависимости средней скорости электрода от десятичного логарифма времени выдержки (рис. 5, а). Важной особенностью является то, что количество точек определения тренда практически не оказывает влияния на среднюю скорость электрода при наличии выдержки. Влияющим фактором является период времени, по которому определяется тренд.

Изучение зависимостей на рис.5,а показало, что средняя скорость перемещения электрода может быть рассчитана как функция одного фактора - логарифма отношения времени выдержки к периоду времени по которому определяется тренд (рис. 5,б). При этом

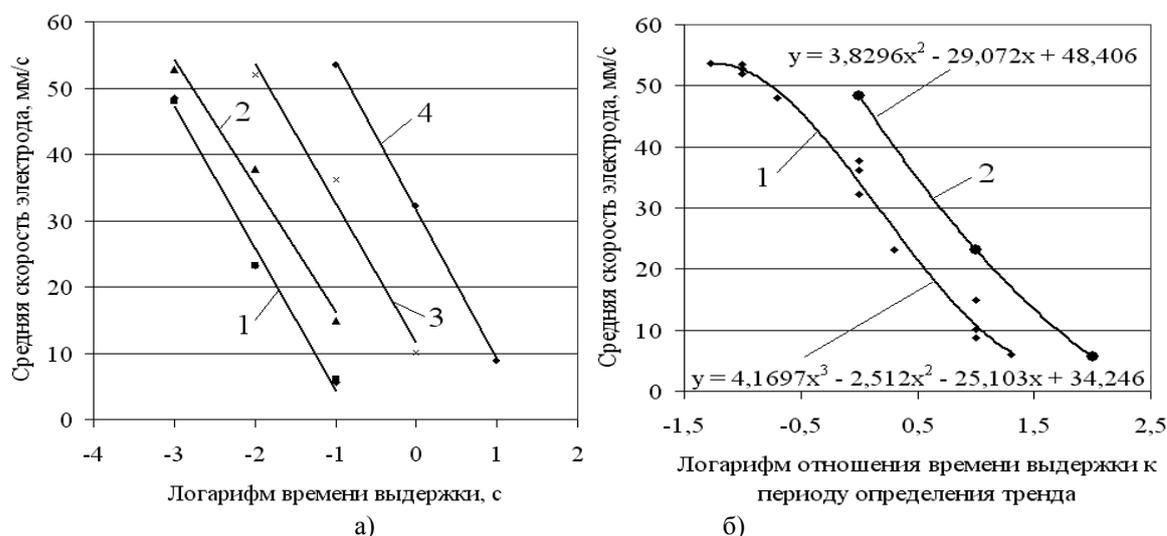


Рис.5. Зависимости средней скорости перемещения электрода:

а) от логарифма времени выдержки при разных периодах времени, по которому определяется тренд: 1 – 0,001 с; 2 – 0,01 с; 3 – 0,1 с; 4 – 1 с; б) от логарифма отношения времени выдержки к периоду времени, по которому определяется тренд: 1 – количество точек при определении тренда 50-200; 2 – количество точек при определении тренда 10

специфика критерия оценки наличия тренда оказывает влияние при малом числе точек определения тренда (менее 20) в форме смещения зависимости.

Учитывая близкие к линейным зависимости средней скорости (рис. 5,б), целесообразна модуляция управляющего сигнала с использованием выдержки после достижения экстремума.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рябчиков, М.Ю.** Оптимизация управления электрическими режимами работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока с использованием прогнозирующей системы / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова // Автоматизация в промышленности. №11. 2014. №6. С. 46 – 50.
2. **Усачев, М.В.** Система автоматического управления энергетическим режимом электродуговых печей переменного тока : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. М., 2009. 137 с.
3. **Французова, Г.А.** Синтез систем экстремального регулирования для нелинейных нестационарных объектов на основе принципа локализации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.01 / Г.А. Французова. – Новосибирск, 2004. – 346 с.
4. **Krstić, M.** Performance improvement and limitations in extremum seeking control / Miroslav Krstić // Systems & Control Letters - SYST CONTROL LETT. – 2000. – vol. 39, no. 5. – P. 313–326.
5. **Guay, M.** Adaptive extremum seeking control of nonlinear dynamic systems with parametric uncertainties / M. Guay, T. Zhang // Automatica. – 2003. – vol. 39, no. 7. – P.1283–1293.
6. **Frantsuzova, G.** Design of Two-Loops Extremum Seeking System by Means of Localization Method // Proc. of the IASTED Intern. Conf. «Automation, Control and Information Technology (ACIT-in 2005)». – Anaheim-Calgary-Zurich: ACTA Press. – 2005. – P. 415–419.
7. **Frantsuzova, G.** Features of different types of automatic extremum seeking systems based on localization method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Allerton Press, Inc.– 2012. – № 48. – 438–446.
8. **Рябчикова, Е.С.** Оценки эффективности использования электрической энергии на ДСП-180 ОАО «ММК» / М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова, Б.Н. Парсункин // Научное обозрение. – 2015. - №1. – С.68-76.
9. **Рябчиков, М.Ю.** Особенности разработки и программирования математических моделей, используемых в задачах обучения управлению технологическими процессами / М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова, В.В. Гребенникова // информатизация образования и науки. 2015. №3(27). С. 55-64.
10. **Рябчиков, М.Ю.** Системы экстремального регулирования на основе комбинации поисковых оптимизационных алгоритмов / М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т.16. №5. С. 300-306.
11. **Рябчиков, М.Ю.** Моделирование низкочастотных возмущений электрических параметров в дуговой сталеплавильной печи переменного тока ДСП-180 / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова // Электрометаллургия. 2015. №5. С. 31-40.
12. **Ахметов, У.Б.** Интенсификация плавления шихты в дуговых сталеплавильных печах путем оптимизации управления энергетическим режимом : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02, 05.13.06 / У.Б. Ахметов. – Магнитогорск, 2008. – 157 с.
13. **Pozzi, M.** Operating results of Goodfellow EFSOP® at Riva Galtarossa, Italy / M. Pozzi, J. Maiolo, D. Masoero, V. Scipolo, N. Veneri // Millennium steel. – 2008. – P. 89 – 93.
14. **Clerici, P.** iEAF™ concept and technical overview / P. Clerici, F. Dell'Acqua, J. Maiolo, V. Scipolo // Millennium steel. – 2009. – P. 75 – 81.
15. **Рябчикова, Е.С.** Реализация модели электрического контура трехфазной цепи ДСП в программной среде VisSim / Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков // Электротехнические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 327-331.

УПРАВЛЕНИЕ ТОЛЩИНОЙ ПОЛОСЫ ЗА ПЕРВОЙ КЛЕТЬЮ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С ПОМОЩЬЮ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ

В.М. Москвин¹, С.В. Витик²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

MANAGEMENT STRIP THICKNESS OF THE FIRST STAND COLD ROLLING MILL WITH AN ADDITIONAL DISTRIBUTION CHANNEL EXTERNAL PERTURBATION

V.M. Moskvin¹, S.V. Vitik²

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹Vladimir.moskvin2010@yandex.ru

Аннотация. Имеется два канала влияния изменения толщины подката на толщину полосы за первой клетью стана. Изменение усилия прокатки в первой клетке приводит к дополнительной деформации всех элементов клетки и изменению толщины полосы на её выходе. Изменение момента прокатки приводит к изменению скорости вращения валков первой клетки и изменению натяжения полосы за первой клетью стана. Это тоже приводит к изменению толщины полосы. В работе показана возможность компенсации изменения толщины подката на скорость вращения валков первой клетки с помощью дополнительного канала распространения внешнего возмущения, действующего на скорость прокатки металла в первой клетке.

Ключевые слова: холодная прокатка; управление толщиной полосы; компенсация внешнего возмущения.

Abstract. There are two channels of influence on changes in the thickness of the rolled strip thickness of the first stand of the mill. Changing the rolling force in the first stand causes further deformation of the cage element and the strip thickness change at its output. Changing rolling moment causes a change in the rotational speed of the first roll stand and a strip tension for changing the first stand mill. This also leads to a change in thickness of the strip. The paper shows the possibility of compensating the change in thickness rolled on the rotation speed of the first roll stand with an additional distribution channel external disturbance acting on the rolling speed of the metal in the first stand.

Keywords: cold rolling; strip thickness control; compensation of external disturbance.

Актуальность работы

В последние годы многие металлургические агрегаты оснащаются новыми средствами контроля состояния процесса, что позволяет повысить эффективность управления [4-9]. Так, в настоящее время на ряде станов холодной прокатки листа стали устанавливаются измерители толщины полосы перед первой клетью стана. Это позволило создать принципиально новые каналы управления толщиной полосы. Обратимся к уравнениям очага деформации металла в i – той клетке стана [1]:

$$\Delta H_{1i} = a_{1i}\Delta H_{0i} + a_{2i}\Delta T_{0i} + a_{3i}\Delta T_{1i} + a_{4i}\Delta d_i, \quad (1)$$

$$\Delta M_i = b_{1i}\Delta H_{0i} + b_{2i}\Delta H_{1i} + b_{3i}\Delta T_{0i} + b_{4i}\Delta T_{1i}, \quad (2)$$

где ΔH_{0i} , ΔT_{0i} – изменение толщины и натяжения полосы перед клетью стана; ΔH_{1i} , ΔT_{1i} – соответственно изменение толщины и натяжения полосы за клетью стана; Δd_i – перемещение нажимного устройства клетки; ΔM_i – изменение момента прокатки.

Если замерить толщину подката перед первой клетью ΔH_{0i} и переместить нажимное устройство на величину $\Delta d_i = - (a_{1i} \cdot \Delta H_{0i}) / a_{4i}$, то изменение толщины подката не будет влиять на толщину полосы за первой клетью ΔH_{1i} . Динамические возможности системы,

которая использует такой метод компенсации входной разнотолщинности подката, рассмотрены в работе [2]. Однако имеется ещё один канал воздействия разнотолщинности подката на толщину полосы за первой клетью стана.

Из уравнения (2) следует, что если даже $\Delta H_{1i} = 0$, то всё равно ΔH_{0i} изменит момент прокатки первой клетки. Примем к рассмотрению уравнения электропривода i – той клетки стана. Обычно систему электропривода клетки со всеми обратными связями приводят к эквивалентной системе $\Gamma - D$ и представляют в виде двух уравнений, выписанных в приращениях относительно значений в установившемся режиме прокатки [1]:

$$\frac{d\Delta I_i}{dt} = c_i \Delta I_i + d_i \Delta V b_i + e_i \Delta U_i, \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta V b_i}{dt} = a_i \Delta I_i + b_i \Delta M_i, \quad (4)$$

где ΔI_i – ток двигателя, а ΔU_i – напряжения на шинах генератора.

В уравнении (4) частота вращения ротора двигателя клетки, приведена к окружной скорости вращения валков. Из системы уравнений (3)–(4) видно, что изменение момента прокатки приведёт к изменению

окружной скорости вала ΔVb_i , а это приведёт к изменению натяжения полосы в межклетевом промежутке. Уравнения связи клеток через упругую полосу имеют вид [1]:

$$\Delta H_{0,i+1}(t) = \Delta H_{1i}(t - \tau_i), \quad (5)$$

$$\frac{d\Delta T_{1i}}{dt} = f_{0,i+1}\Delta Vb_{i+1} + f_{1,i}\Delta Vb_i + f_{2,i}\Delta T_{1i}. \quad (6)$$

Формула (6) упрощенная, так как она не учитывает изменение натяжения полосы в предшествующем и последующем межклетевых промежутках, однако из неё видно, что изменение окружной скорости валков приводит к изменению межклетевого натяжения полосы и, как следует из уравнения (1) – к изменению толщины полосы за первую клетку. Этот канал влияния разнотолщинности на толщину полосы за первой клетку можно компенсировать, воспользовавшись принципом управления по возмущению. Для этого следует создать второй канал распространения внешнего возмущения.

Введём передаточные функции по каналу возмущения $H'_1(p) = \frac{\Delta H_{11}(p)}{\Delta H_{10}(p)}$ и по каналу управления $H''_1(p) = \frac{\Delta H_{11}(p)}{\Delta U_1(p)}$. Выберем передаточную функцию компенсирующего элемента из условия:

$$H'_1(p) + H''_1(p) \cdot H_k(p) \approx 0 \text{ или } H_k(p) \approx -\frac{H'_1(p)}{H''_1(p)}. \quad (7)$$

Выполнение этого условия обеспечит независимость толщины полосы за первой клеткой стана от разнотолщинности подката по каналу распространения возмущения $\Delta H_{01} \rightarrow \Delta M_1 \rightarrow \Delta Vb_1 \rightarrow \Delta T_{11} \rightarrow \Delta H_{11}$. Чтобы определить из (7) передаточную функцию компенсирующего звена, надо иметь передаточные функции $H'_1(p)$ и $H''_1(p)$.

Основные проблемы и решения

В СКМ Matlab имеется возможность работать с символическими переменными в том числе, производить математические выкладки с выражениями, содержащими переменные символического типа. Функция **Matlab solve()** позволяет выразить неизвестные символичные переменные через известные символичные переменные и коэффициенты. Кроме этого, в выражениях, содержащих символичные переменные, можно использовать целые и вещественные числа, не объявляя их символическими. Они автоматически переводятся в целые числа, т.е. в последовательность символов и в выражениях фигурируют как символические переменные. Операция деления над целыми и вещественными числами при выполнении математических преобразований над выражениями, содержащими символические переменные, - не производится.

При аналитическом решении линейных уравнений функция **solver** не производит группировку слагаемых по какому-либо заданному признаку. Решения уравнений содержат очень громоздкие числитель и знаменатель; группировать слагаемые приходится вручную. По этой причине, будем определять искомые передаточные функции $H'_1(p)$ и $H''_1(p)$ по шагам.

Сначала найдём передаточные функции электропривода стана. Введём новое обозначение для неизвестных переменных, управляющих воздействий и внешних

возмущений (в обозначениях имён переменных не допускаются греческие символы):

$$\Delta M1 \approx M1, \Delta M2 \approx M2, \Delta Vb1 \approx VB1, \Delta Vb2 \approx VB2, \Delta I_1 \approx I1, \Delta I_2 \approx I2, \Delta U_1 \approx U1, \Delta U_2 \approx U2, a_1 \approx A1, b_1 \approx B1, c_1 \approx C1, d_1 \approx D1, e_1 \approx E1; A_2 \approx A2, b_2 \approx B2, c_2 \approx C2, d_2 \approx D2, e_2 \approx E2; d/dt \approx p.$$

Программа, которая решает систему линейных алгебраических уравнений, имеет вид:

```

%Передаточные функции электропривода 2-х
клетевого стана
%
syms M1 M2 VB1 VB2 I1 I2 U1 U2;
syms A1 B1 C1 D1 E1;
syms A2 B2 C2 D2 E2;
syms p;
eq1=-p*VB1+A1*I1+B1*M1;
eq2=-p*VB2+A2*I2+B2*M2;
eq3=-p*I1+C1*I1+D1*VB1+E1*U1;
eq4=-p*I2+C2*I2+D2*VB2+E2*U2;
s=solve(eq1,eq2,eq3,eq4, VB1,VB2,I1,I2);

```

Команда **syms** указывает, что объявленные далее переменные символьного типа. Переменные eq(1-4) – обозначение уравнений с группировкой всех членов в одной его части (левой или правой). Функция – решатель **solve** имеет в качестве первых аргументов уравнения, входящие в систему, а затем идёт перечисление всех неизвестных переменных. Остальные величины (коэффициенты, возмущения, управляющие воздействия) принимаются за известные символьные величины, через которые выражаются неизвестные переменные. Решатель **solve** возвращает структуру **s**, поля которой - символьные выражения для неизвестных переменных. Нас интересуют две переменные VB1,VB2. Ниже, соответствующие величины, считаны из структуры **s**:

```

s.VB1=(A1*E1*U1+p*B1*M1-C1*B1*M1)/
(-A1*D1+p^2-C1*p);
s.VB2=(A2*E2*U2+p*B2*M2-C2*B2*M2)/
(-A2*D2+p^2-C2*p).

```

Таким образом, для первой клетки получим следующее уравнение в изображениях:

$$Vb1(p) = \frac{A1 \cdot E1}{p^2 - p \cdot C1 - A1 \cdot D1} U1(p) + \frac{p \cdot B1 - C1 \cdot B1}{p^2 - p \cdot C1 - A1 \cdot D1} M1(p).$$

Аналогичное уравнение получим для электропривода второй клетки, только везде индекс 1 надо заменить на 2.

Последнее уравнение перепишем в более употребительном виде:

$$Vb1(p) = \frac{K1}{TjTm1 \cdot p^2 + Tm1 \cdot p + 1} U1(p) + \frac{F1 \cdot p + P1}{TjTm1 \cdot p^2 + Tm1 \cdot p + 1} M1(p).$$

Исходные данные взяты для четырёхклетевого стана 2500 ОАО ММК: Сталь 08кп, Режим обжатий $H_0=2$ mm, $H_1=1.4$ mm, $H_2=1.0$ mm, $H_3=0.75$ mm, $H_4=0.6$ mm.

Натяжение полосы $T_0=5$ т.с., $T_1=21$ т.с., $T_2=17.8$ т.с., $T_3=14.5$ т.с., $T_4=123$ т.с. Скорость прокатки 7 м.с. Жёсткость прокатной клетки $Q=450$ т.с. Диаметр рабочего вала 500мм. Расстояние между клетями 5 м. Вновь введённые в уравнение коэффициенты рассчитаем по следующей программе:

```

% Численное значение параметров передаточных
% функций электропривода 2-х клетцевого стана
A1=0.00057183; B1=-0.0859; C1=-21.6774;
D1=-336770; E1=2580.6;
A2=0.00064507; B2=-0.1124; C2=-21.6774;
D2=-290320; E2=2580.6;
A1D1=-A1*D1; A2D2=-A2*D2;
TjTm1=1/A1D1; TjTm2=1/A2D2;
Tm1=-C1/A1D1; Tm2=-C2/A2D2;
K1=A1*E1/A1D1; K2=A2*E2/A2D2;
F1=B1/A1D1; F2=B2/A2D2;
P1=-C1*B1/A1D1; P2=-C2*B2/A2D2;

```

Получим уравнения электропривода первой и второй клетки в числовой форме:

$$Vb1(p) = \frac{0.00763}{0.005246p^2 + 0.0469p + 1} U1(p) + \frac{-4.4604 \cdot 10^{-4}p - 0.00967}{0.005246p^2 + 0.0469p + 1} M1(p),$$

$$Vb2(p) = \frac{0.00888}{0.005346p^2 + 0.0461p + 1} U2(p) + \frac{-6.002 \cdot 10^{-4}p - 0.01301}{0.00536p^2 + 0.0461p + 1} M2(p).$$

Обозначим многочлен знаменателя в последних двух уравнениях соответственно через $W1$ и $W2$.

Сделаем второй шаг. Для этого к уравнениям электропривода добавим уравнение натяжения полосы между клетями (5,6). С учётом ранее принятых обозначений, составим программу для аналитического вычисления натяжения между клетями:

```

% Передаточные функции 2-х клетцевого стана
%
syms M1 M2 VB1 VB2 U1 U2 T1;
syms W1 W2 Z1 Z2 K1 K2 V0 V1 KT;
syms p;
eq1=-W1*VB1+K1*U1+Z1*M1;
eq2=-W2*VB2+K2*U2+Z2*M2;
eq3=-p*T1+V0*VB2+V1*VB1+KT*T1;
s=solve(eq1,eq2,eq3,T1,VB1,VB2);

```

Результат решения этого уравнения:

```

s.T1=(V0*K2*U2*W1+V0*Z2*M2*W1+
V1*W2*K1*U1+V1*W2*Z1*M1)/
(W1*W2*(p-KT)).

```

Численное значение коэффициентов этого уравнения найдёт программа:

```

% Параметры модели системы: электропривод
% двухклетцевого стана
% упругая полоса
%
V0=5458.67; V1=-7900.27;
K1=0.0076628; K2=0.0088888;
Tm1=0.11257; Tm2=0.11575;
TjTm1=0.0051928; TjTm2=0.0053397;
F1=-0.00044606; F2=-0.00060018;
P1=-0.0096694; P2=-0.01301;
KT=-185.67;
W1=[TjTm1 Tm1 1]; W2=[TjTm2 Tm2 1];
Z1=[F1 P1]; Z2=[F2 P2];
pKT=[1 -KT];
% перемножение полиномов W1 на W2
D1=conv(W1,W2);
D2=conv(D1,pKT);
D=D2/D2(6);
TU2=conv((V0*K2),W1)/D2(6);
TM2=conv((V0*W1),Z2)/D2(6);
TU1=conv((V1*K1),W2)/D2(6);
TM1=conv((V1*Z1),W2)/D2(6);

```

Общий вид уравнения системы: электропривод двух клеток стана холодной прокатки связанных друг с другом через упругую полосу:

$$T1(p) = \frac{TU1}{D} U1(p) + \frac{TM1}{D} M1(p) + \frac{TU2}{D} U2(p) + \frac{TM2}{D} M2(p). \quad (8)$$

Многочлен знаменателя, записанный согласно правилам СКМ Matlab, будет таким:

$$D=[1.4934e-007 \ 3.4203e-005 \ 1.3291e-003 \ 2.4792e-002 \ 2.3371e-001 \ 1.0000e+000].$$

Соответственно, многочлены числителя для слагаемых правой части уравнения (8) будут такими:

$$TU1=[-1.7410e-003 \ -3.7741e-002 \ -3.2605e-001],$$

$$TU2=[1.3570e-003 \ 2.9418e-002 \ 2.6133e-001],$$

$$TM1=[1.0135e-004 \ 4.3939e-003 \ 6.6603e-002 \ 4.1143e-001],$$

$$TM2=[-9.1628e-005 \ -3.9725e-003 \ -6.0702e-002 \ -3.8249e-001].$$

Наконец, сделаем последний, третий шаг.

К уравнению (8) добавим четыре уравнения очага деформации (1),(2), взятые для первой и второй клетки и уравнение межклетцевого промежутка $H_{02}(t) = H_{11}(t - \tau_1)$.

Оператор запаздывания обозначен символической переменной **eps**. Эти шесть уравнений, вместе с введёнными новыми обозначениями для символьных переменных, приведены в следующей программе:

```

%Передаточные функции 2-х клетового стана
%
syms H1 H20 H2 M1 M2 T1 ;
syms H0 U1 U2;
syms eps;
syms a13 ;
syms a21 a22 ;
syms b11 b12 b14;
syms b21 b22 b23;
syms D TU1 TM1 TM2;
eq1=-H1+a13*T1;
eq2=-H2+a21*H20+a22*T1;
eq3=-H20+eps*H1;
eq4=-M1+b11*H0+b12*H1+b14*T1;
eq5=-M2+b21*H20+b22*H2+b23*T1;
eq6=D*T1-TM1*M1-TM2*M2-TU1*U1;
s=solve(eq1,eq2,eq3,eq4,eq5,eq6, H1,
H20,H2,M1,M2,T1);

```

Они позволяют в аналитической форме, т.е. в виде символического выражения, установить зависимость выходных переменных стана $\Delta H_{11} \approx H1$, $\Delta H_{21} \approx H2$, $\Delta T_{11} \approx T1$ от входных воздействий – внешнего возмущения $\Delta H_{01} \approx H0$ и управляющего воздействия $\Delta U_1 \approx U1$.

Результат выполнения программы:

```

pretty(s.H1)= a13 (TU1 U1 + TM1 b11 H0)/
(-TM1 b12 a13 - TM1 b14 + D - TM2 b21 epsa13-
-TM2 b22 a21 epsa13 - TM2 b22 a22 - TM2 b23);

```

Введём новые обозначения:

```

ZZ1=-TM1*(b14+b12*a13)+D; D1=ZZ1/ZZ1(6);
D2=-TM2*(b22*a22 + b23)/ZZ1(6);

```

В новых обозначениях знаменатель выражения для $H_1(p)$ запишется так: $D2+D1 \cdot \text{eps}$. Численные значения для всех коэффициентов всех полиномов получим в результате выполнения следующей программы:

```

%Передаточные функции 2-х клетового стана
a11=0.5598; a13=-0.0053; a14=0.4378;
a21=0.7068; a22=-0.0053;
b11=14.4743; b12=-14.7566; b14=-0.2764;
b21=20.2193; b22=-20.0467; b23=0.1672;
maxlen=length(D); TU1_1=zeros(1,maxlen);
TM1_1=zeros(1,maxlen); TM2_1=zeros(1,maxlen);
TU1_1(maxlen-length(TU1)+1:maxlen)=TU1;
%Выравнивание порядка многочленов
TM1_1(maxlen-length(TM1)+1:maxlen)=TM1;
TM2_1(maxlen-length(TM2)+1:maxlen)=TM2;
a1=(b21*a13+b22*a21*a13);
TM2_2=a1*TM2_1;
a2=b22*a22+b23;
a3=a13*b12+b14;
TM2_3=a2*TM2_1;
TM2_4=a3*TM1_1;
ZZ1=(-TM2_3-TM2_4+D);
D2=-TM2*(b21*a13 + b22*a21*a13)/ZZ1(6);
D1=ZZ1/ZZ1(6);
H1U1=a13*TU1/ZZ1(6);
H1H0=a13*b11*TM1/ZZ1(6);

```

Результаты:

```

D1=[ 1.2591e-007 2.8835e-005 0.0011586 0.022552 0.22215 1],
D2=[ -2.4771e-006 -0.0001074 -0.0016411 -0.01034],
H1H0=[-6.5547e-006 -0.00028417 -0.0043076 -0.02661],
H1U1=[ 7.7794e-006 0.00016864 0.0014569].

```

Таким образом, передаточные функции $H_1'(p), H_1''(p)$ получились такими:

$$H_1'(p) = \frac{H1H0(p)}{D2(p) + D1(p) \cdot e^{-\tau}}, H_1''(p) = \frac{H1U1(p)}{D2(p) + D1(p) \cdot e^{-\tau}}$$

Примем передаточную функцию компенсирующего элемента в виде полинома первого порядка $H_k(p) = a_2 \cdot p + b_2$. Полиномы $H1H0(p)$ и $H1U1(p)$ также запишем в общем виде:

$$H1H0(p) = a_1 p^3 + b_1 p^2 + c_1 p + d_1, \\ H1U(p) = a_3 p^2 + b_3 p + c_3,$$

где $c1=-0.0043076$, $d1=-0.02661$, $b3=0.00016864$, $c3=0.0014569$.

Уравнение (7), из которого определяются параметры корректирующего элемента, имеет вид:

$$H_1'(p) + H_1''(p) \cdot H_k(p) \approx 0.$$

Числитель этого выражения:

$$H1H0(p) + H_k(p) \cdot H1U1(p).$$

Выберем параметры a_2 и b_2 корректирующего звена так, чтобы свободный коэффициент и коэффициент при первой степени полинома числителя обратились в ноль. Это приводит к двум уравнениям $d_1 + b_2 c_3 = 0$, $c_1 + a_2 c_3 + b_2 b_3 = 0$. Из этих уравнений находим:

$$b_2 = -\frac{d_1}{c_3} = 18.26, a_2 = \frac{c_1 + b_2 b_3}{-c_3} = 0.84.$$

Принятая структура корректирующего элемента физически не реализуема. Поэтому введём в корректирующий элемент фильтр в виде инерционного звена с постоянной времени $T_\phi = 0.01$ с. В итоге получим следующую передаточную функцию корректирующего звена:

$$H_k(p) = 18.26 \frac{(0.0461p+1)}{(0.01p+1)}.$$

Это корректирующее звено не позволяет абсолютно точно скомпенсировать влияние внешнего возмущения на толщину полосы за первой клетью стана. Оценим эффективность его функционирования моделированием работы системы стан плюс динамический компенсатор. Модель системы приведена на рис.1.

В системе два компенсирующих элемента. Первый элемент, обозначенный цифрой 1, это усилитель с передаточным коэффициентом $-0.5598/0.4378$, а второй элемент – построенный динамический компенсатор, он обозначен цифрой 2. Эффективность действия второго элемента показана на рис.2.

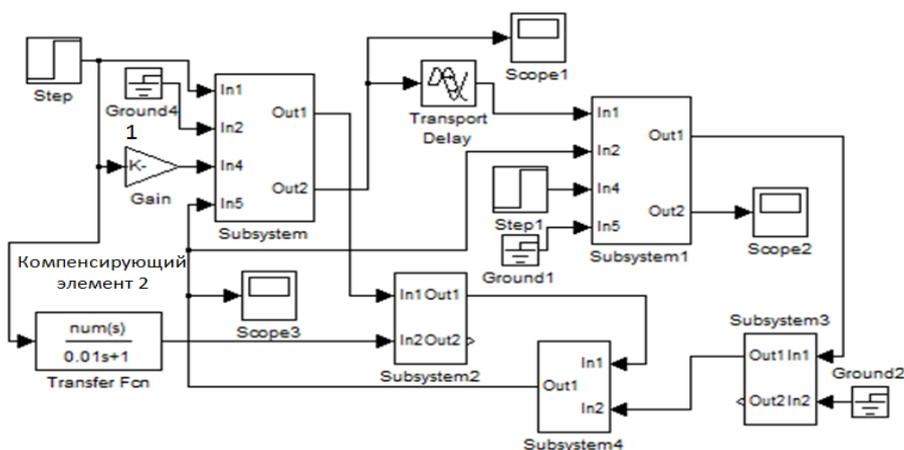


Рис. 1. Модель системы – двухклетевой стан холодной прокатки с компенсирующим элементом

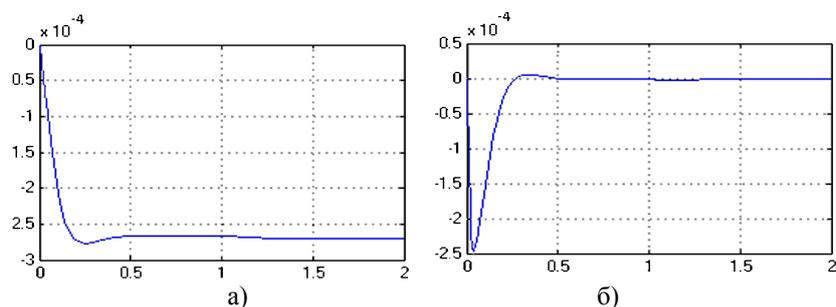


Рис. 2. Изменение толщины полосы за первой клетью стана:
а) без компенсации толщины полосы по второму каналу; б) с динамическим компенсатором

Из рис.2а видно, что в результате увеличения обжатия и момента прокатки в первой клетке, за счёт увеличения межклетевого натяжения изменяется (уменьшается!) толщина полосы за первой клетью. При включённом динамическом компенсаторе (рис. 2б), толщина за первой клетью через 0.5 с. возвращается к первоначальному значению. Имеется небольшая динамическая ошибка. Она возникла из-за того, что не было точно реализовано условие инвариантности (7).

Заключение

Приведено решение одной из задач управления толщиной полосы на непрерывных станах – управление толщиной полосы за первой клетью. Использован принцип управления по возмущению. Для удовлетворения принципа двухканальности необходимо иметь передаточные функции стана по каналам управления и возмущения. Разработана методика определения передаточных функций стана средствами СКМ Matlab. Приведён пример построения динамического звена, который позволил удовлетворить условию инвариантности с точность до ϵ и построить второй канал распространения внешнего возмущения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин, Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н.Н. Дружинин. – М.: Metallurgia, 1975. - 336 с.
2. Москвин, В.М. Управление по возмущению толщиной полосы за первой клетью стана холодной прокатки / В.М. Москвин // Автоматизированные технологии и

3. производств. 2014. № 6. С. 195-202.
3. Ануфриев, И. MATLAB 7 в подлиннике / И. Ануфриев, А. Смирнов, Е. Смирнова. – СПб. : «БХВ-Петербург», 2005. - 1084 с.
4. Парсункин, Б.Н. Адаптивные статистические модели, синтезированные на основе ИНС / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова, М.С. Галдин, Т.У. Ахметов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 4 (40). С. 68-71.
5. Рябчиков, М.Ю. Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига / М.Ю. Рябчиков, И.Г. Самарина // Металлообработка. 2013. №1(73). С. 43-49.
6. Гребенникова, В.В. Обзор рентгенофлуоресцентных анализаторов для контроля свойств рудных материалов / В.В. Гребенникова, Н.В. Богданов, М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова // Приборы. 2014. № 11. С. 45-50.
7. Ишметьев, Е.Н. Оптимизация энергетического режима работы электродуговой печи / Е.Н. Ишметьев, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, З.Г. Салихов, М.В. Усачев, М.Ю. Рябчиков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 23-27.
8. Павлов, А.С. Прогнозирование производства дефектной продукции агрегатом непрерывного горячего цинкования ОАО ММК с помощью нейросетевой модели процесса нагрева металла / А.С. Павлов, М.Ю. Рябчиков, Е.С. Михальченко // Электротехнические системы и комплексы. 2009. № 17. С. 135-139.
9. Полько, П.Г. Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин // Автоматизация в промышленности. 2010. № 11. С. 32-37.

**ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

**Б.Н. Парсункин¹, О.С. Логунова¹, М.Ю. Рябчиков², Е.С. Рябчикова¹,
Ю.А.Калугин¹, А.И. Сунаргулова¹**

^{1,2} ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

OPTIMIZATION OF BURDEN MATERIALS MILLING CONTROL IN METALLURGY

**B.N. Parsunkin¹, O.S. Logunova¹, M.Yu. Rybchikov², E.S. Rybchikova¹,
Yu.A.Kalugin¹, A.I. Sunargulova¹**

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²mr_mgn@mail.ru

Аннотация. В работе изложены основные результаты синтеза системы автоматической оптимизации управления (CAOU) технологическим процессом измельчения материалов в агрегатах барабанного типа с целью достижения максимальной текущей производительности.

Ключевые слова: системы экстремального регулирования; управление измельчением материалов; нечеткая логика; автоматическая оптимизация процесса.

Abstract. The paper presents the main results of automatic optimization system synthesis by means of technological process of materials milling in drum-type crushers for the purpose of maximum current output.

Keywords: optimum control system; materials milling control; fuzzy logic; automatic optimization.

Проблематика работы

В различных пределах металлургического производства осуществляется измельчение исходных шихтовых материалов с использованием стержневых или шаровых барабанных мельниц, работающих в замкнутом цикле. Измельчение материалов - это сложный технологический процесс, характеризующийся значительной инерционностью и запаздыванием, подверженный воздействию технологических возмущений, оказывающих существенное влияние на текущую производительность используемых технологических агрегатов [1]. Это препятствует созданию адекватных математических моделей процесса.

В представленной работе изложены основные положения синтеза системы автоматической оптимизации управления технологическим процессом измельчения материалов, принцип действия которой основан на совместном использовании положений нечеткой логики [10-12] и экстремального регулирования [2-9], способной обеспечить приемлемое качество управления в условиях отсутствия или недостаточности информации об оптимизированном процессе. Критерием оптимизации или целевой функции автоматической оптимизации управления является определение и поддержание на максимально возможном значении текущей производительности процесса измельчения. При реализации поставленной цели используем основные положения теорий нечеткой логики и экстремального регулирования.

В рассматриваемой CAOU формируется управляющий сигнал U в соответствии с принципом нечеткой логики. Для этого введем нечеткие переменные: X_1 - «Относительное приращение выходного сигнала»; X_2 -

«Приращение выходного сигнала»; U - «Управляющий сигнал».

В области текущего нормированного сигнала X_1 введем два нечетких множества, определяющих значения лингвистической переменной X_1 соответствующими функциями принадлежности ($A_1^{x_1}$ = «Большое»; $A_2^{x_1}$ = «Нулевое»). Аналогично определим функции принадлежности $\mu^{x_i}(X)$, где $i=1,2,3$ для значений лингвистических переменных X_2 : [$A_1^{x_2}$ = «Большое»; $A_2^{x_2}$ = «Нулевое»]. Графически функции принадлежности нечетких множеств $\mu^{x_i}(X)$ и значения их параметров $A_1^{x_1}, A_2^{x_1}, A_1^{x_2}, A_2^{x_2}$ в зависимости от величины входных параметров X_1, X_2 определены в виде функций Гаусса по выражениям [1,2] и представлены на рис. 1:

$$\mu_1^{x_i}(X) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(X-c)^2}{2\sigma^2}\right), & \text{если } X < c; \\ 1, & \text{если } X \geq c \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_2^{x_i}(X) = \exp\left(-\frac{(X-c)^2}{2\sigma^2}\right), \forall X, \quad (2)$$

где c - положение центра функции принадлежности (обычно $c = 0,5$); σ^2 - определяет ширину функции принадлежности ($\sigma = 0,2$).

В начале каждого цикла работы нечеткого регулятора вычисляются значения функций принадлежности $\mu^{x_i}(X)$ для каждого нечеткого множества для соответствующих входных переменных. В качестве операций конъюнкции и импликации используется операция алгебраического произведения, а в качестве метода дефазификации - метод по среднему центру.

Нечеткие множества значений выходной лингвистической переменной U определены функциями

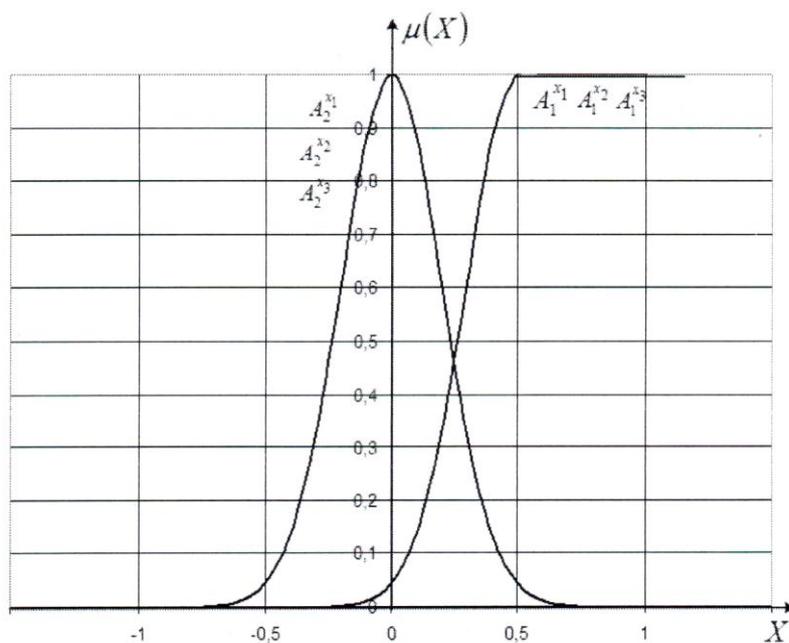


Рис.1. Зависимость значений функций принадлежности $\mu^{x_i}(X)$ от величины входных параметров X_1, X_2 и X_3

принадлежности: [B1 = « Большое»; B2 = « Нулевое»] и представлены в виде функций:

$$\mu^B(x) = \delta(x - b) = \begin{cases} 1, & \text{если } x=b \\ 0, & \text{если } x \neq b \end{cases} \quad (3)$$

где значения параметра b для каждого значения выходной лингвистической переменной представлены в виде вектора $b=[1,0]^T$.

Для организации поискового режима и получения правил нечеткого управления используется основной эвристический принцип: «Если приращение оптимизируемого параметра положительное (т.е. направлено на достижение цели) и большое, то расчет управляющего воздействия необходимо производить при сохранении текущего направления без учета фильтра, а если приращение небольшое, то расчет управляющего воздействия следует вести с учетом фильтра, поскольку выходной параметр находится в окрестности экстремума, в противном случае необходимо корректировать расчет управления в противоположном направлении».

Функционирование программно реализованного нечеткого регулятора определяется следующей базой правил:

$$\begin{aligned} R_1: & (X_1 = A_1^{x_1}) \frown (X_2 = A_1^{x_2}) \rightarrow U = B_1; \\ R_2: & (X_1 = A_1^{x_1}) \frown (X_2 = A_2^{x_2}) \rightarrow U = B_1; \\ R_3: & (X_1 = A_2^{x_1}) \frown (X_2 = A_2^{x_2}) \rightarrow U = B_2; \\ R_4: & (X_1 = A_2^{x_1}) \frown (X_2 = A_1^{x_2}) \rightarrow U = B_1; \\ R_5: & (X_1 = A_1^{x_1}) \frown (X_2 = A_1^{x_2}) \rightarrow U = B_1; \\ R_6: & (X_1 = A_2^{x_1}) \frown (X_2 = A_1^{x_2}) \rightarrow U = B_2. \end{aligned}$$

Каждое правило логически объясняет реальную производственную ситуацию и рекомендует соответствующее управляющее воздействие. Степень достоверности послылки каждого правила определяется в соответствии с выражением:

$$\mu_i^P = \mu_j^{x_1} \frown \mu_k^{x_2} \frown \mu_l^{x_3}, \quad (4)$$

где $i = 1,2,\dots,6$; $j = 1,2$; $k = 1,2$; $l = 1,2$ - отображение операции конъюнкции (логического «И»).

Затем производится операция определения значений выходных нечетких множеств для каждого правила в соответствии с достоверностью послылки этого правила по выражению:

$$\mu_i^R = \mu_i^P \frown \mu_i^Y, \quad (5)$$

где $i = 1,2,\dots,6$.

В заключении осуществляется операция дефаззификации с целью получения четкого значения выходной переменной U в соответствии с выражением :

$$U = \sum_{i=1}^6 b_i \cdot \mu_i^R / \sum_{i=1}^6 \mu_i^P, \quad (6)$$

где b_i - центр функции принадлежности выходного нечеткого множества для i -го правила.

Структурная схема шагового типа САОУ процессом измельчения, синтезированной на принципах нечеткого управления и экстремального регулирования представлена на рис. 2.

Объект управления ОУ аппроксимирован последовательным соединением трех звеньев: статическим звеном с экстремальной характеристикой $y = f(x)$, где $y = G_{\text{вых}}(\tau)$ - величина выхода в установившемся режиме; $X = G_{\text{пит}}(\tau)$ - управляющее воздействие - величина расхода питания; двух инерционных звеньев первого порядка с постоянными времени T_{06} и τ_3 , характеризующими инерционность и запаздывание процесса.

На выходную текущую величину процесса оказывают влияние различные технологические возмущения и случайные помехи.

Поскольку статическая характеристика процесса измельчения имеет экстремальный вид, то задачей САОУ является определение и поддержание максимально возможного значения $G_{\text{вых}}^{\text{max}}(\tau)$.

Управляющее воздействие в виде изменения величины питания целесообразно формировать на основе анализа величины и знака $\Delta Z/\Delta X$, полученной в результате управления на предыдущем шаге операции.

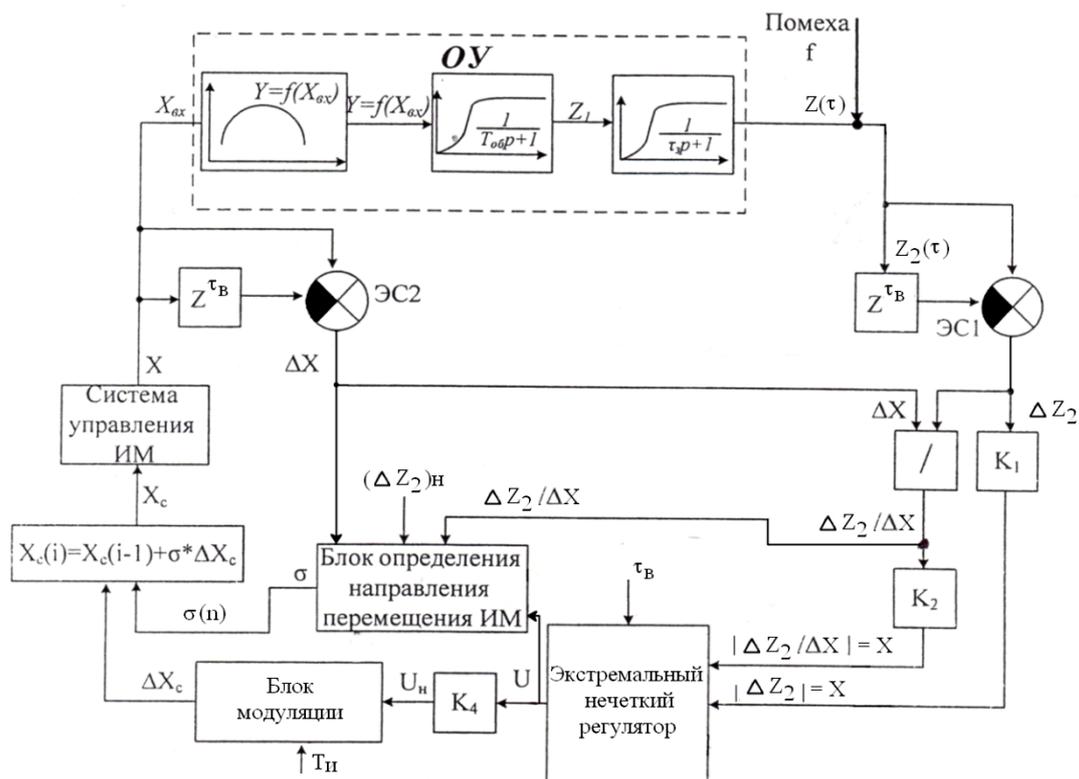


Рис. 2. Структурная схема числовой САОУ, синтезированной на принципах экстремального нечеткого управления

Учитывая, что в реальных условиях вид и положение статической характеристики оптимизированного процесса в координатах « $G_{\text{пнт}}(\tau) - G_{\text{вых}}(\tau)$ » не определены и не известны, то рассматривается система оптимизации управления, основанная на принципах экстремального управления и нечеткой логики, которая осуществляет формирование управляющего воздействия на каждый последующий шаг и операции управления в соответствии с базой правил (3) и процедурами (4), (5).

Результаты реализации решения задачи

Для условий Сибайского филиала ОАО «Учалинский горнообогатительный комбинат» линия регрессии для статической характеристики без учета дрейфа имеет вид [1]:

$$Y = f(X_{\text{вх}}) = -0,001564 \cdot X_{\text{вх}}^3 + 0,272322 \cdot X_{\text{вх}}^2 - 14,604459 \cdot X_{\text{вх}} + 294,377061.$$

Значения исходных данных приведены в таблице

1.

Расчет переходного процесса произведен с учетом воздействия на выходной сигнал случайной помехи, распределенной нормальному закону. Для моделирования этой помехи можно применить следующий алгоритм:

- 1) зарезервировать константу $C = 2 \cdot \pi$;
- 2) получить два случайных числа α_1 и α_2 из диапазона $[0; 1]$;
- 3) рассчитать величины $r = \sqrt{-2 \ln(\alpha_1)}$ и $\varphi = C \cdot \alpha_2$;
- 4) рассчитать итоговую величину случайной помехи $\xi = r \cdot \cos \varphi$.

График изменения случайной помехи представлен на рис.3.

Для моделирования изменения выходной величины использовался метод Эйлера [2] при дискретности расчета $\Delta t = 1$ мин для последовательного соединения звеньев. В начальный момент времени величина находи-

Таблица 1

Значения исходных данных для выполнения расчета

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
Начальное значение входного параметра	$X_{\text{вх}}$	т/ч	52
Постоянная времени объекта	T_o	мин	6,1
Время запаздывания	t_3	мин	2,0
Длительность цикла выдержки	t_6	мин	6,0
Нормирующий коэффициент	K_1	мин	2,48
Нормирующий коэффициент	K_2	-	15,0
Нормирующий коэффициент	K_3	-	15,0
Нормирующий коэффициент	K_4	-	5,0
Параметр настройки интегратора для блока модуляции	$T_{\text{и}}$	мин	0,25

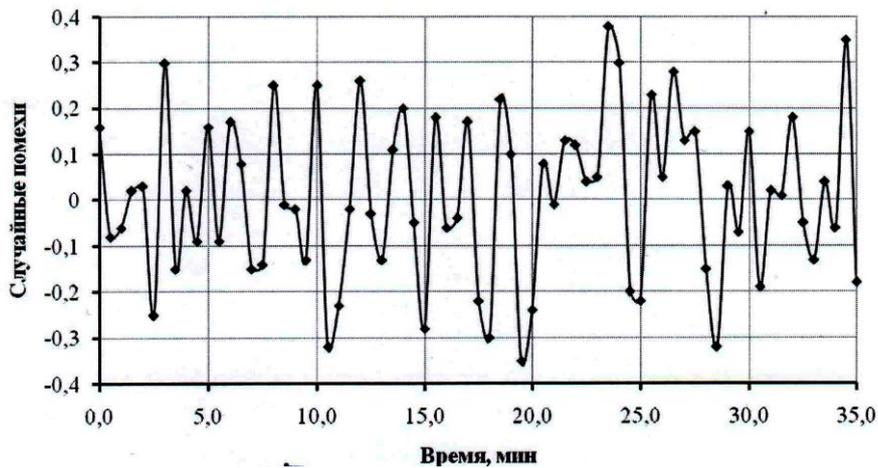


Рис.3. График изменения случайной помехи [1]

лась на уровне $X_{\text{вх}}$. При этом $Y = 51,393$. При уровне помех $\Delta\xi = 0,5$ значение выходного сигнала с учетом влияния помех:

$$Y' = Y + \Delta\xi \cdot \xi = 51,393 + 0,5 \cdot 0,164 = 51,475.$$

Таким же будет и первоначальное значение выходного сигнала, проходящего через фильтр, т.е. $Y_{\phi} = 51,475$. Допустим, что для движения к экстремуму необходимо принудительно увеличить входную величину на 5 единиц (в реальной ситуации величина задается по технологическим условиям, а направление первоначального изменения должно выбираться случайным образом). Т.е. $\Delta X = 5$ т/ч. После внесения этого возмущения необходимо подождать, пока выходная величина отреагирует на него. Период ожидания равен времени выдержки $t_e = 6$ мин.

После окончания первого цикла выдержки полученные следующие значения :

$$\begin{aligned} Y' &= 53,7 + 0,5 \cdot (-0,251) = 53,575 \text{ т/ч}; Y_{\phi} = 52,313 \text{ т/ч} \\ X &= 57 \text{ т/ч}; \Delta Y' = 53,575 - 51,475 = 2,1 \text{ т/ч}; \\ \frac{\Delta Y'}{\Delta X} &= \frac{53,575 - 51,475}{57 - 55} = \frac{2,1}{5} = 0,42; \\ \Delta \frac{Y_{\phi}}{\Delta X} &= \frac{53,313 - 51,475}{57 - 55} = \frac{0,838}{5} = 0,168. \end{aligned}$$

Далее полученные величины $\Delta Y'$, $\frac{\Delta Y'}{\Delta X}$ и $\frac{\Delta Y_{\phi}}{\Delta X}$ необходимо нормировать и взять по модулю:

$$\begin{aligned} |\Delta Y'| &= \frac{\Delta Y'}{K_1} = \frac{2,1}{2,48} = 0,847 = X_3; \\ \left| \frac{\Delta Y'}{\Delta X} \right| &= \frac{\Delta Y'}{\Delta X} \cdot \frac{1}{K_2} = \frac{0,42}{15} = 0,028 = X_1. \end{aligned}$$

Для получения числового значения управляющего сигнала регулятора используем упрощенный алгоритм нечеткого выхода:

1) определить значение функции, принадлежности каждого входного нормированного сигнала для значений $X_1 = 0,028$, $X_2 = 0,011$ и $X_3 = 0,847$, используя функции Гаусса (1) и (2):

$$A_1^{x_1} = \mu_1^{x_1}(X_1) = 0,062; \quad A_1^{x_2} = \mu_1^{x_2}(X_2) = 0,05;$$

$$\begin{aligned} A_1^{x_3} &= \mu_1^{x_3}(X_3) = 1,00; & A_2^{x_1} &= \mu_2^{x_1}(X_1) = 0,99; \\ A_2^{x_2} &= \mu_2^{x_2}(X_2) = 0,998; & A_2^{x_3} &= \mu_2^{x_3}(X_3) = 0,00; \end{aligned}$$

2) найти уровни «отсечений» для предпосылок каждого из правил согласно (3):

$$\begin{aligned} \mu_1^P &= A_1^{x_1} \wedge A_1^{x_2} = 0,062 \cdot 0,05 \cdot 1 = 0,0031; \\ \mu_2^P &= A_1^{x_1} \wedge A_1^{x_3} = 0,062 \cdot 0,998 \cdot 1 = 0,062; \\ \mu_3^P &= A_2^{x_1} \wedge A_2^{x_2} = 0,99 \cdot 0,998 \cdot 0 = 0,00; \\ \mu_4^P &= A_2^{x_1} \wedge A_2^{x_3} = 0,99 \cdot 0,05 \cdot 0 = 0,00; \\ \mu_5^P &= A_1^{x_1} \wedge A_2^{x_2} = 0,062 \cdot 0,05 \cdot 0 = 0,00; \\ \mu_6^P &= A_1^{x_1} \wedge A_2^{x_3} = 0,99 \cdot 0,05 \cdot 1 = 0,05; \end{aligned}$$

3) найти четкое значение выходной переменной (управляющего воздействия) по формуле (4):

$$U = \frac{0,0031 \cdot 1 + 0,062 \cdot 1 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 0,05 \cdot 0}{0,0031 + 0,062 + 0 + 0 + 0 + 0,05} = \frac{0,0651}{0,1151} = 0,565;$$

4) нормировать значения с выхода нечеткого регулятора:

$$U_n = U \cdot K_4 = 0,565 \cdot 5 = 2,825 \%;$$

5) вычислить рейтинги:

$$R^+ = 50 + 50 \cdot 0,011 = 50,55; \quad R^- = 48 + 0,5 = 48,5;$$

6) проверить условия: если $R^+ > R^-$, то увеличить перемещение ИМ, т.е. $\sigma = +1$, в противном случае $\sigma = -1$;

7) рассчитать значение входного сигнала системы управления ИМ:

$$X_c(i) = X_c(i-1) + \sigma \cdot \Delta X = 57 + 1 \cdot 2,85 = 59,825$$

8) после времени ожидания выполнить все шаги алгоритма, начиная с пункта 1;

9) расчет останавливается, если число циклов будет больше заданного $n_{\text{зад}}$.

В производственных условиях при включении САОУ число циклов не ограничено и поисковый процесс идет непрерывно в реальном времени до выключения системы.

В реальных условиях при изменении минералогического состава медно-цинковой руды величина $G_{\text{вых}}$ смещается (дрейфует) в общем случае непредсказуемым

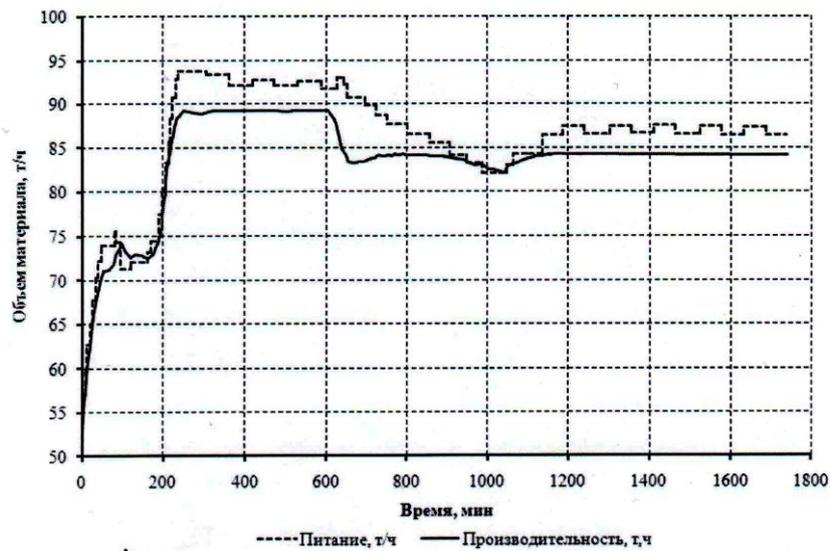
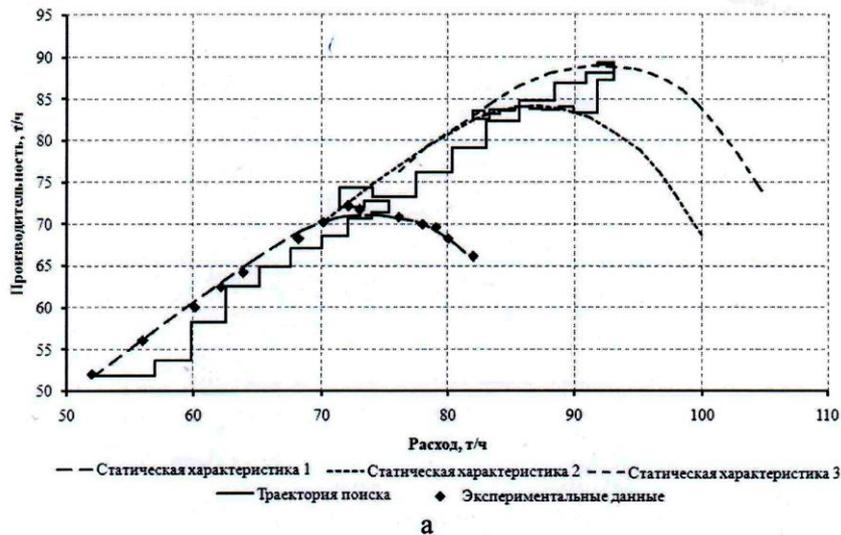
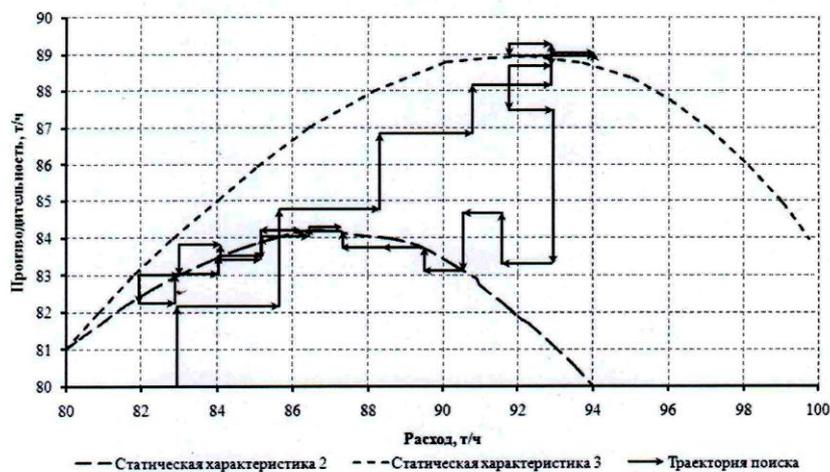


Рис.4. Траектория изменения во времени $G_{\text{пит}}(\tau)$ и $G_{\text{вых}}(\tau)$ в процессе оптимизирующего режима работы САΟΥ процессом измельчения при изменении условий, приводящих к смещению статической характеристики процесса измельчения [1]



а



б

Рис. 5. Расчетные траектории положения статической характеристики $G_{\text{вых}}(\tau) = Y(G_{\text{пит}}(\tau))$ и траектории изменения $G_{\text{вых}}(G_{\text{пит}}(\tau))$ в процессе поискового режима: а - при смещении характеристики процесса измельчения при изменении $G_{\text{вых}}^{\text{max}}(\tau)$ от 70 до 90 т/ч и от 90 до 84 т/ч; б - увеличенное изображение поискового режима работы САΟΥ при снижении производительности $G_{\text{вых}}^{\text{max}}(\tau)$ от 90 до 84 т/ч [1]

образом. При проверке эффективности поискового режима работы СНОУ процессом измельчения проведено математическое моделирование предлагаемого способа оптимизации управления. При моделировании управления одновременно проверено программное обеспечение и учтено изменение условий, способствующих как увеличению, так и уменьшению текущей производительности технологического агрегата под воздействием внешних условий измельчения медно-цинковой руды.

Траектории изменения во времени расхода питания $G_{\text{пит}}(\tau)$ и расхода выходного продукта $G_{\text{вых}}(\tau)$ при условии увеличения $G_{\text{вых}}$ от 70 до 90 т/ч и последующем снижении от 90 до 84 т/ч при функционировании программно реализованной САОУ процессом измельчения представлены на рис 4.

Для иллюстрации эффективности работы предлагаемой САОУ процессом измельчения на рис.5а представлены соответственно положение статической характеристики $G_{\text{вых}}(\tau) = Y(G_{\text{пит}}(\tau))$ и изменение текущей производительности агрегата измельчения при функционировании шаговой САОУ процессом измельчения, программно реализованной с использованием принципов нечеткого управления и экстремального регулирования в системе координат « $G_{\text{пит}}(\tau)$ - $G_{\text{вых}}(\tau)$ ». На рис. 5б представлена траектория поискового процесса в увеличенном масштабе при снижении производительности $G_{\text{вых}}^{\text{max}}(\tau)$ от 90 до 84 т/ч. Видно, что работа системы достаточно эффективна, что позволяет рекомендовать ее применение в промышленных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рябчиков, М.Ю.** Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, П.Г. Полько, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, Н.А. Головки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4. С. 65-69.
2. **Полько, П.Г.** Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин // Автоматизация в промышленности. 2010. № 11. С. 32-37.
3. **Рябчиков, М.Ю.** Оптимизация управления электрическими режимами работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока с использованием прогнозирующей системы / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова // Автоматизация в промышленности. №11. 2014. №6. С. 46 – 50.
4. **Frantsuzova, G.** Design of Two-Loops Extremum Seeking System by Means of Localization Method // Proc. of the IASTED Intern. Conf. «Automation, Control and Information Technology (ACIT-in 2005)». – Anaheim-Calgary-Zurich: ACTA Press. – 2005. – P. 415–419.
5. **Либерзон, Л.М.** Системы экстремального регулирования / Л.М. Либерзон, А.Б. Родов. – М.: Энергия. 1965. – 160 с.
6. **Либерзон, Л.М.** Шаговые экстремальные системы / Л.М. Либерзон, А.Б. Родов. – М.: Энергия, 1969. – 96с.
7. **Воронов, А.А.** Основы теории автоматического управления. Часть III. Оптимальные, многосвязные и адаптивные системы / А.А. Воронов. – Л.: Энергия. 1970. – 328 с.
8. **Красовский, А.А.** Динамика непрерывных самонастраивающихся систем / А.А. Красовский. – М.: Физматгиз, 1963. – 468 с.
9. **Frantsuzova, G.** Features of different types of automatic extremum seeking systems based on localization method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Allerton Press, Inc.– 2012. – № 48. – 438–446.
10. **Батыршин, И.З.** Основные операции нечеткой логики. Казань: Отечество, 2001. 102 с.
11. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 452 с.
12. **Казакевич, В.В.** Системы автоматической оптимизации / В.В. Казакевич, А.Б. Родов. – М.: Энергия, 1977. 288с.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДРОБЛЕНИЕМ

В.Л. Евстигнеев¹, Т.В. Майорова²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия.

THE CONCEPT OF BUILDING SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL OF CRUSHING

V.L. Evstigneev¹, T.V. Maiorova²

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² mtv1_2010@rambler.ru

Аннотация. В статье представлены результаты анализа процесса дробления горной массы. Предложена концепция построения системы оптимального управления по заполнению камеры дробления. Концепция включает определение затрат энергии на дробление с учетом колебательных процессов при разрушении частиц.

Ключевые слова: оптимальное управление, горная масса, энергия на дробление, колебательные процессы.

Abstract. The article contains results analysis of the process of crushing the rock formation. The authors proposed the concept of building a system of optimal control along filling of the crushing chamber. The concept includes the definition of expenses of energy on crushing and influence of oscillating processes at destruction of particles.

Keywords: optimal control, a rock formation, energy for crushing, oscillatory processes.

Управление это исполнение
вычисленного
Мнение автора

Суть дробления, которое, как и другие процессы [3, 5, 8, 12, 15] может являться многостадийным, заключается в том, чтобы путём физического воздействия в течение длительного времени преобразовать горную массу определенного гранулометрического состава в систему материальных частиц меньших геометрических размеров.

Для практического выполнения такого физического воздействия создают метрическое, ограниченное рабочее пространство изменяющихся размеров с входным загрузочным и выходным разгрузочным отверстиями. Горная масса, предназначенная для дробления, загружается и после выполнения необходимых действий по делению частей руды разгружается. Проще и экономичнее чередовать операции деления и перемещения руды так, чтобы достижение заданного размера частиц было на выходе из рабочего пространства.

Деление происходит в процессе уменьшения расстояния между рабочими поверхностями (сжатие системы частиц) свободного перемещения частиц в это время не наблюдается. Когда расстояние между рабочими поверхностями увеличивается, частицы перемещаются под действием силы тяжести к выходному отверстию рабочего пространства.

Производственный процесс дробления мы будем рассматривать как функционирование специально организованной системы внешних воздействий на движущийся поток кусков горной массы с целью их деления для получения системы частиц заданных

геометрических размеров.

Общие характеристики функционирования системы дробления:

- внешнее механическое воздействие получают путём превращения электрической энергии дробильным механизмом;
- производственный процесс функционирует во времени: в каждый момент времени находится в одном из возможных состояний, которое определяется предыдущими технологическими параметрами и входными воздействиями, поступившими в данный момент времени;
- процессу дробления свойственно последствие: поведение системы в будущем зависит не только от состояния в настоящий момент времени, но и от её поведения в предыдущие моменты времени – как и по какой траектории приложения физических воздействий горная масса получила входные характеристики;
- дробление не может быть выполнено мгновенно, поэтому в системе наблюдается запаздывание – время, необходимое для деления всех частиц;
- производственный процесс не реагирует на будущие факторы и воздействия, принцип причинно-следственной связи физического воздействия выполняется.

Из изложенного можно сделать вывод, что дробление имеет динамический характер функциони-

рования в пространстве и времени путём последовательной смены состояния руды под воздействием внешних и внутренних причин.

Каждая частица дробимого продукта может находиться в одном из двух типов движения: покой Z_0 , стесненное последовательное движение в замкнутом пространстве Z_d . Причем каждое состояние кратковременное.

Точка Z_0 такая, что при всех значениях t справедливо:

$$F(z_0, t) = Z_0.$$

Аналитическое выражение открытого непрерывного движения запишем в виде:

$$Z_n = F(B_z, t).$$

В результате наблюдений за процессом дробления можно найти такое T_n при котором:

$$Z_n = F(B_z, t + T_n) = F(B_z, t),$$

где T_n – период колебательного движения дробящей части механизма.

Производственный процесс дробления является периодическим, колебательным ещё и потому, что входные воздействия, а значит, и выходные параметры изменяются от минимума до максимума не мгновенно.

Грубую оценку физической сущности разделения частей руды выполним с помощью гипотетических рассуждений.

Допустим, часть рудного тела массой M под действием внешних сил распалась на n частейми m_1, m_2, \dots, m_n .

После дробления получим суммарную массу:

$$M_s = \sum_{i=1}^{\infty} m_i; m_{max} \geq m_i \geq m_{min}$$

$$i = 1, 2, \dots, \infty;$$

где m_{max} – масса частицы максимального размера; m_{min} – масса частицы, которую ещё можно измерить.

Разрушение тела приводит к тому, что нарушаются межмолекулярные связи, часть дробимой горной массы становятся пылевидной, массу которой M_n невозможно учесть, поэтому:

$$M_s = M - M_n.$$

Зная M_n , можно предположить, что энергия, затраченная непосредственно на дробление E_d :

$$E_d \cong M_n C^2.$$

Пылевидные частицы создают экологическую проблему. Пылевидные частицы разного размера с открытыми прямыми и обратными связями при попадании в организм человека вызывают болезни, называемые пневмоконозиами.

В рабочем пространстве механизма должно быть предусмотрено место для перемещения вновь образовавшихся частиц.

Крупность, физические свойства частиц, попадающих в зону дробления непостоянны, поэтому M_n меняется. Это приводит к тому, что процесс дробления нужно контролировать и оптимально управлять.

Функционал оптимизации в общем виде записывают так:

$$I = V_3[x(t_k), \rho] + \int_{t_1}^{t_2} L[x(\Theta), u(\Theta)\Theta, \beta, K] d\Theta,$$

где V_3 – заданная функция конечного состояния управляемого процесса; ρ – параметр, характеристика конечного состояния; $x(t_k)$ – функция перехода в конечное состояние; L – действующая функция из пространств технологического процесса и управления; Θ – параметр дифференцирования, может быть время; β – степень влияния на L ; K – степень влияния u на L ; t_1, t_2 – интервалы интегрирования, которые могут быть скользящими.

Для применения функционала оптимизации учтём особенности дробления.

Рассмотрим движение куска руды как движение материальной точки A с массой m по прямой OX под действием силы F . Положение точки A на прямой OX в момент времени t обозначим $x(t)$. Исследованиями великих учёных показано, что для описания движения точки A достаточно знать производную первого порядка $\frac{dx}{dt} = \dot{x}(t)$ – скорость и производную второго порядка $\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}(t)$ – ускорение.

Движение системы с одной степенью свободы можно представить дифференциальным уравнением:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}).$$

Функция $f(x, \dot{x})$ удовлетворяет условиям теоремы существования и единственности решения.

Под числом степеней свободы понимают число переменных, описывающих положение движущейся материальной точки A .

Движение n материальных частей в четырёхмерном пространстве будет иметь $4n$ степени свободы: трёхмерное эвклидово с учетом энергетического состояния.

Уравнения движения системы материальных частей можно записать в виде:

$$\dot{x}_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_{3n}; \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_{3n}), j = 1, 2, \dots, 4n.$$

С начальными данными:

$$x_j = x_j^0, x_2 = x_2^0, \dots, x_{4n} = x_{4n}^0, j = 1, 2, \dots, 4n.$$

В момент времени $t = t_0$. Любое частное решение уравнений позволяет найти совокупность функций:

$$\dot{x}_j(t) = \dot{x}_j(x_1^0, x_2^0, \dots, x_{4n}^0; \dot{x}_1^0, \dot{x}_2^0, \dots, \dot{x}_{4n}^0), j = 1, 2, \dots, 4n,$$

которые отражают график движения системы, что очень важно для решения задач управления системой, в данном случае дробления.

В рассмотренном случае начальных данных достаточно для определения состояния системы в любой момент времени $t > t_0$. Но для технологических объектов управления, в том числе дробления необходимо учитывать количество материала, находящегося в дробилке:

$$\Delta Q_d(t) = Q_n(t) - Q_{и}(t),$$

где ΔQ_d – запас руды в дробилке; Q_n – количество руды, подаваемое на дробление; $Q_{и}$ – количество руды на выходе из дробилки.

Механические свойства [4, 6, 11] руды и её количество в дробилке меняются, поэтому кроме материального баланса нужно учитывать энергию, затрачиваемую на дробление руды [1] в единицу времени:

$$E_d = f(t).$$

Чем труднее дробится руда, тем больше времени она находится в дробилке, тем больше энергопотребление, что необходимо учитывать в процессе управления.

Для учёта времени применим дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом:

$$\dot{x}(t) = f[t, x(t), x(t - \tau)].$$

Запаздывание меняется во времени не только из-за механических свойств руды, но и технических характеристик оборудования, запаздывание есть функция времени $\tau(t)$:

$$\dot{x}(t) = f[t, x(t), x(t - \tau(t))].$$

На основании изложенного построим концепцию управления щековой дробилки.

Дробилку представим в виде двух зон. В самой верхней, назовём её накопительной, процесс дробления не происходит. Изменение количества руды в накопительной зоне говорит о том, что свойства руды изменились, количество подаваемой руды превышает пропускную способность питателя и возможности дробильного агрегата. В этом случае, чтобы раздробить большее количество руды требуется увеличить число воздействий на дробимый материал, а чтобы исключить срабатывание аварийного уровня нужно меньше подавать руды. Вторая зона – зона интенсивного дробления.

Поскольку во всех зонах происходит движение частиц, как было сказано выше, любое движение можно описать дифференциальным уравнением второго порядка с запаздыванием:

$$a_{2n}\ddot{y}(t) + a_{1n}\dot{y}(t) + a_{0n}y(t) = b_{0n}x(t - \tau_n),$$

где $n = 1, 2$.

Запишем критерий управления для процесса дробления [2] в специально организованном рабочем пространстве, которое должно быть постоянно заполнено до предела, задаваемого свойствами руды и возможностями управляющих воздействий:

$$V_0 = V_k [f(t_k), g(k_a), + \int_{t_1}^{t_2} [Lf(\theta), D(\theta), W_d(\theta)] d\theta],$$

где V_0 – объём оптимального заполнения камеры дробления; V_k – геометрические размеры камеры; $f(t_k)$ – функция управления процессом дробления; g – функция состояния заполнения камеры дробления для данных свойств k_a руды; k_a – параметр, характеризующий величину дефекта массы руды крепость; $Lf(\theta)$ – оператор со скалярным выходом для определения операторного управляющего воздействия по скорости опорожнения приёмного бункера; $D(\theta)$ – дисперсия руды на отходящем конвейере; $W_d(\theta)$ – энергия, затрачиваемая на дробление.

Предложенная концепция построения систем автоматического управления дроблением согласуется с [9, 10, 13, 14] и определяет основные принципы:

1. Содержание полезных ископаемых в горной массе становится всё меньше, увеличивается объём и глубина дробления, существенно возрастает пылевыделение. Как следствие, будет возрастать заболеваемость пневмококоном. Современные технические средства позволяют повысить уровень автоматизации процесса дробления и способствовать снижению профессиональной заболеваемости работников.
2. В процессе синтеза системы управления необходимо учитывать, что внешние и внутренние воздействия на дробление носят колебательный характер, это должно быть отражено в математической модели дробления как объекта управления.
3. Для оптимального управления требуется предусмотреть два управляющих воздействия: параметрическое – управление количеством горной массы и операторное – изменение настроек и структуры регулятора.
4. Контролируемыми параметрами являются уровень загрузки, производительность и энергия, затрачиваемая на дробление.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Евстигнеев, В.Л.** Оптимизация затрат электроэнергии в цехах крупного дробления на примере щековой дробилки / В.Л. Евстигнеев, Т.В. Майорова // Автоматизированные технологии и производства. №1(7). 2015. С. 26-28.
2. **Евстигнеев, В.Л.** Постановка задачи оптимизации многостадийного дробления / В.Л. Евстигнеев // Автоматизированные технологии и производства. №5. 2013. С. 263-270.
3. **Рябчиков, М.Ю.** Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига / М.Ю. Рябчиков, И.Г. Самарина // Металлообработка. 2013. №1(73). С. 43-49.
4. **Рябчиков, М.Ю.** Моделирование комплексного влияния производственных факторов на механическую прочность металлургического агломерата / М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова // Металлург. 2013. № 4. С. 40-47.
5. **Павлов, А.С.** Прогнозирование производства дефектной продукции агрегатом непрерывного горячего цинкования ОАО ММК с помощью нейросетевой модели процесса нагрева металла / А.С. Павлов, М.Ю. Рябчиков, Е.С. Михальченко // Электротехнические системы и комплексы. 2009. № 17. С. 135-139.

6. **Гребенникова, В.В.** Обзор рентгенофлуоресцентных анализаторов для контроля свойств рудных материалов / В.В. Гребенникова, Н.В. Богданов, М.Ю. Рябчиков, Е.С.Рябчикова // Приборы. 2014. № 11. С. 45-50.
7. **Полько, П.Г.** Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / П.Г. Полько, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, М.Ю. Рябчиков, С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин // Автоматизация в промышленности. 2010. № 11. С. 32-37.
8. **Рябчиков, М.Ю.** Использование модели нагрева полосы при управлении температурным режимом в протяжной печи башенного типа / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Н.А. Головки // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. № 5. С. 41-50.
9. **Рябчиков, М.Ю.** Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности / Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Полько П.Г., Логунова О.С., Рябчикова Е.С., Головки Н.А.// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. -№ 4. -С. 65-69.
10. **Рябчиков, М.Ю.** Достижение максимальной производительности оптимизируемого процесса измельчения руды при использовании принципов нечеткого экстремального управления / Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С.,Рябчикова Е.С., Головки Н.А., Полько П.Г.// Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. -№ 2. -С. 5-9.
11. **Рябчиков, М.Ю.** Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости / М.Ю.Рябчиков, В.В.Гребенникова, Е.С.Рябчикова // Сталь. 2014. -№ 2. -С.4-8.
12. **Андреев, С.М.** Концепция нейросетевой системы управления многозонными нагревательными устройствами протяжного типа / С.М. Андреев, Б.Н. Парсункин, М.Ю. Рябчиков, В.Н. Целых // Электротехнические системы и комплексы. 2007. № 14. С. 344-351.
13. **Бурнашев, Р.Э.** Управление работой центробежной дробилки СС-0.36 с учетом значения коэффициента крепости исходного материала по методу Протодьяконова / Р.Э. Бурнашев, М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова // Автоматизированные технологии и производства. №6. 2014. С. 203-208.
14. **Бурнашев, Р.Э.** Изучение возможных подходов к управлению дробилками центробежного типа производства ЗАО «УРАЛ-ОМЕГА» с учетом качества получаемого продукта / Р.Э. Бурнашев, М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1 (49). С. 82-89.
15. **Рябчиков, М.Ю.** Статистические модели нагрева полосы в протяжной печи башенного типа агрегата непрерывного горячего оцинкования / М.Ю. Рябчиков, С.Н. Рахманов, А.А. Беляков // Автоматизированные технологии и производства. 2012. № 4. С. 81-97.

**ЦЕНТР МОНИТОРИНГА ЭКСПЛУАТАЦИИ В СРЕДЕ PLM КАК
ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРАКТА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ**

В.Б. Кузнецова¹, А.И. Сергеев², Д.В. Кондусов³

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

³АО «ПО «Стрела», г. Оренбург, Россия

**MONITORING CENTRE OPERATION IN ENVIRONMENTS PLM AS
TECHNOLOGY OF THE PRODUCT LIFECYCLE CONTRACT**

V.B. Kuznetsova¹, A.I. Sergeev², D.V. Kondusov³

^{1,2}Orenburg State University, Orenburg, Russia

³Joint-Stock Company Association «Strela», Orenburg, Russia

¹valyosha@list.ru

Аннотация. В соответствии с разработанной и утвержденной Концепцией разработки, внедрения и развития системы управления полным жизненным циклом вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ), под управлением ЖЦ понимается совокупность видов деятельности заказчиков, разработчиков, производителей, эксплуатирующих организаций и органов управления на всех этапах ЖЦ, направленных на достижение требуемых значений характеристик ВВСТ, основными из которых являются боевая эффективность, надежность и техническая готовность в ходе эксплуатации, а также стоимость полного жизненного цикла (ПЖЦ). Актуальным представляется разработка технологии, позволяющей оптимально регулировать виды деятельности всех участников процесса интегрированной логистической поддержки (ИЛП), определить критерии технической готовности изделия в ходе эксплуатации и найти пути снижения стоимости полного жизненного цикла.

Ключевые слова: интегрированная логистическая поддержка(ИЛП), единое информационное пространство, мониторинг эксплуатации изделия, PDM-система, PLM-система.

Abstract. In accordance with the developed and approved the Concept of development, implementation and development of the system for managing the full life cycle of weapons, military and special equipment (WMSE), under the control of LC means the totality of the activities of customers, developers, manufacturers, operators and controls at all stages of the life cycle, to achieve the desired characteristic values(WMSE), the main of which are combat effectiveness, reliability and technical readiness during the operation, as well as the cost of the full life cycle (FLC). Topical is to develop technology that allows optimally regulate the activities of all participants in the process of integrated logistic support (ILS), define the criteria for the technical readiness of the product during the operation, and to find ways to reduce the cost of the full life cycle.

Keywords: Integrated Logistics Support (ILS), a unified information space, monitoring of the product operation, PDM-system, PLM-system, electronic document flow.

Статья подготовлена при поддержке областного гранта «Разработка методологии технического перевооружения предприятий машиностроительного комплекса Оренбуржья на основе производственных систем нового поколения», соглашение № 36 от 23 июня 2015 г.

В последние пять лет вопросы контрактов жизненного цикла (ЖЦ) вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) стали очень актуальными: сопровождение изделий от проектирования, конструирования в результате выполнения работы до последующих обслуживания, ремонта, эксплуатации и (или) утилизации [4, 5, 7, 8, 10]. В современных условиях существенными являются затраты на эксплуатацию изделия. Необходимость их сокращения требует разработки набора моделей и методов, включающих постоянное наблюдение за процессами эксплуатации для оценки их состояния и

прогнозов развития. Совокупность видов деятельности, выполняемых участниками любых стадий жизненного цикла с использованием управленческих, инженерных и информационных технологий и направленных на обеспечение высокого уровня эксплуатационных свойств сложной техники при приемлемой стоимости ее жизненного цикла (т.е. сам процесс ИЛП) должна контролироваться и регулироваться[9]. Мониторинг эксплуатации изделий осуществляется, как правило с помощью систем мониторинга, являющихся хорошим помощником для технического обслуживания изделия с

учетом его состояния. Такие системы позволяют повысить уровень безопасности при эксплуатации и увеличить интервалы проведения технического обслуживания. Все это понижает эксплуатационные расходы. Мониторинг эксплуатации изделия должен выступать основной технологией контроля и регулирования на этапе эксплуатации и одновременно выступать связующим звеном между участниками системы управления полным жизненным циклом. Данная технология должна быть закреплена законодательно и являться обязательной частью контракта жизненного цикла (КЖЦ) изделия. В качестве успешных примеров можно привести контракты ЖЦ, применяемые в народном хозяйстве, в частности контракты РЖД (эксплуатация скоростных поездов «Сапсан»), метрополитен (эксплуатация нового подвижного состава), контракты на строительство и эксплуатацию платных автодорог и др.

Контракт ЖЦ - контракт, по условиям которого головной исполнитель обязуется провести конструкторские работы, согласовать их результаты с государственными заказчиками, осуществлять производство и последующую поставку предмета контракта (разработанного ВВСТ), производить техническое обслуживание образца в ходе эксплуатации и обеспечить его утилизацию по окончании ЖЦ (данное определение приводится в некоторых методических материалах организаций Министерства обороны). Иногда подобные контракты называют контрактами полного ЖЦ (КПЖЦ). Примеры применения КПЖЦ на практике авторам неизвестны. Реальное же распространение в настоящее время получает такой вид контракта, как сервисный контракт.

Сервисный контракт - контракт, по условиям которого предприятие или организация ОПК (чаще всего – производитель) обязуется осуществлять техническое обслуживание ВВСТ и (опционально) обеспечить его утилизацию по окончании жизненного цикла ВВСТ. Таким образом, сервисный контракт – это разновидность контрактов ЖЦ, заключается в отношении уже существующих образцов ВВСТ и направлен на обеспечение их долгосрочного сервисного обслуживания. Условия контракта могут предусматривать также работы по продлению ресурса, капитальный ремонт или модернизацию ВВСТ [2, 6, 11, 12, 13].

Государственное регулирование по данному вопросу предусматривает Федеральный закон от 5 апреля 2013 г. № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд», согласно части 16 статьи 34 Федерального закона № 44-ФЗ, в случаях, установленных Правительством Российской Федерации, заключается контракт, предусматривающий закупку товара или работы (в том числе при необходимости проектирование, конструирование объекта, который должен быть создан в результате выполнения работы), последующие обслуживание, ремонт и при необходимости эксплуатацию и (или) утилизацию поставленного товара или созданного в результате выполнения работы объекта (контракт жизненного цикла, аббревиатура КЦЖ).

Таким образом, при выполнении государственного или частного заказа изготовитель (промышленное предприятие) и покупатель (эксплуатант) выступают как постоянные партнеры. Период их взаимодействия равен периоду существования изделия (объекта): от изготовле-

ния до утилизации, включая сопровождение изделия до места эксплуатации, в ремонте и при сервисном обслуживании вплоть до утилизации. То есть контракт жизненного цикла предполагает диалог науки (разработчик), изготовителя (промышленности) и покупателя (эксплуатанта) в лице частного или государственного заказчика (например, Министерства обороны).

Необходимо решить задачу перевода взаимодействия изготовителя и покупателя при создании и эксплуатации изделия на качественно новый уровень. Предприятия, особенно, входящие в оборонно-промышленный комплекс (ОПК) страны получают долгосрочные стабильные заказы на свою продукцию на условиях, приемлемых для качественного и своевременного выполнения заданий заказчиков, а заказчик – продукцию, соответствующую выставленным требованиям и современным направлениям развития техники.

Контракты жизненного цикла могут стать достаточно эффективным для всех сторон путем развития промышленности, особенно промышленности ОПК. Контрактная система жизненного цикла позволит отказаться от установленного разграничения ответственности между заказчиком и поставщиком за постпроизводственные стадии жизненного цикла изделия. КЖЦ станет долговременным и взаимовыгодным соглашением о сервисной поддержке. Предметом данного соглашения станут надежность, как состояние технической готовности (исправности/безотказности) и экономичность в эксплуатации, а не как было ранее конкретные запасные части, материалы или услуги. Это позволит нормировать конечный результат сервисной поддержки.

Согласно [1], коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

Как правило, при вычислении данного показателя не учитываются простои, связанные с ожиданием необходимых запчастей, длительность которых может быть сравнима со временем самого ТО. Для устранения этого недостатка в отечественной учебной литературе [14] дополнительно вводятся следующие коэффициенты:

- коэффициент готовности изделия при бесконечной системе ЗИП ($K_{z\infty}$) - определение этого показателя совпадает с определением коэффициента готовности (далее используется термин «Кг при бесконечном объеме запасов»);

- коэффициент готовности системы ЗИП ($K_{zЗИП}$) – отражает долю времени, в течение которого система ЗИП находится в работоспособном состоянии, то есть все заявки на запасные части удовлетворяются, т.е. данный коэффициент позволяет оценить долю простоев изделия в ожидании запасных частей (далее вместо термина «система ЗИП» используется термин «система материально-технического снабжения (МТО)»).

В современных нормативных документах также введен показатель «коэффициент эксплуатационной готовности», который наилучшим образом характеризует уровень готовности комплекса «воздушное судно (ВС) – система технической эксплуатации» и учитывает все виды простоев: связанные как с выполнением планового и непланового ТО, так и с ожиданием необходимых

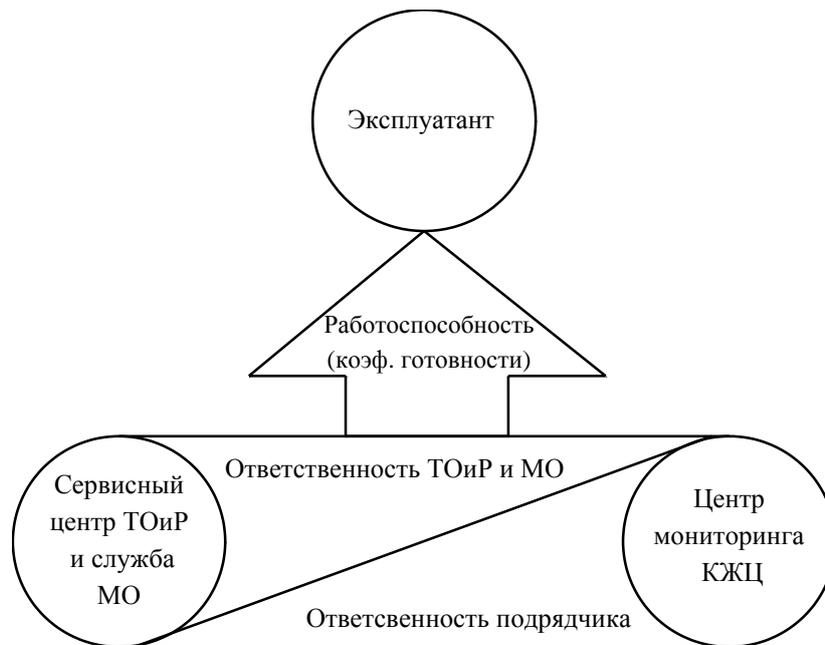


Рис. 1. Долевое участие: Концепция КЖЦ

запчастей. Приближенную формулу для расчета коэффициента эксплуатационной готовности можно представить, как произведение трех показателей:

$$K_{ЭГ} = K_{ПП} \cdot K_{z\infty} \cdot K_{zМТО},$$

где $K_{ПП}$ - коэффициент планируемого применения (отражает долю времени, в течение которого изделие не должно находиться на плановом ТО); $K_{z\infty}$ - коэффициент готовности изделия при бесконечной системе МТО (бесконечном объеме запасов); $K_{zМТО}$ - коэффициент готовности системы МТО.

Для обобщенной оценки эффективности пары «изделие- система технической эксплуатации» может быть использован коэффициент эксплуатационно-экономической эффективности.

Эксплуатационно-экономическая эффективность – мера совершенства конструкции комплекса (образца) и системы его технической эксплуатации, отражающая взаимовлияние характеристик готовности и стоимости владения[3].

Приближенную формулу для расчета $K_{ЭЭЭ}$ можно представить в следующем виде:

$$K_{ЭЭЭ} \approx \frac{K_{ЭГ}}{Z_{ЭГ}} \approx \frac{K_{ПП} \cdot K_{z\infty} \cdot K_{zМТО}}{Z_{общ.}},$$

где $K_{ЭГ}$ - коэффициент эксплуатационной готовности изделия; $Z_{ЭГ}$ - затраты на поддержание экономической готовности изделия; $K_{ПП}$ - коэффициент планируемого применения (отражает долю времени, в течение которого изделие не должно находиться на плановом ТО); $K_{z\infty}$ - коэффициент готовности изделия при бесконечной системе МТО (бесконечном объеме запасов); $K_{zМТО}$ - коэффициент готовности системы МТО; $Z_{общ.}$ - общие

затраты на обеспечение заданного $K_{ЭГ}$.

Составляющими частями общих затрат являются затраты на обеспечение заданных $K_{ПП}$, $K_{z\infty}$ и $K_{zМТО}$.

Таким образом, $K_{ЭЭЭ}$ – это отношение коэффициента эксплуатационной готовности к величине затрат на обеспечение технической эксплуатации [3, 6, 11, 12, 13].

Для контроля выполнения и соблюдения условий КЖЦ предлагаем создать Центр мониторинга КЖЦ, его роль заключается в том, что закупка и последующая поддержка изделия в период эксплуатации будут интегрированы в единый процесс, подконтрольный руководителю данного центра внутри определенного ведомства заказчика (например, оборонного ведомства), с предоставлением ему адекватных прав и полномочий на установление партнерских отношений с промышленностью.

У поставщика приобретаются не конкретные запасные части и/или услуги, а нормируемые показатели конечного результата: уровень надежности; исправности систем изделия, уровень эксплуатационной материальной части, состояние технической готовности, а кроме того, возможность оплаты заказчиком полной стоимости системы изделия.

Если ранее эксплуатант был обязан сам определять потребности в запасных частях и материалах для поддержания заданного уровня готовности изделия, отслеживать материальные запасы, производить необходимые закупки и выполнять техническое обслуживание, то теперь все или часть этих обязанностей делегируются центру мониторинга КЖЦ, как подрядчику (рис.1). Следовательно, размер вознаграждения напрямую зависит от фактически достигнутых результатов, оплата услуг промышленности приобретает регулярный характер, вынуждая промышленность минимизировать риски, так как от этого зависит её финансирование.

Таким образом, партнерство между заказчиком и Центром мониторинга КЖЦ носит долговременный характер, при котором изготовитель изделия обязуется поддерживать эксплуатацию проданной заказчику техники в течение длительного периода вплоть до списания или утилизации. Благодаря этому происходит стимулирование промышленности и реальная возможность инвестировать денежные средства в совершенствование эксплуатационных характеристик изделий. Заказчик, в свою очередь, избавился от множества проблем в планировании и исполнении бюджета.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. **Елизаров, П.М.** Контракты жизненного цикла для народнохозяйственной продукции и вооружения, военной и специальной техники: сходство и отличия. Электронный журнал «Технологии PLM и ИЛП». – http://cals.ru/sites/default/files/downloads/emagazine/Emag_5_contracts_ZC_GP_and_BBT.pdf
3. **Карасев, В.О.** Модель и методика оптимизации объема оборотного фонда запасных частей, обеспечивающего заданные показатели готовности парка воздушных судов // Электронный журнал «Технологии PLM и ИЛП». – http://cals.ru/sites/default/files/downloads/emagazine/emag_5_model_i_metodika_optimizacii_obema_oborotnogo_fonda_zapasnyh_chastey.pdf
4. **Кузнецова, В.Б.** Методика внедрения электронного документооборота при производстве сложной авиационной техники / Кузнецова В.Б., Сергеев А.И. // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014 – № 74. – <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49379>.
5. **Кузнецова, В.Б.** Особенности применения информационных технологий в управлении персоналом машиностроительных предприятий / Кузнецова В.Б. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 8. – С. 29-32.
6. **Кузнецова, В.Б.** Теоретическое обоснование обеспечения технико-экономической готовности изделий сложной авиационной техники / Кузнецова В.Б. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 14. – С. 32-36.
7. **Кондусов, Д.В.** Технология безбумажного выпуска документов материально-технического обеспечения машиностроительного предприятия / Кондусов Д.В., Кузнецова В.Б., Сердюк А.И., Сергеев А.И. / Автоматизированные технологии и производства. – 2015. – № 1 (7). – С. 50-54.
8. **Левин, А.И.** Концепция и технологии компьютерного сопровождения процессов жизненного цикла изделий / Е.В. Судов, А.И. Левин // Информационные технологии в наукоёмком машиностроении, «Техника». Киев. : 2001. С. 612-625.
9. **Елизаров, П. М.** Послепродажное обслуживание экспортируемой продукции военного назначения: проблемы, технологии их решения и перспективы развития / П. М. Елизаров, Е. В. Судов, А. Н. Бриндинов, Н. И. Незаленов, А.В. Карташев // Альманах «Россия: союз технологий», Специальный выпуск «Каталогизация продукции – новый этап развития». – М.: НО «Ассоциация «Лига содействия оборонным предприятиям», 2012. – С. 20-36.
10. **Сердюк, А. И.** Совершенствование процесса изготовления сложных изделий с использованием PDM-систем на ОАО «ПО «Стрела» / А. И. Сердюк, В. Б. Кузнецова, А. И. Сергеев, А. В. Попов // Научно-технический журнал «Информационные технологии» – 2013. – № 4 (152). – С. 54-61.
11. **Судов, Е.В.** Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. / Е.В. Судов // М. : ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – 264 с.
12. **Судов, Е.В.** Анализ логистической поддержки: теория и практика / Е.В. Судов, А.И. Левин, А.Н. Петров, А.В. Петров, Д.Н. Борозин – М.: ООО Издательство «Инфом-бюро», 2014. – 260 с.
13. **Судов, Е. В.** Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / Е. В. Судов, А. И. Левин. - М. : НИЦ CALS- технологий «Прикладная логистика», 2002. – 131 с.
14. **Черкесов, Г.Н.** Оценка надежности систем с учетом ЗИП. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 480с.

ТРЕХМЕРНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Т.В. Усатая¹, Ю. Усатый², Е.А. Свистунова³

^{1,2,3}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия.

3D COMPUTER SIMULATION IN ENGINEERING

T.V Usataya¹, D.U Usatiy², E.A. Svistunova³,

^{1,2,3}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²Usatiydu@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы технологий трехмерного моделирования в рамках инновационной площадки «Инженерного творчества и конструирования» ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» с целью освоения дисциплин проектно-технологического школьной программы и подготовки учащихся к получению высшего технического образования, развитие интереса, мотивации школьников к познавательной деятельности, к творческой проектной и проектно-технологической деятельности.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, проектно-технологическая деятельность, информационные технологии, технологическое и техническое образование.

Abstract. The article deals with the three-dimensional modeling technology as part of an innovative platform of "Engineering and design creativity" VPO "MSTU. GI Nosov" with the aim of mastering the disciplines of design and technology curriculum and prepare students for higher technical education, the development of interest, motivating students to cognitive activity, to creative design and design-technological activity.

Keywords: three-dimensional modeling, design and technological activities, information technology, technological and technical education.

Введение

Важнейшей отличительной особенностью стандартов нового поколения является их ориентация на результаты образования, причем они рассматриваются на основе системно - деятельностного подхода и личностно-ориентированного подхода. Целью создания курса 3D моделирования в рамках инновационной площадки «Инженерного творчества и конструирования» ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» является агитация к получению высшего технического образования, развитие интереса школьников к познавательной деятельности. Все это должно развивать у детей мотивацию к изучению школьных предметов технической направленности: физики, математики, черчения, информатики, технологии. В связи с возрастающей сложностью объектов проектирования, требованиями к качеству (фотореалистичному) моделей проектов, сокращением сроков проектирования, эффективностью процесса проектирования в целом, трехмерное моделирование сегодня выступает самой актуальной альтернативой всем другим видам моделей, которые могут дополнять и являться основой для трехмерного моделирования (описание, чертежи, дорогостоящие материальные макеты) в современном архитектурно-дизайнерском проектировании и в обучении.

Трехмерная графика – это возможность проектирования виртуально пространства в трех измерениях. Одна из задач трехмерной графики – как можно реалистичней

передать виртуальную действительность [3]. Компьютерный дизайн открыл новые перспективы при моделировании объектов, поскольку любая модель может быть создана в виртуальном 3-D пространстве и наглядно визуализирована с фотореалистичной достоверностью и воспроизведением материалов, структур, света и тени [4].

Основная часть

Как отмечают исследователи, стремительное развитие информационных технологий, появление новых технических средств, программного обеспечения требуют соответствующей подготовки от выпускников вузов, умеющих использовать в своей профессиональной деятельности возможности информационных технологий и программного обеспечения [7]. Мы считаем, что такую подготовку необходимо начинать еще в школе, в рамках сетевого взаимодействия между школами и вузами, что позволит обеспечить непрерывность и преемственность подготовки будущих специалистов. В соответствии с Приказом Министерства образования и науки Челябинской области от 29.09.2014 N 01/2887 "О концепция развития естественно-математического и технологического образования в Челябинской области «ТЕМП» и в соответствии с требованиями ФГОС основного общего образования [11] в рамках инновационной площадки нами была разработана программа «3Д-моделирование» для школьников города.

Программа «3D-моделирование» позволяет создать мотивационные условия для вовлечения субъектов образовательных отношений в развитие естественно-математического, технологического и технического образования путем формирования культуры комплексного применения обучающимися знаний в области естественно-математического, технологического и технического образования; организации сетевого взаимодействия (между ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова и школами, управлением образования г. Магнитогорска) в реализации образовательных программ естественно-математической, технологической и технической направленностей; создании условий для повышения квалификации и профессионального мастерства педагогов и руководителей, привлечение молодых специалистов в сферу образования; популяризации технологического и естественно-математического образования, (совместно с такими промышленными предприятиями как НПО «Андроидная техника», крупнейшего российского разработчика инженерного программного обеспечения и интегратор в сфере автоматизации проектной и производственной деятельности компании АСКОН и ряда других предприятий); расширения спектра и форм развития способностей школьников.

Цель данного курса это - развитие пространственных представлений и формирование общенаучных понятий в процессе моделирования; интеграция 3D-моделирования в другие виды учебной деятельности (проектную, исследовательскую); возможность создания моделей с обратной связью; организация коллективной формы работы, содействие развитию навыков коллективного труда - умение распределять обязанности, планировать свои действия в соответствии с общим замыслом, добиваться коллективного результата, делать выводы, работать над общим проектом; развитие словарного запаса и навыков общения при выполнении и защите работы; развитие и поддержание интереса к школьным предметам (физика, математика, черчение, информатика, технология).

Среди основных задач данного курса можно выделить: ознакомление учащихся с методом научного познания; приобретение учащимися знаний о технике, технологии, информатике, физике в условиях современного производства; овладение решением задач геометрического моделирования и применения интерактивных графических систем для выполнения и редактирования изображений, чертежей трехмерных моделей реального физического мира и управление ими; ежедневное включение в познавательные процессы современных технических средств (устройств и программ) для достижения понимания принципа работы того или иного продукта, что является ключевым условием изучения новой технологии, применение полученных знаний на практике; ознакомление с основами работы с программой Компас-3D, Autodesk 3ds MAX формирование практических навыков работы с командами программы и знакомство со спецификой твердотельного моделирования в среде программы Компас-3D; развитие умения работать по предложенным инструкциям; развитие умения творчески подходить к решению задачи; развитие умения довести решение задачи до работающей модели;

развитие пространственного представления и конструктивного мышления при разработке индивидуальных или совместных проектов; развитие умения излагать мысли в четкой логической последовательности; отстаивать свою точку зрения, анализировать ситуацию и самостоятельно находить ответы на вопросы путем логических рассуждений.

Основные формы обучения - теоретические занятия, интерактивные практические занятия по созданию, сборке трехмерных моделей сборочных узлов различного назначения (головоломки, простые механические узлы, модели реального мира).

Главным средством курса является твердотельное моделирование в системе Компас-3D [1]. Твердотельное моделирование в системе Компас-м является современным и доступным для детей средством организации творческих способностей учащихся через формирование исследовательских навыков в ходе проектной деятельности, который отдается приоритет в условиях реализации ФГОС второго поколения.

Моделирование осуществлялось также и в программе Autodesk 3dsMAX, являющейся одной из наиболее известных полнофункциональных профессиональных программных систем для создания и редактирования трехмерных моделей и анимации (рис. 2, 3). Данный графический пакет обрёл широкую известность благодаря широкому спектру разнообразных инструментов моделирования, визуализации и видеомонтажа [5].

Основным методом моделирования трехмерных объектов является моделирование на основе набора стандартных примитивов, которые, как правило, служат для создания объектов более сложной формы. Различные методы моделирования могут сочетаться друг с другом.

Следует также отметить, многие исследователи рассматривают процесс трехмерного объектов в рамках проектного и проектно-процессного подхода [8], и отмечают, что он включает в себя следующие взаимосвязанные процессы: создание 3D модели → текстурирование объектов → освещение и установка камер → визуализация объектов [5]. Процессу создания трехмерной модели объекта в большинстве случаев предшествует двухмерное моделирование – это разработка плана, чертежа (двухмерного), который выполняется на основе проведенного анализа проектной ситуации, композиционно-пластического моделирования (эскизирования).

Процесс создания трехмерной модели объекта включает в себя следующее: создание 3D объекта, путем применения различных операций, позволяющих смоделировать сложные формы (стандартные примитивы, полигональное моделирование, сплайновое моделирование с применением специальных модификаторов, лофтинговое моделирование). Процесс текстурирования объектов, предполагает следующее: анализ объекта и выбор соответствующих текстур, материалов или их создание, а затем их размещение в трехмерной сцене для каждого объекта. Следующий этап – это освещение сцены и установка камер, источники освещения настраиваются определенным образом с соответствующими характеристиками, как для интерьера, так и для экстерьера.

Процесс визуализации объектов, как правило, состоит из следующих этапов: подготовка сцены к визуализации

зации и задание соответствующих настроек. При визуализации большое значение имеет качество выпуска конечной продукции – изображения или анимационного ролика, для чего в Autodesk 3ds Max имеется несколько модулей визуализации, способных создавать как упрощенное изображение для пробной визуализации, так и осуществлять сложные расчёты с учётом отражённого света, воздушной среды и последующей обработки изображения, позволяющей имитировать живописные или графические традиционные художественные техники [5]. На основе 3D модели можно создать анимационный ролик, который дает возможность оценить все параметры предмета проектирования – с учетом, например, ландшафта, материалов, освещения, времени суток. В программе Компас-3D не предусмотрен процесс визуализации, но, тем не менее, можно подготовить изображение в одном из известных форматов растровой графики для просмотра на различных устройствах (рис. 1, 2,3).

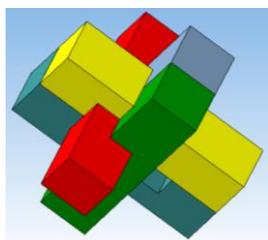


Рис. 1. Трехмерная модель головоломки, выполненная в программе Компас 3D

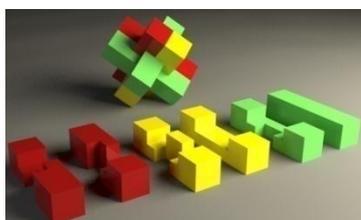


Рис. 2. Трехмерная модель головоломки, выполненная в программе Autodesk 3ds Max, итоговая визуализация



Рис. 3. Трехмерная модель объекта, выполненная в программе Autodesk 3ds Max, итоговая визуализация

Цель курса "3D-моделирование" - это заинтересовать (привлечь) современного школьника заниматься познавательной деятельностью. Изучение специализированных программ трехмерного моделирования (Autodesk AutoCAD, Autodesk Inventor, Autodesk 3ds Max, Компас-3D) обеспечивает развитие пространственного представления и возможность сопоставления реального мира и чертежа [3].

Необходимость в компьютерном моделировании объектов реального мира возникает сегодня в любых областях человеческой деятельности. Основное назначение трехмерного моделирования, это визуализация проектных решений. Для работы с трехмерными объектами необходимо знать геометрию, стереометрию, математику, физику, оптику, информатику [10]. Все это должно развивать у детей интерес к изучению школьных предметов технической направленности: физики, математики, геометрии, черчения, информатики, технологии. Данный курс предусматривает наглядную демонстрацию процесса создания технического узла, реального работающего простого механизма из жизни (машина [2], трехмерная головоломка и т. д.). Для этого сначала нужно провести моделирование и в процессе обучения получить реальную деталь. Все это в комплексе покажет действительную связь школьных дисциплин с жизнью, наукой и производством. Одна из особенностей курса «3D-моделирования» - наглядность и достижимость результатов обучения, что должны быть видны детям и их родителям практически сразу. И здесь перспективным является вариант, при котором ресурсы университета, а это современные технологии 3D печати и станки с ЧПУ, приумножат возможности школ. Такой подход позволит детям демонстрировать результаты своей учебы и, тем самым, заинтересовать своих сверстников, то есть популяризировать технологическое образование.

Учащиеся получают возможность увидеть, что сложные механизмы на производстве, состоят из простых, но разных деталей. Это позволит поднять на новый уровень занятия: в имеющихся в МГТУ инженерных лабораториях школьники фактически могут реализовать полный жизненный цикл изготовления изделия, как это происходит на любом современном предприятии - учащимся, согласно программе курса, доступен весь процесс: от идеи, разработки концепции, создания 3D-модели и расчетов до виртуального тестирования, а затем и до изготовления опытного образца на станках, тестирования и доработки. При этом физика, математика, черчение и другие школьные предметы изучаются на практике. Осваивается командная и проектная работа. Это сформирует у обучающихся устойчивое и системное представление о возможностях технологического образования и даст положительную динамику числа конкурсов, олимпиад, форумов политехнической направленности [9]. В процессе работы учащиеся приобретают способность концентрироваться на практических задачах, усваивают принцип работы простых механизмов. Успешно решенные задачи стимулируют учащихся применять и проверять полученные в процессе обучения знания в других областях.

Собирая конструкции и модели, учащиеся постепенно знакомятся с различными видами механизмов, движения, узнают, как работают обычные механизмы и устройства в повседневной жизни.

Рабочая программа курса «3D-моделирование» основана на личностно-ориентированном подходе к каждому обучающемуся. Для достижения цели программы курса используются средства и формы, которые способствуют наиболее полному и глубокому пониманию школьных предметов, которые способствуют реализации возможностей каждого обучающегося в раскрытии физической картины познания мира.

Курс «3Д-моделирование» позволит получить следующие результаты [9]:

Личностные результаты – это сформировавшаяся в образовательном процессе система ценностных отношений учащихся к себе, другим участникам образовательного процесса, самому образовательному процессу, объектам познания, результатам образовательной деятельности. Основными личностными результатами, формируемыми при изучении данного курса, являются: готовность к повышению своего образовательного уровня и продолжению обучения; способность и готовность к общению и сотрудничеству со сверстниками и взрослыми в процессе образовательной, общественно-полезной, учебно-исследовательской, творческой деятельности.

Готовность и способность к самостоятельному обучению на основе учебно-познавательной мотивации, в том числе готовности к выбору направления профильного образования с учётом устойчивых познавательных интересов.

Метапредметные результаты – освоенные обучающимися на базе внеурочных занятий способы деятельности, применимые как в рамках образовательного процесса, так и в других жизненных ситуациях. Основными метапредметными результатами являются: владение умениями самостоятельно планировать пути достижения целей; соотносить свои действия с планируемыми результатами, осуществлять контроль своей деятельности, определять способы действий в рамках предложенных условий, корректировать свои действия в соответствии с изменяющейся ситуацией; оценивать правильность выполнения учебной задачи; владение основами самоконтроля, самооценки, принятия решений и осуществления осознанного выбора в учебной и познавательной деятельности; владение основными универсальными умениями: постановка и формулирование проблемы; поиск и выделение необходимой информации, применение методов информационного поиска; структурирование и визуализация информации; выбор наиболее эффективных способов решения задач в зависимости от конкретных условий; самостоятельное создание алгоритмов деятельности при решении проблем творческого и поискового характера.

Предметные результаты включают в себя: освоенные обучающимися в ходе изучения данного курса умения специфические для данной предметной области, виды деятельности по получению нового знания в рамках данного курса, его преобразованию и применению в учебных, учебно-проектных и социально-проектных ситуациях, формирование научного типа мышления, научных представлений о ключевых теориях, типах и видах отношений, владение научной терминологией, ключевыми понятиями, методами и приемами.

В соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом общего образования основные предметные результаты отражают: формирование физической картины мира; формирование умений применения теоретических знаний на практике, умения выбирать способ решения поставленной задачи [9].

Заключение

Таким образом, компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данного курса – это способность и готовность использовать технологии

трехмерного моделирования, в том числе современные средства компьютерной графики (Компас-3D, Autodesk 3ds Max), в своей предметной области. Технологии трехмерного моделирования, изучение которых предусмотрено разработанной нами программой курса «3Д-моделирование», помогают учащимся в освоении дисциплин проектно-технологического школьной программы и в подготовке к получению высшего технического образования, способствуют развитию мотивации школьников к познавательной деятельности, к творческой проектной и проектно-технологической профессиональной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Азбука КОМПАС-3Д, V15.** – М.: ЗАО АСКОН, 2014 г.
2. **Кадошников, В.И.** Система организации проектирования технологических комплексов / В.И. Кадошников М.В. Аксенова, А.А. Старушко, А.К. Белан. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова, 2012. - 148 с.
3. **Решетникова, Е.С.** Компьютерная графика в дизайне и проектировании / Е.С. Решетникова, Т.В. Усая, Д.Ю. Усатый // Архитектура. Строительство. Образование. - 2015. – №2(6). – С. 194 - 202.
4. **Компьютерное моделирование и виртуальная реальность** // Открытые системы. URL: <http://www.osp.ru/ap/1998/02/13031671/> (Дата обращения 10.06.2014).
5. **Григорьев, А.Д.** Проектирование и анимация в 3 ds Max учебник /А.Д. Григорьев, Т.В. Усая, Э.П. Чернышова Магнитогорск : МГТУ, 2015. – 476 с.
6. **Проектирование и моделирование промышленных изделий** : учеб. для вузов / С.А. Васин, А.Ю. Талашук, В. Г. Бандорин, А.Ю. Грабовенко, Л.А. Морозова, В.А. Редько ; под ред. С.А. Васина, А.Ю. Талашука. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 692 с.
7. **Савочкина, Л.В.** Моделирование учебного процесса на основе применения технических средств / Л.В. Савочкина // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова - №1, 2006. – С. 25-27.
8. **Савочкина, Л.В.** Формирование готовности студентов университета к графической деятельности на основе проектно-процессного подхода: автореф. дис. ... канд. пед. наук / Л.В. Савочкина. – Магнитогорск: 2010. – 24 с.
9. **Усатый, Д.Ю.** 3Д-Моделирование. Программа элективного курса для школьников. 10 класс / Д.Ю. Усатый, Т.В. Усая. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова, 2015 г. – 23 с.
10. **Усая, Т.В.** Технологии САПР для оптимизации процесса обучения компьютерной графике в техническом университете / Т.В. Усая, Е.С. Решетникова // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Вып. 3. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – С. 133-138.
11. **Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования** // М-во образования и науки Рос. Федерации. - М.: Просвещение, 2014.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДООБУЧЕНИЯ КЛАССИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В.Д. Дмитриенко¹, А.Ю. Заковоротный²

^{1,2} Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
г. Харьков, Украина

SOLVING THE PROBLEM OF ADDITIONAL TRAINING OF CLASSICAL NEURAL NETWORKS

V.D. Dmitrienko¹, A.Y. Zakovorotnyi²

^{1,2} National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukrainian

² arcade@i.ua

Аннотация. Разработаны архитектуры и алгоритмы функционирования дискретных стабильно-пластичных нейронных сетей Хемминга и Хебба, которые не только могут дообучаться в процессе функционирования, но и распознавать новую информацию. Новые сети могут стать альтернативой дискретным нейронным сетям адаптивной резонансной теории. Проведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов функционирования искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: стабильно-пластичные нейронные сети, нейронная сеть Хемминга, нейронная сеть Хебба, адаптивная резонансная теория.

Abstract. Developed architecture and algorithms of discrete stable and plastic neural networks Hamming and Hebb, which not only can be trained during functioning, but also to recognize the new information. New networks can be an alternative to discrete neural network adaptive resonance theory. Conducted experimental investigations developed algorithms functioning of artificial neural networks.

Keywords: stable and plastic neural networks, Hamming neural network, Hebb neural network, adaptive resonance theory.

Обзор литературы

Проблема стабильности-пластичности является одной из самых сложных и трудно решаемых. Характер восприятия получаемой информации постоянно связан с решением дилеммы, является ли некоторый образ "новой" информацией, и, следовательно, реакция на него должна быть поисково-познавательной, с сохранением этого образа в памяти, либо этот образ является вариантом "старой", уже запомненной информации, и в этом случае реакция должна соответствовать ранее накопленному опыту. Специальное запоминание этого образа в последнем случае не требуется. Таким образом, такое восприятие одновременно пластично, адаптировано к новой информации, и при этом оно стабильно, то есть не разрушает память о старых образах [1–7].

Не все нейронные сети приспособлены к решению этой задачи. Так, например, многослойный перцептрон, обучающийся по методу обратного распространения, запоминает весь пакет обучающей информации, при этом образы обучающей выборки предъявляются в процессе обучения многократно. Попытки затем обучить перцептрон новому образу приведут к модификации синаптических связей с неконтролируемым разрушением памяти о предыдущих образах. Следовательно, перцептрон не способен к запоминанию дополнительной информации, ему необходимо полное переобучение сети.

Аналогичная ситуация имеет место в сетях Хебба и сети Кохонена, обучающихся на основе самоорганизации. Сети Хебба, Кохонена, Хемминга и др. всегда выдают положительный результат при классификации. Тем

самым, эти нейронные сети не в состоянии отделить новые образы (изображения) от искаженных или зашумленных версий старых образов.

Исследования по проблеме стабильности-пластичности привели к созданию нового научного направления – адаптивной резонансной теории и НС на ее основе.

Принцип работы сетей АРТ заключается в следующем: нейронной сетью производится сопоставление входных изображений с изображениями известных классов, которые получены на этапе обучения сети и хранятся в ее весах связей. Этап сопоставления входных изображений с известными классами изображений осуществляется с определенной точностью, задаваемой специальным параметром сходства. Если параметр сходства входного изображения с одним из известных прототипов изображений превышает заданный порог, то в режиме обучения прототип данного класса модифицируется, чтобы стать более похожим на предъявленное изображение, а входное изображение относится к данному классу изображений. В свою очередь, если параметр сходства входного изображения не достигает заданного порога при анализе всех запомненных классов изображений, то на основе входного изображения создается новый класс изображений, что становится возможным благодаря избыточным (нераспределенным) нейронам, входящим в структуру нейронной сети. Таким образом, новые образы могут создавать новые классы, без искажения запомненной ранее информации [8–14].

Указанное достоинство сетей АРТ достигается за

счет введения в архитектуру нейронных сетей избыточных нейронов, которые используются только для дообучения сети. Введение избыточных нейронов может позволить решить проблему дообучения или проблему стабильности-пластичности и других нейронных сетей. Поэтому в данной работе разработаны архитектуры и алгоритмы функционирования дискретных стабильно-пластичных нейронных сетей Хемминга и Хебба, которые не только могут дообучаться, но и распознавать новую информацию. Новые сети могут стать альтернативой дискретным нейронным сетям адаптивной резонансной теории.

Основной раздел

Стабильность дискретных нейронных сетей АРТ-1 [10] обеспечивается наличием дополнительных нейронов, на которые и записывается новая информация. При этом каждый распознающий нейрон хранит или будет хранить информацию в весах своих связей только об одном изображении. Подобный слой нейронов имеет и сеть Хемминга (рис. 1), где каждый Z_p ($p = 1, \dots, m$) нейрон в весах своих связей хранит одно изображение, являющееся представителем своего класса.

Сеть Хемминга имеет n входных нейронов S_1, \dots, S_n , воспринимающих бинарные компоненты входных изображений $S^q = (S_1^q, \dots, S_n^q)$, $q = 1, \dots, L$. Входные и выходные сигналы S -элементов при входном изображении S^q определяются соотношениями:

$$U_{\text{вх } S_i} = S_i^q, \quad U_{\text{вых } S_i} = U_{\text{вх } S_i}, \quad i = 1, \dots, n.$$

При предъявлении входного изображения S^q каждый Z -нейрон рассчитывает свой входной сигнал в соответствии с выражением вида (1):

$$U_{\text{вх } Z_p} = \frac{n}{2} + \sum_{i=1}^n W_{ip} S_i^q, \quad p = 1, \dots, m. \quad (1)$$

Функция активации Z -нейронов описывается соотношением:

$$g_Z(U_{\text{вх}}) = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{\text{вх}} \leq 0, \\ k_1 U_{\text{вх}}, & \text{если } 0 < k_1 U_{\text{вх}} \leq U_{\text{max}}, \\ U_{\text{max}}, & \text{если } k_1 U_{\text{вх}} > U_{\text{max}}. \end{cases} \quad (2)$$

С помощью функции активации (2) определяются выходные сигналы нейронов Z -слоя:

$$U_{\text{вых } Z_1}, \dots, U_{\text{вых } Z_m},$$

которые являются входными сигналами нейронов A_p ($p = 1, \dots, m$).

Функция активации нейронов A_p ($p = 1, \dots, m$) и веса их связей задаются соотношениями:

$$g_A(U_{\text{вх}}) = \begin{cases} U_{\text{вх}}, & \text{если } U_{\text{вх}} > 0, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}} \leq 0, \end{cases}$$

$$W_{ij}^A = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j, \\ -\varepsilon, & \text{если } i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, m. \end{cases}$$

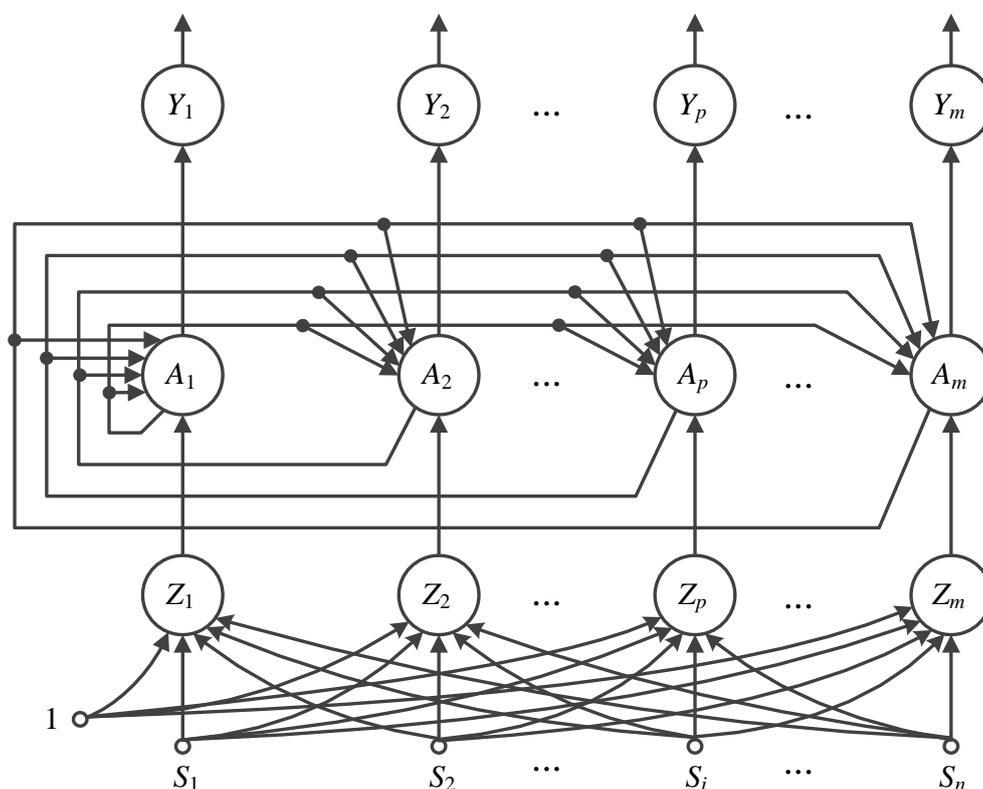


Рис. 1. Нейронная сеть Хемминга

Слой A -нейронов функционирует циклически, динамика элементов описывается итерационным выражением:

$$U_{\text{вх } A_p}(t+1) = q_A(U_{\text{вых } A_p}(t) - \varepsilon \sum_{j=1, j \neq p}^m U_{\text{вых } A_j}(t)),$$

$$p = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, 2, \dots,$$

при начальных условиях:

$$U_{\text{вх } A_p}(0) = U_{\text{вых } Z_p}, \quad p = 1, \dots, m.$$

Если среди входных сигналов нейронов A_1, \dots, A_m окажется один наибольший сигнал $U_{\text{вых } A_p}$, то в результате итерационного процесса только один A -нейрон останется с выходным сигналом, большим нуля.

Поскольку выходные сигналы A -элементов поступают на входы Y -нейронов, которые имеют функцию активации вида:

$$g_Y(U_{\text{вх}}) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх}} > 0, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх}} \leq 0, \end{cases}$$

то в результате на выходе сети Хемминга только один нейрон Y_p окажется с единичным выходным сигналом.

Единичный выход этого нейрона и нулевые всех остальных и будут указывать на то, что предъявленное изображение S^q наиболее близко, в смысле расстояния Хемминга, к эталонному изображению, хранящемуся в весах связей нейрона Z_p . Если в слой Z -нейронов сети Хемминга ввести дополнительные Z -нейроны (и соответствующие им A - и Y -нейроны), способные запоминать новую информацию (эталонные изображения новых классов), то такая сеть также сможет дообучаться и будет обладать свойствами стабильности и пластичности, то есть свойствами дискретной НС АРТ-1.

Еще одно достоинство нейронных сетей АРТ – возможность выделять новую информацию. Это достигается тем, что входное изображение сравнивается по величине параметра сходства с эталонными изображениями, хранящимися в весах связей распознающих нейронов. Если входное изображение относится к новому классу, то при сравнении с любым эталонным изображением, хранящимся в весах связей распределенных распознающих нейронов, получается параметр сходства меньше минимально допустимого. Поэтому в результате такого сравнения все распределенные распознающие Y -нейроны будут заторможены, что и является признаком того, что входное изображение несет новую информацию, которой нет в памяти нейронной сети АРТ.

В нейронной сети Хемминга сравнение изображений (или биполярных векторов) выполняется по числу компонент, в которых входное и эталонное изображения совпадают: $a = n - R_x$. Поэтому по аналогии с НС АРТ можно задать минимально допустимое значение числа совпадающих компонент a_{\min} , при которых могут сравниваться входное и эталонное изображения, а при $a < a_{\min}$ входное изображение и эталонное несравнимы или, другими словами, входное изображение несет новую

информацию по сравнению с изображением, хранящимся в весах связей нейронной сети. Учесть значение a_{\min} в архитектуре НС несложно – достаточно ввести дополнительное смещение на нейроны Z -слоя (точнее – изменить величину смещения $n/2$). При этом выходные сигналы Z -нейронов будут описываться модифицированным соотношением (1):

$$U_{\text{вых } Z_p} = \frac{n}{2} - a_{\min} + 1 + \sum_{i=1}^n W_{ip} U_{\text{вых } S_i} =$$

$$= a - a_{\min} + 1, \quad p = 1, \dots, q.$$

Из (3) и (2) следует:

$$U_{\text{вых } Z_p} = \begin{cases} 0, & \text{если } a < a_{\min}, \\ 1, & \text{если } a = a_{\min}, \\ k_1 U_{\text{вх } Z_p}, & \text{если } a > a_{\min} \text{ и } 0 < k_1 U_{\text{вх } Z_p} \leq U_{\max}, \\ U_{\max}, & \text{если } a > a_{\min} \text{ и } k_1 U_{\text{вх } Z_p} > U_{\max}. \end{cases}$$

Таким образом, если на выходе всех распределенных Z -нейронов выходные сигналы равны нулю ($U_{\text{вых } Z_p} = 0, p = 1, \dots, q$), то входное изображение по принятому критерию близости изображений не является похожим ни на одно из известных эталонных изображений и несет новую информацию. Для аппаратного определения новизны входного изображения в архитектуру нейронной сети Хемминга достаточно ввести один нейрон Σ , суммирующий выходные сигналы всех нейронов Z -слоя. Если после предъявления входного изображения на выходе нейрона Σ нулевой выходной сигнал, то это означает, что входное изображение по расстоянию Хемминга находится далеко от эталонных изображений, хранящихся в весах связей нейронов Z -слоя, и является представителем нового класса изображений, который можно запомнить нераспространенным нейроном сети Хемминга. Если после предъявления входного изображения выходной сигнал нейрона Σ положителен, то это означает, что входное изображение является представителем известного класса изображений, хранящегося в памяти нейронной сети.

Результаты, полученные по сети Хемминга, могут быть обобщены и на другие нейронные сети. Проиллюстрируем это на примере нейронной сети Хебба. Архитектура этой сети приведена на рис. 2 [10]. Основу архитектуры составляет группа из m бинарных или биполярных нейронов Y_1, \dots, Y_m . Сеть может запоминать до 2^m черно-белых изображений. Однако, применение этой сети для запоминания и распознавания 2^m (или близких к 2^m чисел) различных изображений во многих случаях приводит к неразрешимым проблемам адаптации весов связей нейросети. Поэтому часто рекомендуют использовать данную сеть для запоминания только m различных классов изображений, задавая каждое из них, единичным выходным сигналом на выходе только одного нейрона Y -слоя (выходные сигналы остальных $(m-1)$ элементов должны принимать значение "–1" для биполярных нейронов или "0" для бинарных).

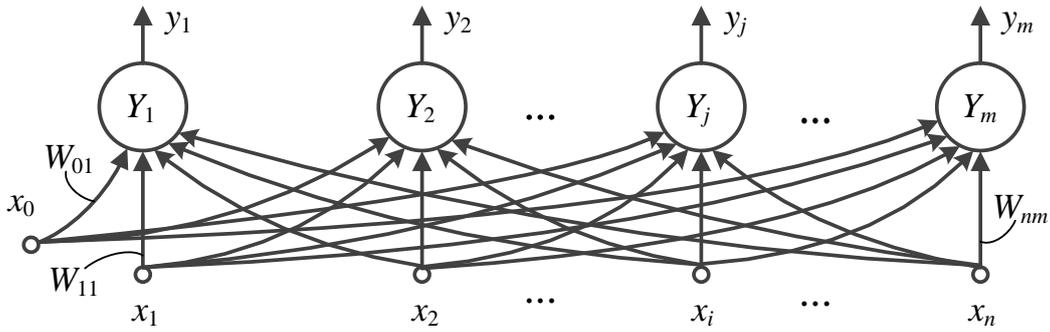


Рис. 2. Нейронная сеть Хебба

Нейронная сеть обучается с помощью алгоритма на основе правила Хебба. Для биполярных нейронов алгоритм обучения имеет следующие основные шаги.

Шаг 1.

Задается множество $M = \{(S^1, t^1), \dots, (S^m, t^m)\}$, состоящее из m пар (входное изображение $S^k = (S_1^k, \dots, S_n^k)$, необходимый вектор выходных сигналов $t^k = (t_1^k, \dots, t_m^k)$, $k = 1, \dots, m$), задаются нулевые выходные сигналы нейронов Y -слоя: $U_{\text{вых}Y_j} = 0$, $j = 1, \dots, m$. Задается предельное число эпох $N_{\text{пр}}$ обучения сети. Иницируются веса связей нейронов: $W_{ij} = 0$, $i = 0, 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, m$.

Шаг 2.

Начинается обучение нейронной сети правильной реакции на каждое входное изображение. Последовательно каждая пара (S^k, t^k) , $k = 1, \dots, m$, проверяется на правильность реакции нейронной сети на входное изображение. Если полученный выходной вектор сети (y_1^k, \dots, y_m^k) отличается от заданного $t^k = (t_1^k, \dots, t_m^k)$, то выполняются шаги 3–5 алгоритма. Если выходной вектор сети совпадает с требуемым, то осуществляется переход к следующей паре. Если выходной вектор совпадает с заданным и проверяемая пара является последней, то переход на шаг 7 алгоритма.

Шаг 3. Иницируется множество входных нейронов:

$$x_0 = 1, \quad x_i = S_i^k, \quad i = 1, \dots, n.$$

Шаг 4. Иницируется множество выходных нейронов сети:

$$U_{\text{вых}Y_j} = t_j^k, \quad j = 1, \dots, m.$$

Шаг 5. Корректируются веса связей нейронов сети по правилу Хебба:

$$W_{ij}(\text{new}) = W_{ij}(\text{old}) + x_i t_j^k,$$

$$i = 0, 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m.$$

Шаг 6.

Если скорректированы веса связей для последней пары (S^m, t^m) , то переход на шаг 7 алгоритма. В противном случае – на шаг 2 алгоритма.

Шаг 7.

Проверяется условие останова, то есть правильность функционирования сети при предъявлении каждого входного изображения. Если сеть функционирует прави-

льно, то переход на шаг 8 алгоритма. Если сеть функционирует неправильно, то проверяется достижение предельного числа эпох обучения сети $N_{\text{пр}}$. Если $N_{\text{пр}}$ не достигнуто, то переход на шаг 2 алгоритма, в противном случае – переход на следующий шаг алгоритма.

Шаг 8. Останов.

Для обеспечения стабильности в нейронных сетях АРТ при запоминании новой информации используются дополнительные нейроны, введение которых и позволяет запоминать новую информацию, и не разрушать уже имеющуюся. Этот же эффект может быть достигнут и в нейронной сети Хебба при введении дополнительных распознающих нейронов.

Когда нейронная сеть Хебба обучается распознаванию множества из n_0 ($n_0 \geq 3$) изображений $M_0 = \{S^1, \dots, S^{n_0}\}$, каждое из которых кодируется на выходах Y -нейронов (Y_1, \dots, Y_{n_0}) одним единичным сигналом и $(n_0 - 1)$ сигналами "–1". Суммарный выходной сигнал нейронов Y_1, \dots, Y_{n_0} , правильно распознающих одно из изображений, относящихся к множеству M_0 , в этом случае равен

$$\sum_{i=1}^{n_0} U_{\text{вых}Y_i} = -(n_0 - 2). \quad (4)$$

Если при предъявлении нейронной сети изображения S^* соотношение (4) не выполняется, то это является признаком появления на входе нейронной сети новой информации (представителя нового класса изображений). При накоплении некоторого множества таких изображений $M_1 = \{S^{n_0+1}, S^{n_0+2}, \dots, S^{n_0+n_1}\}$, где $n_1 \geq 3$, могут быть обучены с помощью алгоритма Хебба следующие n_1 нейронов сети. Признаком того, что некоторое входное изображение S^* относится к множеству M_1 , являются соотношения:

$$\sum_{i=1}^{n_0} U_{\text{вых}Y_i^0}(S^*) \neq -(n_0 - 2); \quad \sum_{i=1}^{n_1} U_{\text{вых}Y_i^1}(S^*) = -(n_1 - 2). \quad (5)$$

Появление изображений, для которых не выполняются соотношения (4) и (5) указывает на необходимость следующего дообучения нейронной сети. Число N шагов дообучения практически не ограничено.

На рис. 3 приведена архитектура нейронной сети Хебба, которая может дообучаться N раз. Сеть состоит из слоя входных нейронов x_1, \dots, x_n и Y -слоя распознающих нейронов. Нейроны Y -слоя разбиты на $(N + 1)$ группу, каждая из которых может содержать разное число нейронов (но не меньше трех) и формироваться в процессе функционирования сети.

Первая группа нейронов $Y_1^0, \dots, Y_{n_0}^0$ используется для запоминания исходной информации в виде множества изображений M_0 . Вторая и последующие группы нейронов $(Y_1^1, \dots, Y_{n_1}^1), \dots, (Y_1^N, \dots, Y_{n_N}^N)$ используются для обучения нейронной сети по мере накопления новой информации и последовательного запоминания множеств изображений M_1, M_2, \dots, M_N . В каждой группе нейронов выходные сигналы Y -нейронов поступают на входы управляющего нейрона, имеющего функцию активации вида:

$$U_{\text{вых } \Sigma_d} = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{\text{вх } \Sigma_d} = \sum_{k=1}^{n_d} U_{\text{вых } Y_k^d} = -(n_d - 2), \\ 1, & \text{если } U_{\text{вх } \Sigma_d} \neq -(n_d - 2), \quad d = 0, 1, \dots, N. \end{cases} \quad (6)$$

Вначале режима распознавания обнуляются выходные сигналы Σ -нейронов и блокируется работа нейронов $Y_1^1, Y_2^1, \dots, Y_{n_N}^N$.

При подаче на вход нейронной сети, которая дообучалась L раз ($1 < L < N$), некоторого изображения S^* вначале активируются нейроны первой группы $Y_1^0, \dots, Y_{n_0}^0$, выходные сигналы которых поступают на входы управляющего нейрона Σ_0 .

Если выполняется соотношение:

$$U_{\text{вх } \Sigma_0} = \sum_{k=1}^{n_0} U_{\text{вых } Y_k^0} = -(n_0 - 2), \quad (7)$$

то $U_{\text{вых } \Sigma_0} = 0$ и входное изображение S^* относится к множеству изображений M_0 , а конкретный класс изображений определяют выходные сигналы нейронов $Y_1^0, \dots, Y_{n_0}^0$.

Если соотношение (7) не выполняется, то $U_{\text{вых } \Sigma_0} = 1$, что указывает на то, что входное изображение S^* не принадлежит множеству M_0 . Единичный выходной сигнал нейрона Σ_0 по цепи обратной связи фиксирует единичный выходной сигнал нейрона Σ_0 и поступает на входы нейронов первой группы, блокируя их. Одновременно этот же единичный сигнал управляющего нейрона поступает на входы распознающих нейронов $Y_1^1, \dots, Y_{n_1}^1$ второй группы и переводит их в активное состояние. Выходные сигналы нейронов $Y_1^1, \dots, Y_{n_1}^1$ поступают на входы управляющего нейрона Σ_1 , с помощью которого определяется принадлежность изображения S^* к множеству M_1 .

Если выполняется соотношение:

$$U_{\text{вх } \Sigma_1} = \sum_{k=1}^{n_1} U_{\text{вых } Y_k^1} = -(n_1 - 2), \quad (8)$$

то изображение S^* принадлежит множеству M_1 , а конкретный класс изображений определяют выходные сигналы нейронов $Y_1^1, \dots, Y_{n_1}^1$.

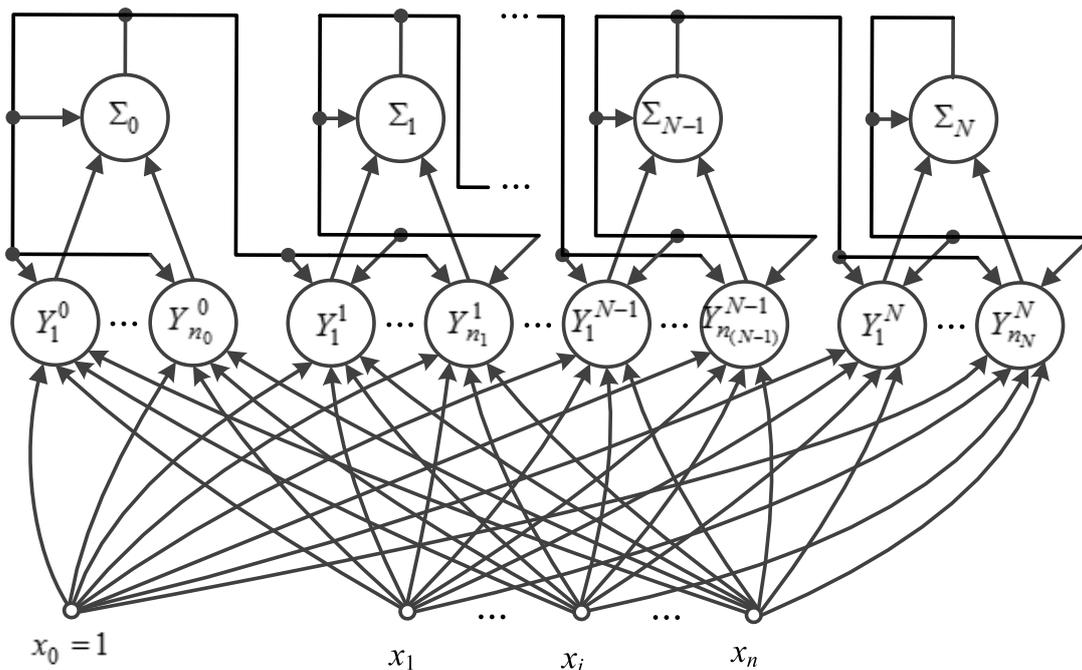


Рис. 3. Архитектура нейронной сети Хебба, которая может дообучаться N раз

Если равенство (8) не выполняется, то изображение S^* не принадлежит множеству M_1 и $U_{\text{вых } \Sigma_1} = 1$. Сигнал $U_{\text{вых } \Sigma_1}$ блокирует нейроны $Y_1^1, \dots, Y_{n_1}^1$ и подключает к распознаванию нейроны третьей группы и т.д. В результате этого процесса входное изображение либо будет отнесено к одному из известных множеств изображений $M_0, M_1, M_2, \dots, M_L$, либо будет воспринято как новое изображение, которое необходимо запомнить сетью на $(L+1)$ -м дообучении НС.

Экспериментальные исследования

Выполним экспериментальные исследования разработанного принципа обеспечения стабильности-пластичности НС Хебба. Для этого сначала произведем обучение НС. Продемонстрируем работоспособность предложенного подхода на НС Хебба, которая состоит из восьми Y -нейронов (рис. 4), имеющих следующую функцию активации:

$$U_{\text{вых } Y_j} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх } Y_j} \geq 0, \\ -1, & \text{если } U_{\text{вх } Y_j} < 0. \end{cases}$$

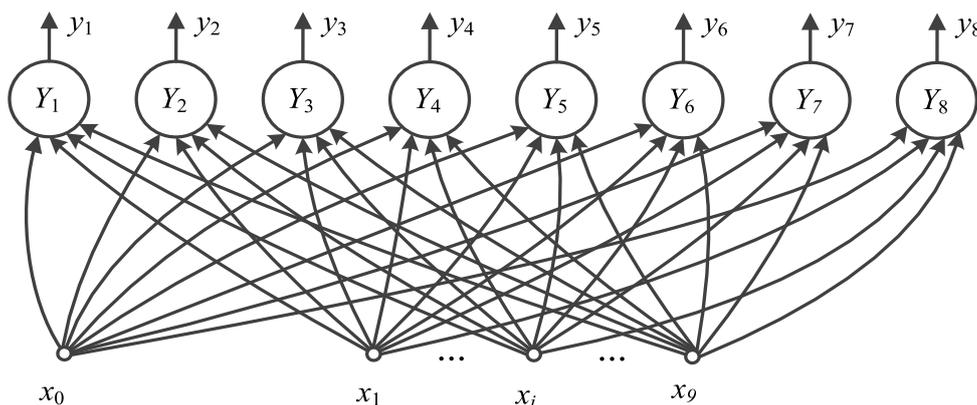


Рис. 4. Нейронная сеть Хебба с дополнительными запоминающими нейронами

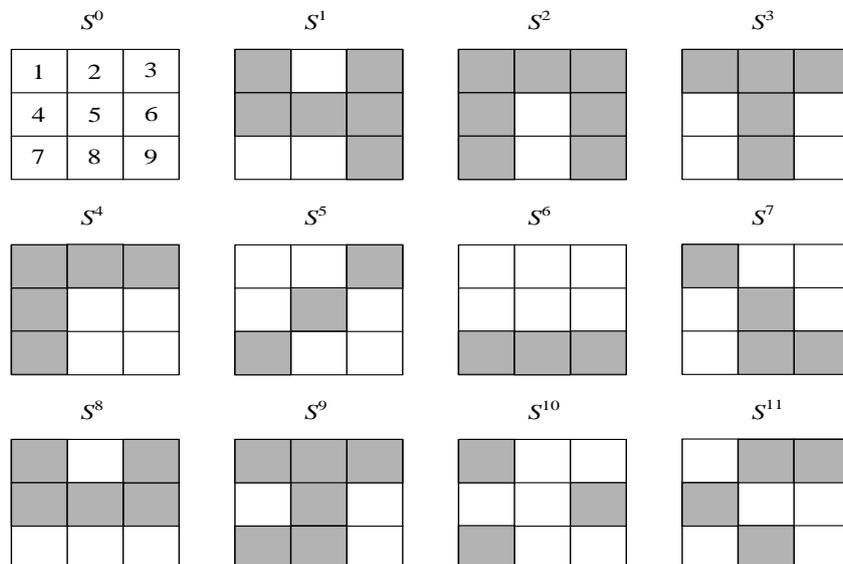


Рис. 5. Изображения, запоминаемые нейронной сетью Хебба

Обучим изображениями S^1, S^2, S^3 (рис. 5) нейроны Y_1, Y_2, Y_3 . Нумерация элементов изображений отображена на изображении S^0 рис. 5. Затем продемонстрируем процесс работы обученной НС Хебба при предъявлении на ее входы изображений S^1, \dots, S^9 (рис. 5).

Для обучения нейронной сети изображениями S^1, S^2, S^3 необходимо выполнить следующие шаги:

Шаг 1. Задается множество:

$$M = \{(S^1, t^1), (S^2, t^2), (S^3, t^3)\} = \{((1, -1, 1, 1, 1, -1, -1, 1), (1, -1, -1)), ((1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, 1), (-1, 1, -1)), ((1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1), (-1, -1, 1))\}.$$

Задаются нулевые выходные сигналы всех Y -нейронов и нулевые значения весов всех связей, задается начальный момент времени:

$$U_{\text{вых } Y_j} = 0; W_{ij} = 0, i = 0, 1, \dots, 9, j = 1, \dots, 8; t = t_0.$$

Шаг 2. Начинается обучение нейронной сети парой (S^1, t^1) .

Шаг 3. Иницируется множество входов нейронной сети изображением S^1 : $x_0 = 1, x_1 = 1, x_2 = -1, x_3 = 1, x_4 = 1, x_5 = 1, x_6 = 1, x_7 = -1, x_8 = -1, x_9 = 1$.

Шаг 4. Иницируется множество выходных нейронов сети вектором требуемых выходных сигналов t^1 пары (S^1, t^1) :

$$\begin{aligned} U_{\text{вых } Y_1} &= y_1 = t_1^1 = 1; \\ U_{\text{вых } Y_2} &= y_2 = t_2^1 = -1; \\ U_{\text{вых } Y_3} &= y_3 = t_3^1 = -1. \end{aligned}$$

Шаг 5. Определяются веса связей нейронов Y_1, Y_2, Y_3 сети по правилу Хебба.

Затем должны выполняться шаги алгоритма, связанные с предъявлением изображений S^2 и S^3 .

Подобным образом нейронная сеть обучает распознаванию и других изображений.

В результате эксперимента должно произойти правильное распознавание нейронами Y_1, Y_2, Y_3 изображений $S^1, S^2, S^3, S^4, S^8, S^9$, несмотря на то, что изображения S^4, S^8, S^9 имеют дефекты. Кроме того, выполним процесс дообучения нейронов Y_4, Y_5, Y_6 НС Хебба, изображениями S^5, S^6, S^7 и нейронов Y_7, Y_8 изображениями S^{10}, S^{11} .

Результаты экспериментов по обучению и работе обученной НС Хебба при предъявления на ее входы изображений S^1, \dots, S^{11} приведены в *табл. 1 – 5*.

В *табл. 1* приведены результаты расчетов весов связей нейронов Y_1, Y_2, Y_3 , после обучения сети изображениям S^1, S^2, S^3 . Эти веса связей используются при расчете данных для следующих таблиц.

В *табл. 2* представлены результаты предъявления обученной нейронной сети изображений S^1, \dots, S^9 . Знаки "+" и "-" в *табл. 2* означают, что соответствующее изображение

распознано и не распознано, соответственно.

Из анализа *табл. 2* следует, что входные изображения $S^1, S^2, S^3, S^4, S^8, S^9$ вызывают реакцию сети, при которой при предъявлении любого из этих изображений на выходе нейронной сети наблюдается один положительный единичный сигнал и два отрицательных единичных сигнала, то есть сеть относит входное изображение к одному из известных классов. Анализ данных *табл. 2* и изображений показывает, что произошло правильное распознавание всех шести изображений, несмотря на то, что три из них имеют дефекты (S^4, S^8, S^9).

Нетрудно увидеть, что при отнесении входного изображения к одному из трех классов, представители которых хранятся в весах связей нейронов Y_1, Y_2, Y_3 , суммарный выходной сигнал этих нейронов равен минус единице:

$$\sum_{j=1}^3 U_{\text{вых } Y_j} = -1.$$

Если входное изображение не относится к классам изображений хранящихся в весах связей нейронов Y_1, Y_2, Y_3 , то имеем $\sum_{j=1}^3 U_{\text{вых } Y_j} \neq -1$, что служит признаком

новой информации (нового изображения) на входном слое нейронов и необходимости обучения следующей группы Y -нейронов распознавать эту входную информацию. При этом обученные распознающие нейроны должны быть заблокированы в режиме распознавания и заблокированы или игнорироваться в режиме обучения следующей группы нейронов.

Нейроны Y_4, Y_5, Y_6 несложно обучить распознаванию изображений S^5, S^6, S^7 алгоритмом Хебба.

Результат обучения приведен в *табл. 3*.

Таблица 1

Результаты расчетов весов связей нейронов Y_1, Y_2, Y_3 НС Хебба после обучения изображениями S^1, S^2, S^3

Вес связи	W_{01}	W_{11}	W_{21}	W_{31}	W_{41}	W_{51}	W_{61}	W_{71}	W_{81}	W_{91}	W_{02}	W_{12}	W_{22}	W_{32}	W_{42}
Значение	-1	-1	-3	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
Вес связи	W_{52}	W_{62}	W_{72}	W_{82}	W_{92}	W_{03}	W_{13}	W_{23}	W_{33}	W_{43}	W_{53}	W_{63}	W_{73}	W_{83}	W_{93}
Значение	-3	1	3	-1	-1	-1	-1	1	-1	-3	1	-3	-1	3	-3

Таблица 2

Результаты распознавания изображений S^1, \dots, S^9

Нейроны	Выходные сигналы нейронов при предъявлении изображений								
	S^1	S^2	S^3	S^4	S^5	S^6	S^7	S^8	S^9
Y_1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
Y_2	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1
Y_3	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1
Результат распознавания	+	+	+	+	-	-	-	+	+

Таблица 3

Результаты расчетов весов связей нейронов Y_4, Y_5, Y_6 после обучения изображениями S^5, S^6, S^7

Вес связи	W_{04}	W_{14}	W_{24}	W_{34}	W_{44}	W_{54}	W_{64}	W_{74}	W_{84}	W_{94}	W_{05}	W_{15}	W_{25}	W_{35}	W_{45}
Значение	-1	-1	1	3	1	1	1	1	-3	-3	-1	-1	1	-1	1
Вес связи	W_{55}	W_{65}	W_{75}	W_{85}	W_{95}	W_{06}	W_{16}	W_{26}	W_{36}	W_{46}	W_{56}	W_{66}	W_{76}	W_{86}	W_{96}
Значение	-3	1	1	1	1	-1	3	1	-1	1	1	1	-3	1	1

Таблица 4

Результаты распознавания изображений S^5, S^6, S^7, S^{10} и S^{11}

Нейроны	Выходные сигналы нейронов при предъявлении изображений				
	S^5	S^6	S^7	S^{10}	S^{11}
Y_4	1	-1	-1	1	1
Y_5	-1	1	-1	1	1
Y_6	-1	-1	1	-1	-1
Результат распознавания	+	+	+	-	-

Таблица 5

Результаты расчетов весов связей нейронов Y_7, Y_8 после обучения изображениями S^{10}, S^{11}

Вес связи	W_{07}	W_{17}	W_{27}	W_{37}	W_{47}	W_{57}	W_{67}	W_{77}	W_{87}	W_{97}
Значение	0	2	-2	-2	-2	0	2	2	-2	0
Вес связи	W_{08}	W_{18}	W_{28}	W_{38}	W_{48}	W_{58}	W_{68}	W_{78}	W_{88}	W_{98}
Значение	0	-2	2	2	2	0	-2	-2	2	0

При этом множество M_1 из обучающих пар задавалось следующим образом:

$$M = \{(S^5, t^5), (S^6, t^6), (S^7, t^7)\} = \{((-1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1), (1, -1, -1)), ((-1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 1), (-1, 1, -1)), ((1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, 1), (-1, -1, 1))\}.$$

В табл. 4 приведены результаты распознавания изображений S^5, S^6, S^7, S^{10} и S^{11} . Знаки "+" и "-" в табл. 4 означают, что соответствующее изображение распознано и не распознано, соответственно.

Из анализа табл. 4 следует, что нейроны Y_4, Y_5, Y_6 относят изображения S^5, S^6, S^7 к известным классам, эталоны которых хранятся в весах связей этих нейронов. Изображения S^{10} и S^{11} нейронами Y_4, Y_5, Y_6 распознаются как не принадлежащие к этим классам, это же наблюдается и при предъявлении изображений S^{10}, S^{11} и первой группе нейронов Y_1, Y_2, Y_3 . Таким образом, для распознавания изображений S^{10}, S^{11} необходимо обучить еще два Y -нейрона: Y_7, Y_8 . В табл. 5 приведены результаты расчетов весов связей нейронов Y_7, Y_8 после предъявления изображений S^{10}, S^{11} .

Нейроны Y_7, Y_8 будут распознавать указанные изображения после того, как при попытке их распознавания будут заблокированы сначала нейроны Y_1, Y_2, Y_3 , а затем нейроны Y_4, Y_5, Y_6 .

Выводы

В работе решена актуальная задача разработки новых классов стабильно-пластичных нейронных сетей на основе нейронных сетей Хемминга и Хебба. Разработанные архитектуры нейронных сетей и алгоритмы их функционирования открывают возможность для создания систем распознавания, классификации, управления и поддержки принятия решений для объектов в условиях существенной априорной неопределенности, когда планируется оперативное дообучение разработанных систем по мере накопления информации об объекте.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Suzuki, K.** Artificial Neural Networks: Architectures and Applications/K.Suzuki. – Publisher: InTech, 2013.–256 p.
2. **Bianchini, M.** Handbook on Neural Information Processing (Intelligent Systems Reference Library) / M. Bianchini. – Publisher: Springer, 2013. – 499 p.
3. **Cirincione, M.** Power Converters and AC Electrical Drives with Linear Neural Networks (Energy, Power Electronics, and Machines) / M. Cirincione, M. Pucci, G. Vitale. – Publisher: CRC Press, 2012. – 631 p.
4. **Галушкин, А. И.** Нейронные сети. Основы теории / А. И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 496 с.
5. **Капля, В. И.** Системы искусственного интеллекта: учебное пособие. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ. – 2011. – 97 с.

-
6. **Russell, S.** Artificial Intelligence: A Modern Approach, Third Edition / S. Russell, P. Norvig. – Publisher: Prentice Hall, 2010. – 1152 p.
 7. **Девятков, В. В.** Системы искусственного интеллекта / Гл. ред. И. Б. Фёдоров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 352 с.
 8. **Carpenter, G. A.** Massively parallel architecture for self-organising neural pattern recognition machine / G. A. Carpenter, S. A. Grossberg // Computing, Vision, Graphics and Image Processing. – 1987. – Vol. 37. – P. 54 – 115.
 9. **Grossberg, S.** Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance / S. Grossberg // Cognitive Science. – 1987. – Vol. 11. – P. 23 – 63.
 10. **Fausett, L.** Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications / L. Fausett. – New Jersey: Prentice Hall Int., Inc., 1994. – 461 p.
 11. **Дмитриенко, В. Д.** Нейросетевое устройство направленных ассоциаций / В. Д. Дмитриенко, А. Ю. Заковоротный, Хавина И. П. // Научные ведомости. Серия: История, политология, экономика, информатика. – Белгород: БГУ, 2010. – № 7(78). Вып. 14/1. – С. 110–119.
 12. **Дмитриенко, В. Д.** Ассоциативная нейронная сеть АРТ / В. Д. Дмитриенко, А. Ю. Заковоротный, В. А. Бречко // Сборник трудов Международной молодежной конференции "Прикладная математика, управление и информатика". – Белгород: ИД "Белгород", 2012. – Т. 1. – С. 115–118.
 13. **Дмитриенко, В. Д.** Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В. Д. Дмитриенко, А. Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. – 248 с.
 14. **Dmitrienko, V. D.** Neural Networks Art: Solving problems with multiple solutions and new teaching algorithm / V.D. Dmitrienko, A.Yu. Zakovorotnyi, S.Yu. Leonov, I.P. Khavina // Open Neurology Journal. – 2014. – 8. – P. 15–21.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ СИГНАЛА

К.В. Лицин

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

RATIONALE FOR THE VARIABLE COMPONENT OF THE FREQUENCY OF THE EXCITATION SIGNAL IN DETERMINING THE ANGULAR POSITION OF THE ROTOR OF A SYNCHRONOUS MOTOR BY HIGH-FREQUENCY SIGNAL INJECTION

K.V. Litsin

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

k.litsin@rambler.ru

Аннотация. Представлена разработанная схема определения углового положения ротора синхронного двигателя с помощью метода высокочастотной инжекции. Описана формула определения углового положения. Проанализированы графики изменения амплитуды наводимой в статоре ЭДС и изменения мощности системы от частоты. На основании интегрального распределения и АЧХ полосно-пропускающего фильтра выбрано оптимальное значение частоты, равное 1000 Гц.

Ключевые слова: бездатчиковый контроль, высокочастотная инжекция, угловое положение, синхронный двигатель, ЭДС.

Abstract. The developed scheme of determining the angular position of the rotor of a synchronous motor with a high-frequency injection method is presented. Formula for determining the angular position is described. Graphs of amplitude induced EMF in the stator and the power change of the frequency are analyzed. Based on the cumulative distribution and response bandpass filter selected the optimal frequency of 1000 Hz.

Keywords: sensorless control, high frequency injection, angular position, induction motor, EMF.

Положение и скорость вала обычно определяют с помощью датчика положения [1-2]. Зная положение ротора, синхронный двигатель может управляться таким образом, что он обеспечивает полный крутящий момент при нулевой скорости. Необходимость определения углового положения без датчиков, позволяющая осуществить реализацию высококачественного электропривода, стоит перед учеными еще с момента появления понятия векторного управления. В настоящее время просматривается тенденция к отказу от использования датчиков механических величин (Sensorless Control) и восстановления вектора состояния системы с помощью различных оценивающих моделей [3-4]. Не смотря на всё многообразие бездатчиковых методов, они имеют общий существенный недостаток – невозможность определения углового положения ротора при нулевой и низкой скорости. Одним из методов, который этого недостатка лишён, является метод высокочастотной инжекции [5].

Основная идея предлагаемого способа высокочастотной инжекции заключается в том, что на сигнал постоянного тока, подаваемый в обмотку возбуждения, будем накладывать переменный сигнал высокой частоты [6]. В результате, по наводимым высокочастотным ЭДС в статоре можно вычислить угловое положение ротора по формуле (1):

$$\theta = \arctg\left(\frac{-0,866}{\frac{1}{k} + 0,5}\right) + 180 \cdot n, \quad (1)$$

где n – величина равная 0, 1 или 2 в зависимости от сектора, где находится ротор.

Одним из главных вопросов, возникающих в ходе реализации данного метода, является вопрос оптимального выбора частоты синусоидального сигнала. Схема разработанного лабораторного стенда, на котором проводились опыты, представлена на рисунке 1.

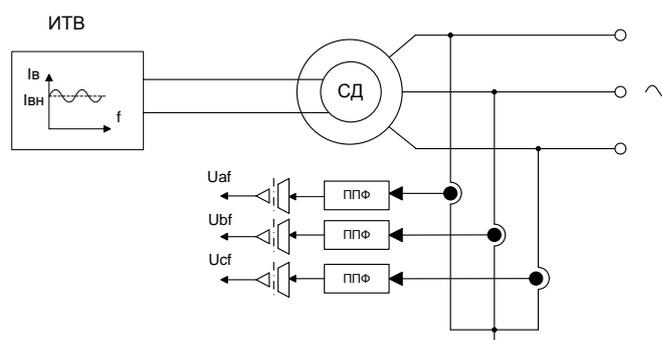


Рис.1. Схема исследования углового положения ротора синхронного двигателя

Схема исследования углового положения ротора включает в себя:

- импульсный генератор сигналов с ШИМ (ИТВ);
- синхронная машина ГАБ-1-Т/230;
- полосно-пропускающие фильтры (ППФ).

На оптимальность значения частоты окажут влияние амплитуды наводимых ЭДС в обмотке статора. Чем их значения выше, тем лучше, т.к. это позволит с более высокой точностью определять угловое положение ротора согласно формуле (1). С другой стороны необходимо минимизировать значение активной мощности, потребляемой всей системой в целом.

Проведем исследование определения частоты переменного сигнала, накладываемого на сигнал постоянного тока, подаваемый в обмотку возбуждения. В ходе данного эксперимента наблюдаем изменение амплитуды наводимых ЭДС в обмотке статора, на примере фазы А, при изменении частоты переменного сигнала возбуждения (рисунок 2).

Вторым фактором при определении оптимальной частоты переменной составляющей сигнала возбуждения будем учитывать изменение мощности системы. Соответствующий график представлен на рисунке 3.

Проведем аппроксимацию графика, изображенного на рисунке 2, получим выражение (2):

$$g_1(f) = 0,00027 \cdot f + 0,50804 \quad (2)$$

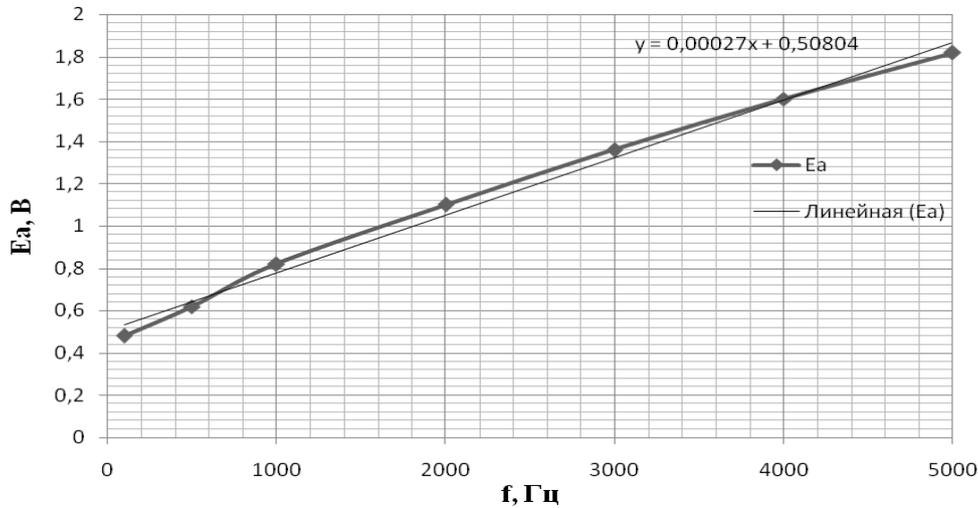


Рис. 2. График изменения амплитуды наводимой в статоре ЭДС

Аналогичную процедуру сделаем с графиком, изображенным на рисунке 3, имеем формулу (3):

$$g_2(f) = 5953,9 f^{-0,574} \quad (3)$$

Определение оптимальной частоты переменной составляющей сигнала возбуждения проведем с помощью метода интегралов, который описывается формулой (4):

$$S(f) = \int_a^f g_1(f) df + \int_a^f g_2(f) df \quad (4)$$

Подставляя выражения (2) и (3) в формулу (4), построим интегральное распределение функции в зависимости от частоты (рисунок 4).

Из рисунка 4 очевидно, что оптимальным значением частоты является величина равная 1000 Гц. Кроме того, при выборе оптимальной частоты инжектируемого сигнала возьмем в расчет величину коэффициента подавления полосно-пропускающего фильтра Баттерворта 2-го порядка.

Он (коэффициент подавления) должен быть одинаковым или иметь небольшое различие на частотах в 50 Гц и 10 кГц. Построим АЧХ данного фильтра с учетом того, что оптимальное значение частоты равно 1000 Гц. АЧХ представлена на рисунке 5.

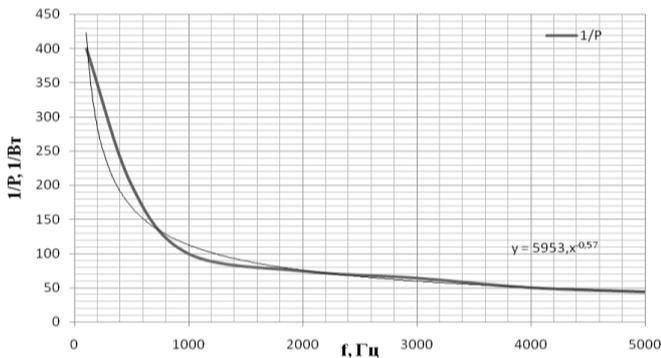


Рис. 3. График изменения мощности системы

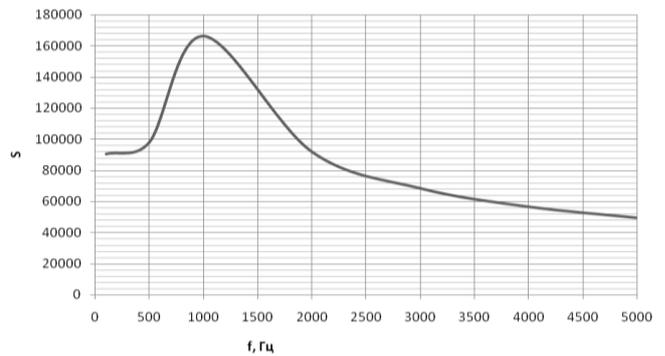


Рис. 4. Интегральное распределение

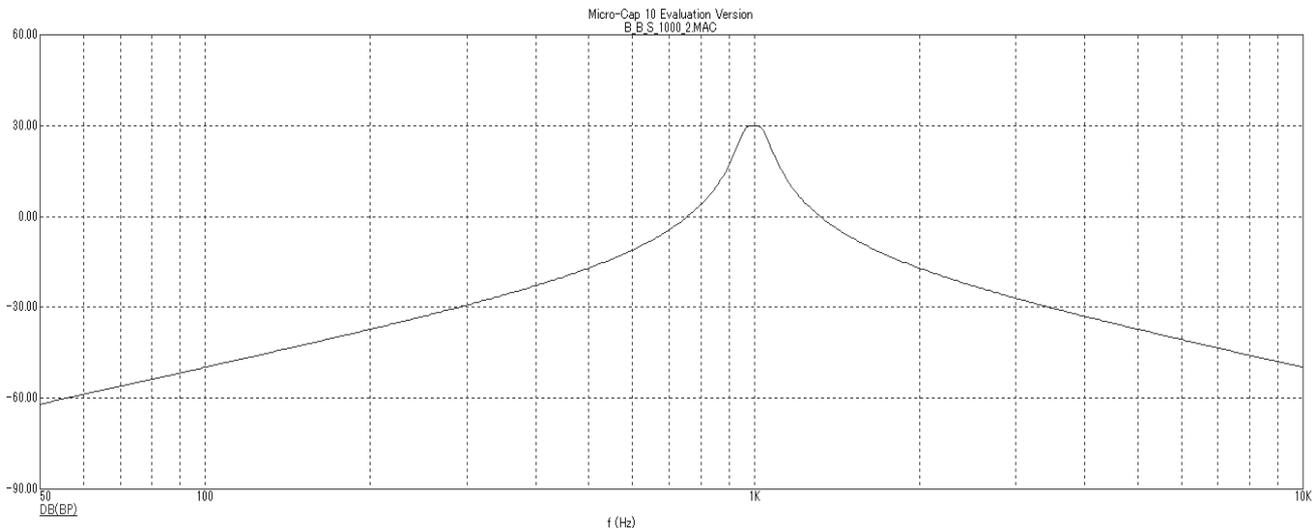


Рис. 5. АЧХ фильтра Баттерворта

Из рисунка 5 очевидно, что при центральной частоте в 1000 Гц коэффициент подавления при частотах в 50 Гц и 10 кГц имеет значение, отличающееся друг от друга не более чем на 5%.

Таким образом, опираясь на представленные доказательства, можно считать частоту 1000 Гц оптимальной для переменного инжектируемого сигнала.

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 потокосцепления 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.** Высоочастотная 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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА БИОГАЗА ПРИ АНАЭРОБНОМ РАЗЛОЖЕНИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

О.В. Березюк

Винницкий национальный технический университет,
г. Винница, Украина.

MODELING OF BIOGAS COMPOSITION DURING ANAEROBIC DECOMPOSITION OF HARD DOMESTIC WASTES

O.V. Berezjuk

Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine

berezyukoleg@yandex.ru

Аннотация. Предложены необходимые при разработке стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с твердыми бытовыми отходами математические модели состава биогаза при их анаэробном разложении.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, анаэробное разложение, биогаз, математическая модель, регрессионная зависимость, регрессионный анализ.

Abstract. Necessary gets in case of strategy development, complex of machines and equipment for the appeal with the hard domestic wastes a mathematical model of biogas composition during their anaerobic decomposition.

Keywords: hard domestic wastes, anaerobic decomposition, biogas, mathematical model, regressive dependence, regressive analysis.

Введение

Общий потенциал биогаза, образующегося на полигонах захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) и свалках, согласно [1] в странах ЕС достигает почти 9 млрд. м³/год, в США – 13 млрд. м³/год и является одной из серьезных проблем охраны окружающей среды. По этой причине во многих развитых странах мира осуществляются специальные мероприятия по минимизации эмиссии биогаза. В последнее время внимание к этому вопросу значительно выросло. Решающее значение имела Киотская международная конференция 1997 г. по проблемам выброса вредных газов в атмосферу. Это фактически привело к возникновению самостоятельной отрасли мировой индустрии, включающей добычу и утилизацию биогаза. Добыча биогаза в заметных объемах распространена в ряде развитых западных стран: США, Германии, Великобритании, Нидерландам, Франции, Италии, Дании, а глобальная его утилизация составляет приблизительно 1,2 млрд. м³/год, что эквивалентно 429 тыс. тонн метана или 1% его глобальной эмиссии [1].

На сегодняшний день в Украине начата добыча биогаза на полигонах ТБО таких городов как Запорожье, Кременчуг и Винница. Биогаз является горючим газом, обладающим довольно большой теплотворной способностью – более 18 МДж/м³. Основную объемную массу биогаза составляет метан, эмиссия которого из территорий захоронения ТБО достигает от 1,5 до 70 млн. т/год [2, 3].

Экологическая опасность метана обусловлена возможностью его горизонтального распространения на прилегающие к местам захоронения ТБО территории, накоплением в подвалах помещений и, как следствие, созданием взрывоопасных газо-воздушных смесей при

достижении объемной концентрации от 5 до 15 %. По степени нанесения вреда окружающей среде метан считается вторым после углекислого газа наиболее опасным парниковым газом и составляет 18% от общего количества парниковых газов, выбрасывающихся в атмосферу Земли. Метан по величине потенциала глобального потепления приблизительно в 21 раз более опасен, чем углекислый газ. Потребность в учете валовой эмиссии метана определяется и тем, что этот газ является составной частью национальной квоты веществ, влияющих на изменение озонового слоя планеты и парниковый эффект.

Постановление Кабинета Министров Украины 265 [4] заложило основу для разработки Национальной стратегии обращения с ТБО в Украине. В отличие от высокоразвитых стран, где широко распространены современные технологии утилизации и переработки ТБО, в Украине 96,5% отходов захораниваются на полигонах и свалках, и, учитывая сегодняшнее состояние украинской экономики, в краткосрочной перспективе кардинальное изменение этого положения выглядит маловероятным. Именно поэтому рациональная организация полигонов ТБО, обеспечивающих защиту атмосферного воздуха и воды от загрязнения, вместо перегруженных полигонов и свалок, не отвечающих нормам экологической безопасности, одновременно с постепенным внедрением перспективных методов обращения с ТБО не будет терять актуальность в течение некоторого времени. Поэтому построение математических моделей состава биогаза при анаэробном разложении твердых бытовых отходов с целью разработки стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с ними, является актуальной научно-технической задачей.

В работах [5-8] приведен состав и физико-химические свойства биогаза, образующегося в местах захоронения ТБО. В статье [9] опубликован состав биогаза, полученного при анаэробном разложении ТБО для разных соотношений композиционных смесей ТБО-компост и их относительной влажности, и который приведен в табл. 1.

Перспективы и опыт добычи биогаза в местах захоронения ТБО подробно описаны в работах [10-13], а в статьях [14, 15] рассмотрены особенности его образования. Авторами [16] рассмотрены методы использования биомассы для производства тепловой энергии. В работе [17] описаны фазы разложения ТБО, 80% которых являются анаэробными, а также определены факторы, влияющие на процесс биодеструкции отходов. В статье [18] опубликована математическая модель прогнозирования удельного потенциала биогаза, а в работе [19] предложена математическая модель эффективности добычи биогаза в местах захоронения ТБО, с помощью которой спрогнозированы необходимые для Украины количество и характеристики оборудования для его добычи. Авторами [20] проведен анализ способов утилизации добытого биогаза, а в работе [21] приведена математическая модель распространенности этих способов. Автор [22] опубликовал регрессионные зависимости расходов на управление ТБО от уровня доходов населения. В статье [23] проведено моделирование расходов на анаэробное разложение ТБО. Но конкретных математических моделей состава биогаза при анаэробном разложении ТБО, в результате анализа известных публикаций, нами не выявлено.

Целью исследования является построение математических моделей состава биогаза при анаэробном разложении твердых бытовых отходов с целью разработки стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с ними.

На основе данных табл. 1 планировалось получить математические модели в виде парных регрессионных зависимостей основных компонентов биогаза от параметров влияния.

Регрессии проводились на основе линеаризующих преобразований, позволяющих свести нелинейную зависимость к линейной. Определение коэффициентов уравнений регрессии осуществлялось методом наименьших квадратов с помощью разработанной компьютерной программы "RegAnaliz", защищенной свидетельством о регистрации авторского права на произведение и подробно описанной в работе [24].

Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 2, где серым цветом обозначены ячейки с максимальным значением коэффициентов корреляции R.

По результатам регрессионного анализа на основе данных табл. 1, как наиболее адекватные, окончательно приняты такие регрессионные модели:

$$\omega_{CH_4} = 69,01 - 9,258 \cdot 10^{-5} \omega_k^{2,936}; \quad (1)$$

$$\omega_{CO_2} = 18,85 - 5,667 \cdot 10^{-7} \varphi^{4,546}, \quad (2)$$

где ω_{CH_4} , ω_{CO_2} – содержание метана и углекислого газа в биогазе, соответственно, %; ω_k – содержание компоста в композиционной смеси ТБО-компост, %; φ – относительная влажность, %.

На рис. 1 и рис. 2 показаны фактические и теоретические графические зависимости основных компонентов биогаза от параметров влияния.

Сравнение фактических и теоретических данных показало, что теоретический состав компонентов биогаза при анаэробном разложении ТБО, рассчитанный с помощью регрессий (1) и (2), несущественно отличается от фактических данных, что подтверждает определенную

Таблица 1

Зависимость состава биогаза при анаэробном разложении ТБО от параметров влияния [9]

№	Состав биогаза		Параметры влияния	
	метан ω_{CH_4} , %	углекислый газ ω_{CO_2} , %	содержание компоста в композиционной смеси ТБО-компост ω_k , %	относительная влажность φ , %
1	67	16	30	29,8
2	60	17	50	27,1
3	0,06	6	100	41,5

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа

№	Вид регрессии	Коэффициент корреляции R		№	Вид регрессии	Коэффициент корреляции R	
		$\omega_{CH_4} = f(\omega_k)$	$\omega_{CO_2} = f(\varphi)$			$\omega_{CH_4} = f(\omega_k)$	$\omega_{CO_2} = f(\varphi)$
1	$y = a + bx$	0,98279	0,99549	9	$y = ax^b$	0,91200	0,98691
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,96079	0,98918	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,94238	0,99135
3	$y = a + b / x$	0,87244	0,98522	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,94238	0,99135
4	$y = x / (a + bx)$	0,96082	0,99123	12	$y = a / (b + x)$	0,96079	0,98918
5	$y = ab^x$	0,96448	0,99215	13	$y = ax / (b + x)$	0,82205	0,97492
6	$y = ae^{bx}$	0,96448	0,99215	14	$y = ae^{b/x}$	0,82973	0,97955
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,96448	0,99215	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,82973	0,97955
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,50008	0,57596	16	$y = a + bx^n$	0,99999	0,99999

ранее высокую точность полученных зависимостей.

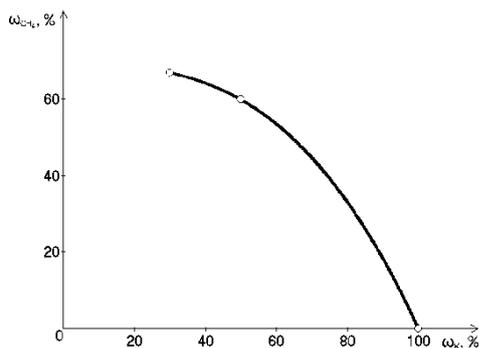


Рис. 1. Зависимость содержания метана в биогазе ω_{CH_4} от содержания компоста в композиционной смеси ТБО-компост ω_k : фактическая \circ , теоретическая —

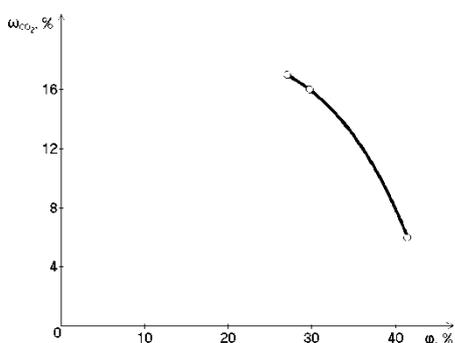


Рис. 2. Зависимость содержания углекислого газа в биогазе ω_{CO_2} от относительной влажности ϕ : фактическая \circ , теоретическая —

Как видно из рис. 1, при увеличении содержания компоста в композиционной смеси ТБО-компост содержание метана в биогазе уменьшается по степенной зависимости. Рис. 2 свидетельствует, что при увеличении относительной влажности содержание углекислого газа в биогазе уменьшается также по степенной зависимости.

Выводы

1. Предложены математические модели состава компонентов биогаза при анаэробном разложении твердых бытовых отходов, которые могут быть использованы при разработке стратегии, комплекса машин и оборудования для обращения с ними.
2. Установлено, что при увеличении содержания компоста в композиционной смеси ТБО-компост содержание метана в биогазе уменьшается по степенной зависимости, а при увеличении относительной влажности содержание углекислого газа в биогазе уменьшается также по степенной зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Техніко-економічне обґрунтування "Програми утилізації звалищного метану в Луганській області за допомогою механізмів Кітського протоколу".** – Луганськ, 2008. – 124 с.

2. **Исидоров, В. А.** Органическая химия атмосферы / В. А. Исидоров. – СПб.: Химия, 1992. – 288 с.
3. **Минько, О. И.** Экологические и геохимические характеристики свалок твердых бытовых отходов / О. И. Минько, А. Б. Лифшиц // Экологическая химия. – 1992. – № 2. – С. 37–47.
4. **Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 року № 265 «Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами»** / Кабінет Міністрів України : <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF>.
5. **Ратушняк, Г. С.** Энергозбереження в системах біоконверсії. Навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 83 с.
6. **Управление твёрдыми бытовыми отходами. Раздельный сбор и сортировка отходов** / Проект Европейского Сообщества INTERREG IIIA «Кооперация в совместном создании системы управления отходами в Псковской области», 2008. – 97 с.
7. **Краснянский, М. Е.** Экологические угрозы свалок ТБО / М. Е. Краснянский, Е. Бельгасем // Спец. информ. бюлл. «Твердые бытовые отходы». – 2005. – № 5. – С. 12.
8. **Пятничко, А. И.** Результаты обследования полигонов ТБО Украины для установления объёмов добычи и состава биогаза / А. И. Пятничко, Г. В. Жук, В. Е. Баннов // Технические газы. – 2010. – № 2. – С. 63–66.
9. **Джамалова, Г. А.** Интенсификация анаэробного разложения модельных образцов твердых бытовых отходов в биореакторах / Г. А. Джамалова // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2014. – № 23. – С. 84–86.
10. **Гелетуха, Г. Г.** Перспективы производства и использования биометана в Украине / Г. Г. Гелетуха, П. П. Кучерук, Ю. Б. Матвеев // Аналитическая записка БАУ. – Биоэнергетическая ассоциация Украины: 2014. – № 11. – 43 с.
11. **Маслеева, О. В.** Экологическая и экономическая целесообразность использования биотоплива / О. В. Маслеева, Г. В. Пачурин // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6. – С. 139–144.
12. **Савицкас, Ю. Ю.** Опыт эксплуатации биогазовых установок при анаэробной обработке органических отходов / Ю. Ю. Савицкас // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23. – № 4–5. – С. 128–131.
13. **Гелетуха, Г. Г.** Обзор технологий добычи и использования биогаза на свалках и полигонах твердых бытовых отходов и перспективы их развития в Украине / Г. Г. Гелетуха, З. А. Марценюк // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. – № 4. – С. 6–14.
14. **Беспалов, В. И.** Анализ условий образования биогаза на полигоне по захоронению твердых отходов потребления / В. И. Беспалов, Р. Г. Адамян // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 25.2 (25).
15. **Шейна, О. А.** Биохимия процесса производства биогаза как альтернативного источника энергии / О. А. Шейна, В. А. Сысоев // Вестник ТГУ. – 2009. – Т. 14, Вып. 1. – С. 73–76.
16. **Ткаченко, С. Й.** Перспективні напрямки використання біомаси як джерела енергії / С. Й. Ткаченко, Л. А. Боднар, А. О. Юзюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 68–73.

-
17. **Годовська, Т. Б.** Критерії індикаторів впливу на агроєкосистеми полігону твердих побутових відходів м. Житомир / Т. Б. Годовська, В. П. Фещенко // Вісник ЖНАЕУ: науково-теоретичний збірник. – 2011. – № 1 (28), Т. 1. – С. 400-407.
 18. **Березюк, О. В.** Розробка математичної моделі прогнозування питомого потенціалу звалищного газу / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 2. – С. 39-42.
 19. **Березюк, О. В.** Моделювання ефективності видобування звалищного газу для розробки обладнання та стратегії поводження з твердими побутовими відходами / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 21-24.
 20. **Куріс, Ю. В.** Способи утилізації біогазу / Ю. В. Куріс, С. Й. Ткаченко, Н. В. Семененко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – НТУ "Харківський політехнічний інститут", 2010. – № 7 (77). – С. 20-30.
 21. **Березюк, О. В.** Моделювання поширеності способів утилізації звалищного газу для розробки обладнання та стратегії поводження з твердими побутовими відходами / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 5. – С. 65-68.
 22. **Березюк, О. В.** Визначення регресійних залежностей витрат на управління твердими побутовими відходами від рівня доходів населення / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 5. – С. 24-26.
 23. **Березюк, О. В.** Моделювання витрат на анаеробне розкладання твердих побутових відходів / О. В. Березюк, Л. Л. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 57-60.
 24. **Березюк, О. В.** Определение регрессии коэффициента уплотнения твердых бытовых отходов от высоты полигона на основе компьютерной программы "RegAnaliz" / О. В. Березюк // Автоматизированные технологии и производства. – 2015. – № 2 (8). – С. 43-45.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

И.Б.Прохоров¹, Д.А.Юшкин², С.А.Евдокимов³, П.А.Гребенщиков⁴

^{1,2,3,4}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

MODELING OF THE QUANTITATIVE CHARACTERISTICS OF MULTIROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLES ON THE BASIS OF CALCULATION OF THE DETERMINING PARAMETERS

I.B.Prokhorov¹, D.A. Yushkin², S.A. Evdokimov³, P.A. Grebenschchikov⁴

^{1,2,3,4}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹ Пуа94prok@mail.ru

Аннотация. В современном мире сфера БПЛА активно развивается, появляются новые технологии, аппараты, предназначенные для выполнения конкретных летных задач. Как следствие, все БПЛА имеют свои особенности в конструкции, управлении. В результате основные характеристики (время полета и максимальная грузоподъемность) могут существенно различаться. В статье рассматривается как, основываясь на известные параметры отдельных элементов летательного аппарата, смоделировать необходимые пользователю основные свойства БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, мультироторный тип.

Abstract. In today's world, the scope of the UAV is actively evolving, new technologies, devices designed for specific flight tasks. As a consequence, all UAVs have their own features in the construction and management. As a result, the main characteristics (time of flight and maximum load) can vary significantly. In the article considers as to model basic properties of UAV necessary for the user, based on the known parameters of the individual elements of the aircraft.

Keywords: UAV, multirotortype.

Актуальность работы

Сегодня, проектирование и конструирование беспилотных летательных средств это высокотехнологичная, быстроразвивающаяся индустрия. Скачок в развитии электроники послужил катализатором научного исследования принципов полета мультироторных систем и последующих разработок аппаратов такого типа.

Мультироторные платформы как отдельный тип беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) имеет свою специфику, обусловленную особенностями конструкции. Данная конструкция имеет ряд особенностей: вертикальный взлет и посадка, возможность зависания в определенной координате, стабильность полета, способность перевозить на борту полезную нагрузку в виде камеры, тепловизора, различных датчиков, мехатронных систем, простота управления [1].

Благодаря этим преимуществам, такие системы получили широкое применение во многих сферах жизни человека.

Они показали себя как отличное средство сбора информации, в локальных боевых действиях, благодаря своим небольшим размерам. Существуют образцы, которые могут поместиться в ладони ребенка, не трудно представить, куда способны проникнуть такие «шпионы». Развитые страны используют БПЛА для обеспечения безопасности и внутри государства [2]. Такие системы вполне могут использоваться на вооружении у МЧС,

пожарных, правоохранительных органов.

Неразрушающий контроль высоких и протяженных объектов – еще одно направление для их применения. Дистанционный контроль состояния нефтепроводов и газопроводов, контроль состояния ЛЭП, энергетический аудит крупных промышленных объектов, а также строительных объектов с помощью тепловизионной системы, установленной на борту БПЛА.

Все больше фермеров переходят на методы точного земледелия. С помощью БПЛА и установленной на него мультиспектральной камеры, тепловизора, а так же фото-видео камеры получается вся необходимая информация о состоянии обрабатываемых земель. Эта информация позволяет создавать электронные карты полей, вести оперативный мониторинг состояния посевов, определять индекс NDVI (нормализованный вегетационный индекс), проверять качество пропашности и вести экологический мониторинг [3].

Аэрофотосъемки и измерения местности, осуществляемые беспилотными летательными аппаратами, на сегодняшний день являются актуальным и рентабельным решением большинства вопросов в области геодезии и топографии.

БПЛА для геодезии, пролетая по заданному маршруту, как в автоматическом, так и полуавтоматическом режиме, получает точные и достоверные фото и видеоматериалы об особенностях рельефа местности, на

которой будут проводиться строительные работы, совершает наземное лазерное сканирование, проводит геологоразведку, мониторинг зданий и сооружений. Полученные данные с БПЛА в геодезии обрабатываются в специализированном программном обеспечении и являются основой в проектировании строительства, создании цифровых и электронных карт, составлении топографических планов местности.

Основные проблемы и решения

Помимо качественных характеристик (качество стабилизации, плавность полета, маневренность, надежность и т.д.), данное летательное средство должно обладать достаточно высокими количественными характеристиками (время полета, максимальная грузоподъемность, способность аппарата поднимать на борту достаточную полезную нагрузку). Целью данной работы является получение методики расчета, силовой части аппарата, включая аккумуляторный блок, и последующее определение количественных характеристик.

Блок-схема устройства БПЛА мультироторного типа представлена на рис.1.

Выбор способа крепления электродвигателей на лучах аппарата

Для выявления наиболее эффективного способа крепления двигателей на луче проведен ряд экспериментов, схематически экспериментальная установка представлена на рис. 2, 3, 4.

На основании результатов проведенных экспериментов сделаны следующие выводы:

- эксперимент по сравнению эффективности соосной схемы подключения двух двигателей на одном луче и одного двигателя показал, что наиболее эффективным является способ подключения одного двигателя (рис. 5), при этом эффективность увеличивается на величину порядка 8%;
- эксперимент по сравнению эффективности в случаях с верхним и нижним креплением двигателя показал, что



Рис. 1. Блок схема устройства

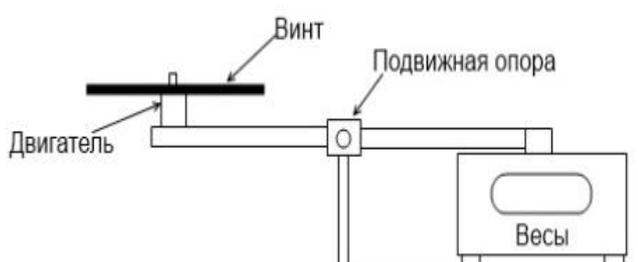


Рис. 2. Одиночное крепление двигателя сверху

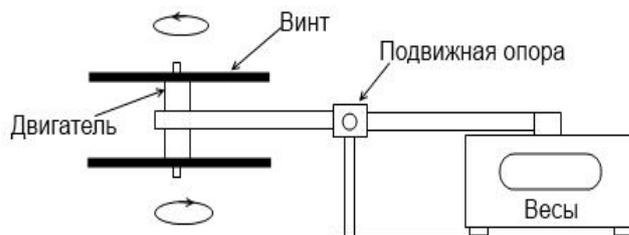


Рис. 3. Коаксиальное крепление двух двигателей с противоположным вращением

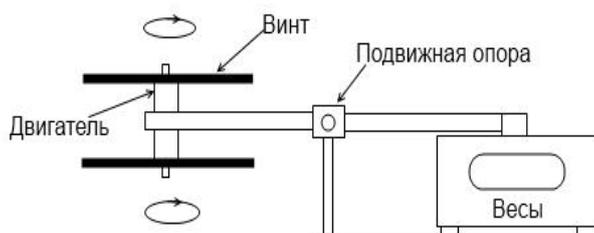


Рис. 4. Коаксиальное крепление двух двигателей с соосным вращением

наиболее эффективным является способ крепления к верхней поверхности луча, при этом эффективность увеличивается на величину порядка 4%.

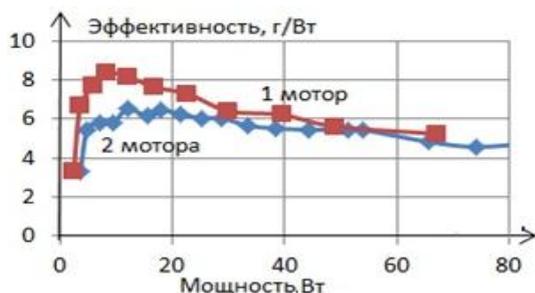


Рис. 5. График сравнения эффективности количества моторов на одном луче

Следовательно, для дальнейших расчетов схема соосного крепления двигателей применяться не будет.

Начальные условия

В целях сравнительного анализа расчет проводится для нагрузок массой 10, 15 и 20 кг. Геометрия рамы октогональная (8 двигателей). Вес рамы рассчитан в программе Inventor и составляет 4,7 кг. Рама проектировалась с учетом габаритов винтомоторных групп.

Расчет аккумуляторного блока

Для обеспечения заданного времени полета необходимо рассчитать основные параметры аккумуляторной батареи. Произведен расчет, на основании которого выявлена зависимость времени полета от емкости аккумулятора (рис. 6).

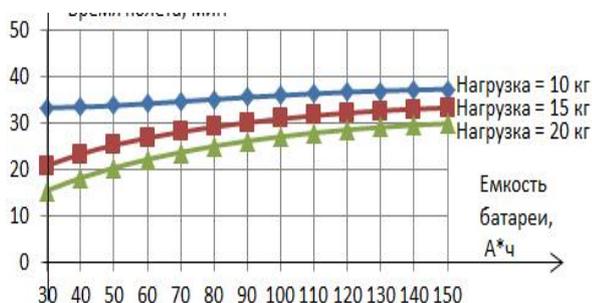


Рис.6. График зависимости времени висения от емкости батареи

Следовательно мы можем сделать вывод, что емкость аккумуляторной батареи следует выбирать в пределах от 50 до 180 А*ч. Видно, что максимальная

эффективность достигается при 130 А*ч, но в результате использования сборного аккумулятора такой емкости, получаем издержки в виде слишком большой массы и объема. Решено использовать аккумулятор емкостью 80 А*ч.

*Примечание – данный расчет проведен без учета потерь в проводах, что может значительно изменить данные. Расчет будет показан для аккумулятора емкостью 80 А*ч.

Методика расчета емкости аккумулятора:
Вычисляем энергию аккумулятора:

$$E = 0,85 \cdot U \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где 0,85 – коэффициент, показывающий, что реальный аккумулятор отдает 85 процентов его номинальной емкости, U – номинальное напряжение аккумулятора, ε – энергоемкость аккумулятора.

Далее, для расчета времени висения аппарата нужно знать массу аппарата. Расчеты массы двигателей, винтов и регуляторов сделаны на основании реальных прототипов, найденных на рынке с наиболее подходящими характеристиками [4]. Конфигурация двигателей определена методом перебора. Величина массы компонентов приведена та, которая свойственна образцам пригодным для наших задач.

Масса двигателей равна 5,84 кг, масса регуляторов равна 0,6 кг, масса винтов равна 0,8 кг, масса управляющей электроники камеры и передатчика - 0,5 кг, масса рамы и креплений – 4,7 кг, масса нагрузки 10 кг. Общая масса аппарата без аккумулятора равна 24 кг. На основании анализа рынка сборный аккумулятор напряжением 44,4 В и емкостью 80 А*ч имеет массу – 21,6 кг итого масса аппарата равна 45,3 кг.

На основании табл. 1 тяги и потребляемой мощности двигателей, найдем электрическую мощность, потребляемую двигателями для висения аппарата в воздухе с определенной массой равной 45,3 кг.

Проанализировав табл.1, можно составить график, представленный на рис.7.

Далее проведем линию тренда, зададим ей полиномиальный тип степени 3. Найдем уравнение этой прямой. Оно представлено формулой (2):

$$P = 2 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,4727 \cdot T - 1126,1, \quad (2)$$

где T – тяга одного двигателя.

Далее определяется, сколько тяги нужно для удержания аппарата в воздухе на один двигатель и подставляется в уравнение (2):

$$T = \frac{M}{8}, \quad (3)$$

где M – общая масса аппарата, 8 – количество моторов. Подставляя числовые значения в формулу (3), найдем тягу одного мотора.

Таблица 1

Зависимость мощности двигателя от тяги

Винт	Дроссель	Потребляемый ток, А	Мощность, Вт	Тяга, г	Обороты в минуту	Эффективность, г/Вт
T-MOTOR 27*8.8CF	50%	10,5	525	5020	2780	9,56
	65%	20,8	1040	7400	3400	7,12
	75%	28,5	1425	8930	3800	6,27
	85%	38	1900	10740	4100	5,65
	100%	50,1	2505	12380	4450	4,94

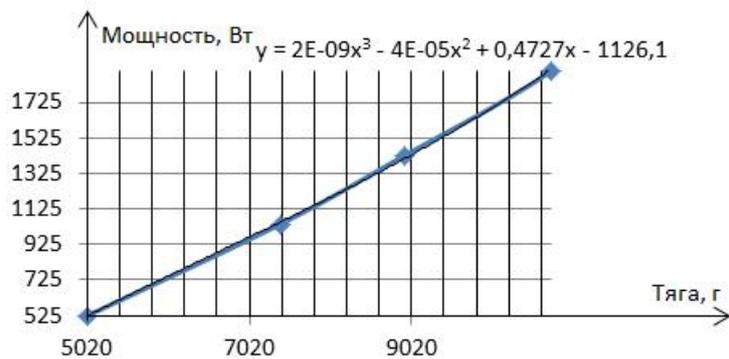


Рис.7. Зависимость потребляемой двигателем электрической мощности от тяги

Далее, чтобы узнать время висения необходимо воспользоваться формулой:

$$t = \frac{E}{P \cdot 8} \cdot 60, \quad (4)$$

где E – энергия аккумулятора, найденная в формуле (1), P – потребляемая мощность одного мотора, 60 – коэффициент для представления результата в минутах, 8 – количество моторов. Подставляя числовые значения в формулу (4), найдем примерное время висения.

Аналогично повторяем расчет для нагрузки 15 и 20 кг.

Расчет сечения и массы проводов. Определение влияния проводов на количественные характеристики аппарата

Расчет сечения проводов показал, что следует использовать два типа силовых проводов (от аккумулятора к регуляторам, от регулятора к двигателю). Получены оптимальные диаметры сечения проводов, для первого случая 5 мм, для второго 3 мм. Значения диаметров выбраны чуть больше, чем рассчитанные, в целях увеличения терморегуляции. Зависимость времени полета аппарата от диаметра сечения приведена на рис. 8, 9.

Методика расчета диаметра проводов:

Графики были получены с учетом того, что при увеличении диаметра провода растет и масса провода, что уменьшает полетное время, однако при слишком малом сечении провода, увеличиваются тепловые потери в

проводах, что опять же уменьшает полетное время.

Методика расчета диаметра проводов показана для проводов от аккумулятора до регуляторов.

Расположив аккумуляторные батареи на чертеже рамы, рассчитывается примерная длина проводов равная 3,88 м. Далее, воспользовавшись формулой (5), найдем сопротивление проводов:

$$R = \rho \cdot l \cdot \frac{4}{D^2 \cdot \pi}, \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление меди, l – длина проводов, π – число Пи, D – диаметр проводов.

Расчет массы провода:

$$m_{пр} = \frac{\delta \cdot l \cdot \pi \cdot D^2}{4000}, \quad (6)$$

где δ – плотность меди в г/см³, l – длина провода в м, D – сечение провода в мм², π – число Пи, 4000 – коэффициент для уравнивания порядков величин и представления результата в килограммах.

Как видно из формулы при увеличении диаметра провода растет его масса.

Расчет мощности, выделяемой на проводе при токе висения на один мотор по формуле (7):

$$P_1 = (I \cdot 8)^2 R, \quad (7)$$

где I – ток, который течет через один мотор при висении аппарата; 8 – количество моторов; R – сопротивление провода.

Таким же методом найдем массу проводов, иду-

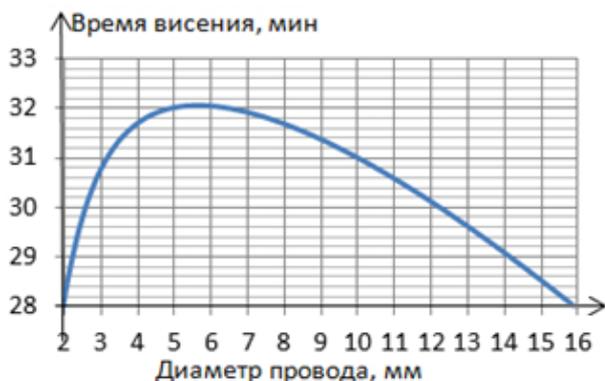


Рис.8. График зависимости времени полета от диаметра сечения проводов от аккумулятора до регуляторов скорости электродвигателей

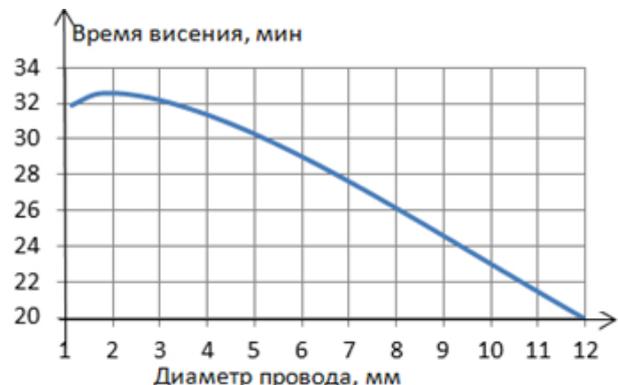


Рис.9. График зависимости времени полета от диаметра сечения проводов от регуляторов до электродвигателей

Итоговые расчётные количественные характеристики

$U_{\text{ном}}, \text{В}$	Емкость, Ач	Тяга мотора, кг	Время висения, мин	Грузоподъемность (полезная нагрузка), кг
44,4	80	5,9	31,08	10
		6,5	26,32	15
		7,148	22,9	20

щих от регуляторов до двигателей и выделяемую на них мощность.

Итого общая масса проводов:

$$M_{np} = m_{np1} + m_{np2}. \quad (8)$$

Общие потери мощности в проводах:

$$P_{np} = P_1 + P_2. \quad (9)$$

Далее подставляем полученные значения в формулы (2) и (3), то есть, прибавляя к общей массе массу проводов и прибавляя к суммарной потраченной мощности потери в проводах, найдем время полета.

Определение тяги, необходимой на один мотор, с учетом массы проводов:

$$m = \frac{M + M_{np}}{8}. \quad (10)$$

Далее смотрим на рис.7, ищем выделяемую электрическую мощность мотора при рассчитанной тяге:

$$t = \frac{E}{P \cdot 8 + P_{np}}. \quad (11)$$

Расчет показал, что влияние проводов вносит существенное уменьшение времени полета, порядка 10 %, при оптимальных диаметрах проводов.

Перерасчет зависимости времени полета от аккумуляторной батареи с учетом потерь в проводах показан на рис. 10.

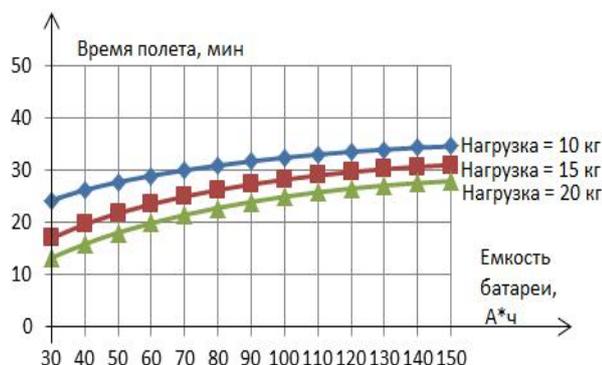


Рис. 10. Зависимость времени висения от емкости АКБ, с учетом потерь в проводах

Вывод

Был выполнен расчет основных параметров БПЛА мультироторного типа, а именно время полета, максимальная грузоподъемность, тяга, с применением данной методики. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таким образом, были получены количественные характеристики объекта, а значит представление о том, как он будет себя вести при изначально заданных параметрах его основных элементов. Этот метод может использоваться для выбора составных частей БПЛА мультироторного типа на основании поставленных перед ним задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sahoo, D. A.** Survey on Remotely Operated Quadrotor Aerial Vehicle using the Camera Perspective / D. Sahoo, A. Kumar, K. Sujatha // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). – 2010, - №11.
2. **Unmanned Aerial Vehicles: Examining the Safety, Security, Privacy and Regulatory Issues of Integration into U.S. Airspace.** – 2013, - (http://www.ncca.org/pdfs/sp-Drones-long-paper.pdf).
3. Introduction to Unmanned Aircraft Use In Agriculture. – 2014. - (http://www.paas2014.com/Rory_Paul.pdf).
4. **Recommended solution – T-motor.** – 2014. - (http://www.rctigermotor.com/index.php?m=content&c=search&a=init&catid=11&info%5Bcatid%5D=11&dosubmit).

АЛГОРИТМ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА

И.Б. Прохоров¹, П.А. Гребенщиков²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия

SENSOR FUSION FOR ATTITUDE

I.B.Prokhorov¹, P.A. Grebenschikov²

^{1,2}Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

¹Цуа94prok@mail.ru

Аннотация. В задачах робототехники, в частности беспилотных летательных аппаратах или взаимодействия машин и людей, важным аспектом является виртуальное представление реального объекта в трехмерном пространстве для дальнейшего управления, либо отображения информации о его нахождении и ориентации на дисплее оператора. Одной из актуальных задач навигации и позиционирования объекта в трехмерном пространстве является задача нахождения его ориентации в глобальной системе координат. Современные технологии позволяют производить датчики высокой точности и малого уровня шума, однако такие датчики могут быть не применимы в ряде случаев из-за своей цены либо масса-габаритных показателей. В статье будет рассмотрен метод синтеза показаний относительно дешевых и неточных датчиков угловой скорости и ускорения для наиболее достоверного отражения реальной ориентации объекта.

Ключевые слова: ориентация в пространстве; навигация; акселерометр; датчик угловых скоростей; гироскоп.

Abstract. The problems of robotics, especially unmanned aerial vehicles, or the interaction of people and machines, an important aspect is the virtual representation of a real object in three-dimensional space for further management, or display information about its location and orientation of the display of the operator. One of the urgent tasks of navigation and positioning an object in three-dimensional space is a problem of finding his orientation in the global coordinate system. Modern technology allows the sensors to produce high precision and low noise, but these sensors cannot be applicable in many cases, because of its price or mass-dimensional parameters. The article will be considered a method of synthesis of indications of relatively cheap and accurate angular rate sensors and acceleration for the most authentic reflection of the actual orientation of the object.

Keywords: spatial orientation; navigation; accelerometer; angular rate sensor; gyroscope.

Для автономного либо ручного управления объектом, в частности беспилотным летательным аппаратом, нужно в первую очередь знать его положение и ориентацию в пространстве, и если для управления в ручную оператор может полагаться на собственные органы чувств, то для автономного управления аппарату нужно иметь виртуальное представление о своем местонахождении и ориентации в глобальной системе координат. И если для позиционирования в ряде задач достаточно знать свое положение с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) с погрешностью в несколько метров[1], что уже достаточно велико, то для ориентации аппарата в пространстве такая система не может обеспечить необходимую точность.

Алгоритм, рассмотренный в статье, позволяет получить информацию об ориентации объекта в трехмерной системе координат с удовлетворительной для ряда задач точностью, например для управления беспилотного летательного аппарата мультироторного типа. Так как передвижение аппарата происходит за счет наклона его в

ту или иную сторону относительно горизонта, то решение задачи угловой ориентации для аппаратов такого типа является необходимой.

Алгоритм основан на синтезе показаний двух датчиков: датчика угловых скоростей и датчика ускорений. В качестве примера было решено использовать микромеханические 16-ти разрядные 3-х осевые цифровые акселерометр и датчик угловой скорости в едином корпусе MPU6050 фирмы InvenSense[2]. В качестве вычислительной платформы – микроконтроллер STM32f407VG06 [3].

Ориентация объекта с прикреплёнными датчиками, проще говоря, углы локальной системы отсчета, связанной с объектом, относительно глобальной системы отсчета в идеальном случае будут определяться простым интегрированием по времени угловых скоростей датчика. Однако помимо интегрирования полезной угловой скорости будет происходить накопление ошибки, и чем дольше будет происходить интегрирование, тем больше будет накапливаться ошибка [4]. Связано это с шумами и

неидеальностью конструкции самого датчика угловых скоростей (ДУС). Поэтому для корректировки показаний ДУС используется датчик ускорений (акселерометр). Референсная система, то есть акселерометр, в качестве корректирующего опорного значения показывает трехмерный вектор ускорения свободного падения. То есть, если знать проекции вектора ускорения свободного падения на каждую из 3-х перпендикулярных осей датчика и считать, что этот вектор всегда направлен вниз, то можно знать о том под каким углом относительно горизонта расположен объект. Но вектор ускорения свободного падения, полученный акселерометром, сильно зашумлен и подвержен искажениям линейных ускорений и вибраций.

На рис. 1 приведены графики показаний ДУС и акселерометра на горизонтально расположенную ось X. Из анализа графиков видно, что акселерометр сильно подвержен шуму, т. е. вектор ускорения свободного падения будет сильно зашумлен, а это значит, что одного акселерометра для получения ориентации объекта недостаточно. ДУС в свою очередь подвержен постоянному дрейфу, который меняется не только со временем, но и с температурой, поэтому угол, полученный с ДУС, нужно обязательно корректировать референсной системой.

В качестве геометрического инструмента ориентации решено выбрать кватернионное отображение в виду своих преимуществ, в частности – линейности, охвату всего оборота на 360 градусов без вырождения осей (как у углов Эйлера), простоте математического представления.

Обобщенная структурная схема одномерного алгоритма представлена на рис. 2.

Нормализованная проекция ускорения свободного падения на ось акселерометра сравнивается с виртуальным прогнозируемым вектором ускорения свободного падения, далее их разность поступает на вход ПИ регулятора, регулятор вырабатывает корректирующее для полученного интегрированием угловой скорости ДУС воздействие, компенсируя дрейф ДУС, на выходе получаем угол относительно глобальной системы координат.

Таким образом, данный алгоритм будет опираться в основном на ДУС, а акселерометр будет вносить только коррекцию. Описанный алгоритм не будет зависеть от вибраций, температуры и будет достаточно точно воспроизводить реальный угол относительно горизонта.

Однако этот метод не лишен недостатков, одним из которых является невозможность корректировки вертикальной оси, так как при повороте вокруг этой оси

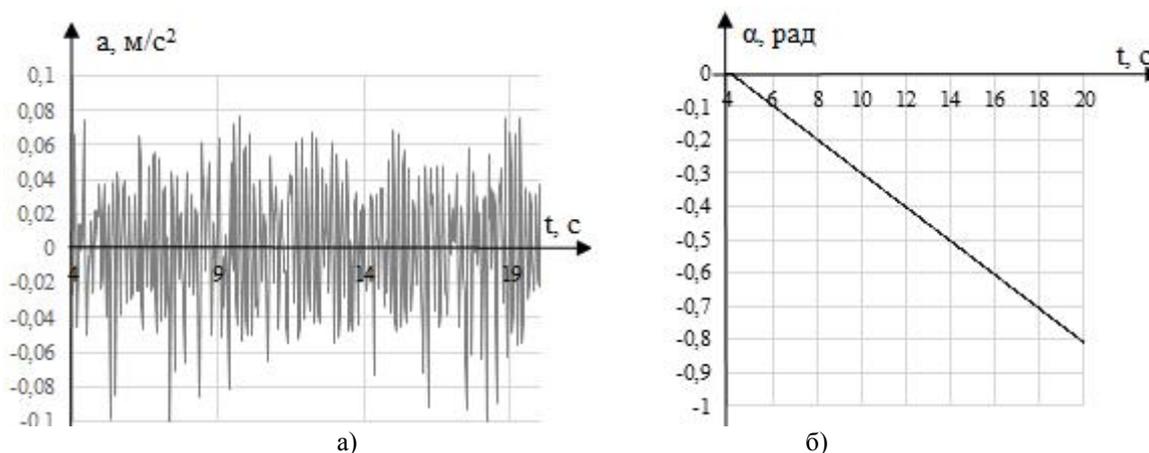


Рис. 1. График показаний акселерометра (а) и проинтегрированной угловой скорости ДУС (б) на ось X

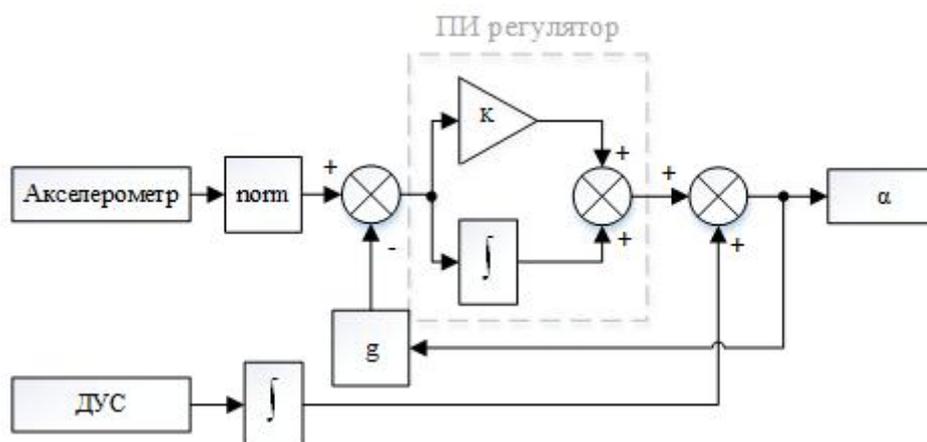


Рис. 2. Структурная схема алгоритма ориентации

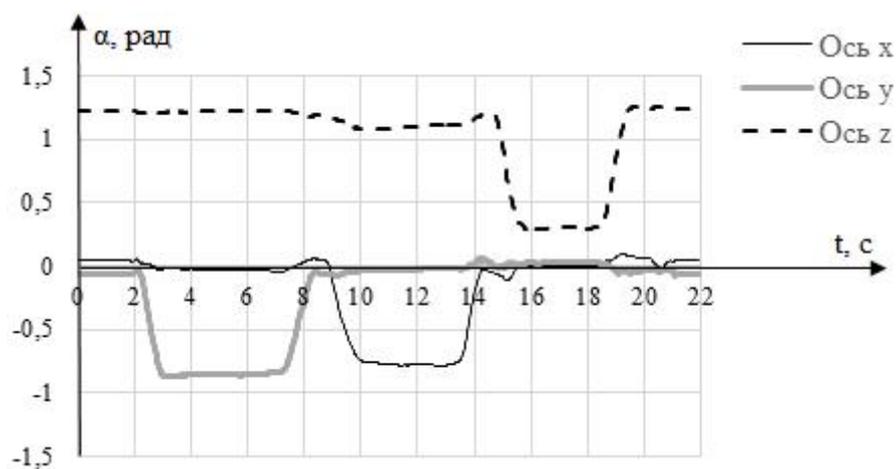


Рис. 3. График полученных с помощью алгоритма углов

проекция вектора ускорения свободного падения не меняется, а значит, угол будет определяться только значением проинтегрированной угловой скорости ДУС, что внесет неправильное представление реальной ориентации. В таких случаях применяют датчик магнитного поля земли, либо корректировка вертикальной оси происходит по курсу ГНСС, что имеет свои нюансы работы и недостатки. Второй недостаток данного алгоритма заключается в том, что если объект движется с линейным ускорением, то проекции вектора ускорения свободного падения на оси акселерометра будут искажены линейным ускорением, а значит, ориентация объекта будет не совпадать с реальной. Для этих случаев применяют корректировку с помощью выделения горизонтальных ускорений из курса ГНСС, однако это выходит за рамки данной статьи.

На рис. 3 показан график полученных углов при последовательном повороте примерно на 45 градусов вокруг каждой оси.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Grewal M. S.** Global positioning systems, inertial navigation, and integration / M. S. Grewal, L. R. Weill, A. P. Andrews // John Wiley and Sons. – 2001, - С. 103-130.
2. **MPU-6050 Datasheet.** – 2011. Режим доступа: <http://www.cdiweb.com/datasheets/invensense/PS-MPU-6000A.pdf>.
3. **STM32F407 Datasheet.** – 2015. - Режим доступа: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.
4. **Tseng S. P.** Motion and Attitude Estimation Using Inertial Measurements with Complementary Filter / S. P. Tseng, W. L. Li, C.Y. Sheng, J.W. Hsu // Control Conference (ASCC). – 2011, - С. 863-868.
5. **IMU Data Fusing: Complementary, Kalman, and Mahony Filter.** – 2013. Режим доступа: <http://www.olliw.eu/2013/imu-data-fusing>.



С 2016 года журнал «Автоматизированные технологии и производства» будет издаваться под эгидой Сибирской секции **Института инженеров по электротехнике и электронике** – международной некоммерческой ассоциации специалистов в области техники, мирового лидера в области разработки стандартов по радиоэлектронике, электротехнике и аппаратному обеспечению вычислительных систем и сетей.

Сегодня IEEE – самая большая в мире научно-техническая организация в области не только непосредственно электротехники и электроники, но также и телекоммуникаций, компьютеров, информационных технологий и др. IEEE издает порядка трети мировой литературы в этих областях, а также является одним из основных мировых разработчиков стандартов.

Сибирская секция IEEE была основана 13 февраля 2003 года, первым председателем Секции был д.т.н., профессор Вячеслав Петрович Шувалов. В России существуют также Российская (Москва) и Северо-Западная (Санкт-Петербург) секции. Сибирская секция является самой большой в мире по занимаемой территории – она охватывает область от Урала до Дальнего Востока. Численный состав – около 300 членов.

Конференции, организуемые при участии Сибирской секции:

1. Biennial IEEE Region 8 Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering “SIBIRCON” (по чётным годам), <http://sibircon2010.sibsutis.ru/>
2. Biennial International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering “APEIE” (Новосибирск, НГТУ, по чётным годам), <http://apeie.conf.nstu.ru/>
3. International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices “EDM” (Эрлагол, база НГТУ, ежегодно), <http://edm.conf.nstu.ru/>.
4. Annual All-Russian Student Paper Contest on Information Security “SIBINFO” (Томск, ТУСУР, ежегодно).
5. Biennial IEEE-Siberian Conference on Communications and Control “SIBCON” (Красноярск, СФУ, по нечётным годам)
6. International Conference "Informatics and Problems of Telecommunications" (Новосибирск, СибГУТИ, ежегодно).
7. Annual student's and doctoral student's competition on lasers and optoelectronics (Новосибирск, НГТУ, ежегодно).

