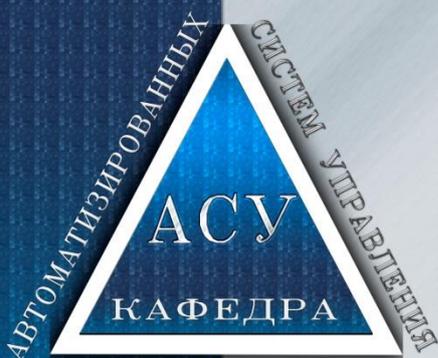


ISSN (Print) 2306-3173  
ISSN (Online) 2413-1601

№ 2(12), 2016

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

AUTOMATION  
OF TECHNOLOGIES AND  
PRODUCTION



# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2 (12) июнь 2016 г.

Международный научно-технический журнал

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

## О журнале

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

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

## Редакция и редакционный совет

### Редакционный совет

*Председатель редакционного совета:*

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

*Заместитель председателя редакционного совета:*

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

*Члены редакционного совета:*

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

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

### Редакция

*Главный редактор:*

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук

*Заместитель главного редактора,*

*ответственный редактор:*

Рябчиков Михаил Юрьевич – кандидат технических наук

*Технический редактор:*

Рябчикова Елена Сергеевна – кандидат технических наук

## Контакты

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

**Редакционная коллегия:** Андреев Сергей Михайлович  
Тел.: (3519) 29-84-32

E-mail: atp@magtu.ru  
Рябчиков Михаил Юрьевич  
Тел.: +79028910112  
E-mail: mr\_mgn@mail.ru

**Дизайн:** Рябчикова Елена Сергеевна

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

Журнал подготовлен к печати издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выходит в свет 06.2016. Тираж 100 экз. Цена свободная.

**Математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов**

*Н.Г. Дружинина,  
О.Г. Трофимова, С.П. Трофимов*  
Модель нечеткого лингвистического регулятора автоинформатора..... 4

*С.С. Добротворский, Е.В. Басова,  
А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.Э. Тонкошкур*  
Перспективы применения передовых технологий в зубообработке конических колес с круговыми зубьями..... 10

*Э.Б. Халтурсунов*  
Математическое обеспечение генерации сетей учреждений обслуживания для условий Приаралья..... 15

**Автоматизированные системы управления технологическими процессами**

*А.Г. Рыбаков, С.М. Андреев, Е.Э. Бодров,  
М.В. Фёдорова, И.С. Бурмистрова*  
Система управления потоками фосфатной руды с целью обеспечения заданного качества..... 19

*К.М. Реймов*  
Определение критерия оптимального распределения активной нагрузки между агрегатами ТЭС ..... 25

*И.Г. Самарина, В.Э. Каюмова*  
Обзор систем регулирования и измерения толщины цинкового покрытия ..... 28

*М.Ю. Рябчиков,  
Е.С. Рябчикова, А.И. Сунаргулова*  
Сэмплинг технологической информации при управлении металлургическими процессами..... 34

**Системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции**

*Ю.И. Кудинов,  
Ф.Ф. Пащенко, А.В. Бухтияров*  
Определение оптимальных параметров аналитического нечёткого ПИД регулятора..... 41

*С.Д. Хайдаров,  
А.Г. Солиев, Ш.Ш. Рустамова*  
Анализ электромеханических колебаний в регулируемой электрической системе..... 48

*А.Н. Рысований*  
Метод получения псевдослучайной последовательности на основе использования матрицы связей в конечном поле GF(3)..... 53

**Mathematical modeling and software productions**

*N.G. Druzhinina,  
O.G. Trofimova, S.P. Trofimov*  
Model of fuzzy linguistic controller of autoinformer ..... 4

*S.S. Dobrotvorsky, E.V. Basova,  
A.A. Klochko, M.Y. Hasano, E. E. Tonkoshkur*  
Prospects for the use of high-end technologies in the processing of bevel gears with circular teeth..... 10

*E.B. Khaltursunov*  
Mathematical software for generating of networks service establishments for the Aral Sea region conditions ..... 15

**Automatic control systems for technological process**

*A.G. Rybakov, S.M. Andreev, E.E. Bodrov,  
M.V. Fedorova, I.S. Burmistrova*  
The management of phosphate ore for the purpose of providing the specified quality ..... 19

*K.M. Reymov*  
The determination of the criteria for optimal distribution active power load between generators on Thermal Power Station ..... 25

*I.G. Samarina, V.E. Kayumova*  
Overview of control systems and measuring the thickness of the zinc coating ..... 28

*M.Yu. Ryabchikov,  
E.S. Ryabchikova, A.I. Sunargulova*  
Sampling in technical data acquisition tasks ..... 34

**Control and management systems for quality and environmental friendliness of production**

*Y.I. Kudinov,  
F.F. Paschenko, A.V. Bukhtiyarov*  
Estimation of the optimal parameters of the analytical fuzzy PID regulator ..... 41

*S.D. Khaydarov,  
A.G. Saliev, Sh.Sh. Rustamova*  
The analysis of electromechanical fluctuations in adjustable electric system ..... 48

*A.N. Rysovaniy*  
The method of receipt of pseudocausal sequence is examined in the eventual field of GF(3), based on the use of matrix of connections as a basic element of generation ..... 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 8-ми.

**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. Рябчиков<sup>1</sup>, В.В. Гребенникова<sup>2</sup>, Е.С. Рябчикова<sup>3</sup>**  
<sup>1,2,3</sup> 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. Ryabchikov<sup>1</sup>, V.V. Grebennikova<sup>2</sup>, E.S. Ryabchikova<sup>3</sup>**  
<sup>1,2,3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia  
<sup>1</sup>mail@mail.ru

пустая строка

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

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

*Abstract, italic. Abstract, italic.*

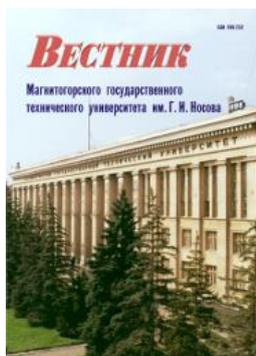
**Keywords:** *keywords; keywords; keywords; keywords; keywords.*

пустая строка

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

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

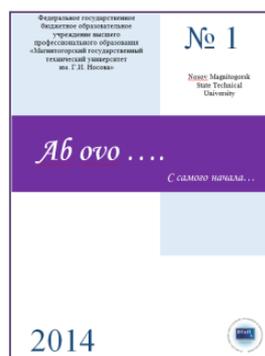
### Другие рекомендуемые периодические издания



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



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК: 004.94+004.89

## МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОГО ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА АВТОИНФОРМАТОРА

Н.Г. Дружинина<sup>1</sup>, О.Г. Трофимова<sup>2</sup>, С.П. Трофимов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ЕМУП Трамвайно-троллейбусное управление, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> НАЧОУВО Уральский институт экономики, управления и права, г. Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup>dng@ettu.ru

**Аннотация.** Представлена модель системы управления автоинформатора общественного транспорта с нечетким регулятором. Цель разработки: обеспечение гибкой настройки системы управления временем начала озвучивания остановки и повышение качества обслуживания пассажиров общественного транспорта. Предложена модель нечеткого регулятора для формирования управляющего сигнала начала объявления остановки. Представлены лингвистические переменные, термы и примеры правил нечеткого логического вывода для работы нечеткого регулятора. В целях сравнения и тестирования предложена модель простого четкого регулятора с использованием программного управления. Проведены численные эксперименты, которые показывают преимущества нечеткого регулятора перед четким регулятором.

**Ключевые слова:** общественный транспорт, автоинформатор, модель нечеткого регулятора, лингвистическая переменная, терм, нечеткий логический вывод, регулятор с программным управлением.

### Актуальность работы

Существует множество устройств и систем информирования пассажиров общественного транспорта [1–11]. В настоящее время подвижные единицы (ПЕ) общественного транспорта ЕМУП ТТУ г. Екатеринбург оснащены специальным оборудованием – планшетным компьютером с навигационным модулем, так называемым многофункциональным навигационным устройством (МФНУ), которое в реальном времени позволяет контролировать параметры движения ПЕ и осуществлять оперативную связь с диспетчером движения городского электротранспорта [12]. МФНУ выполняет функции автоинформатора, спидометра, тахографа. В качестве автоинформатора МФНУ автоматически объявляет название остановки, к которой подъезжает ПЕ. В настоящее время решение о начале объявления остановки принимается на основе спутниковых данных ГЛОНАСС/GPS и специализированного программного обеспечения, в котором содержится маршрут движения ПЕ, вычисляется расстояние до остановки и т.д. Цель разработки: оптимизация работы автоинформатора, обеспечение гибкой настройки системы управления (СУ) временем начала озвучивания остановки и, таким образом, повышение качества обслуживания пассажиров общественного транспорта. Нечеткий логический вывод, основанный на нечетких экспертных правилах и нечетких множествах, эффективно применяется для построения нечетких регуляторов в технических системах [13–19]. В нашем случае управляющий сигнал начала озвучивания остановки формируется нечетким лингвистическим регулятором (НЛР).

### Основные проблемы и решения

Объект – ПЕ, на котором установлен МФНУ (*рис. 1*). Выходные параметры МФНУ-спидометра: расстояние ПЕ до остановки  $s$ , скорость движения ПЕ  $v$ , ускорение движения ПЕ  $a$ . Выходные параметры МФНУ-автоинформатора: длительность объявления остановки  $T_{об}$ . Входные параметры НЛР: ошибка момента объявления остановки  $e$  (разница между текущим временем  $t$  и временем начала объявления остановки  $T_n$ ), расстояние до остановки  $s$ , скорость движения ПЕ  $v$ , ускорение движения ПЕ  $a$ . Выходные параметры НЛР: управляющий сигнал  $u$ , подаваемый на автоинформатор в расчетное время начала объявления остановки, время прибытия ПЕ на остановку  $T_{пр}$ . Конечное время объявления остановки  $T_k$  определяется в виде разности между временем прибытия ПЕ на остановку  $T_{пр}$  и временем для подготовки пассажира к выходу (примем 5 сек). Время начала объявления остановки  $T_n$  определяется в виде разности между временем окончания объявления остановки  $T_k$  и длительностью объявления остановки  $T_{об}$ .

Модель нечеткого управления временем начала автоматического объявления остановки общественного транспорта основано на четких входных данных: расстояние ПЕ до остановки, текущая скорость, ускорение ПЕ и ошибка момента объявления остановки. Расстояние до остановки определяется на основе длины пройденного пути ПЕ и расстояниях между остановками, заложенными в базу данных. Ошибка  $e$  момента объявления остановки определяется как разница между текущим временем и временем начала объявления остановки. С использованием термов лингвистических

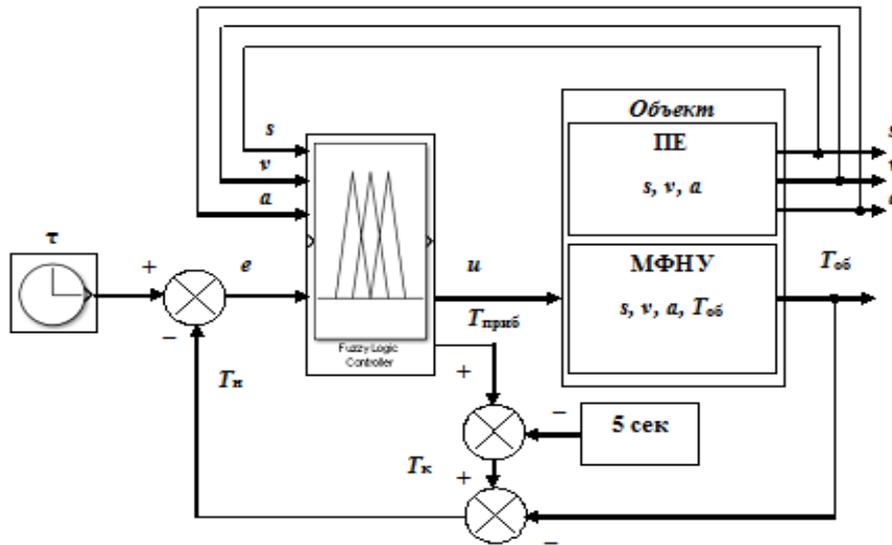


Рис. 1. Схема системы управления с нечетким регулятором

переменных формируются нечеткие оценки расстояния, скорости и ускорения ПЕ и осуществляется расчет момента озвучивания остановки. При этом учитывается длительность озвучивания названия остановки  $T_{об}$ , выраженного в терминах лингвистических переменных. Данные оценки используются для получения истинности посылок лингвистических правил управления моментом начала озвучивания названия остановки. Расчет времени прибытия ПЕ на остановку и времени подачи сигнала на озвучивание остановки производится с помощью правил нечеткого вывода. При этом для каждого правила степень истинности заключения вычисляется в зависимости от степени истинности его посылки.

Будем считать, что терминами лингвистических переменных являются нечеткие множества с функцией принадлежности в виде равнобедренного треугольника. Перечислим лингвистические переменные и их термы. Расстояние и временные интервалы измеряются от текущего положения ТЕ.

1. «Расстояние до остановки» = {«малое» (5–10 м), «среднее» (8–20 м), «большое» (18–25 м)}.
2. «Скорость движения ПЕ» = {«малая» (0–3 м/с), «средняя» (1–6 м/с), «большая» (5–8 м/с)}.
3. «Ускорение движение ПЕ» = {«торможение» (от –2 до –0,5 м/с<sup>2</sup>), «нулевое» (от –1 до +1 м/с<sup>2</sup>), «ускорение» (от +0,5 до +2 м/с<sup>2</sup>)}.
4. «Интервал от окончания объявления остановки до прибытия на остановку» = {«рано» (6–15 с), «норма» (2–8 с), «поздно» (0–4 с)}.
5. «Интервал до прибытия на остановку» = {«долго» (30–50 с), «скоро» (15–35 с), «почти прибыли» (5–20 с), «прибыли» (0–10 с)}.
6. «Ошибка момента объявления остановки» (разница между текущим временем и временем начала объявления остановки) = {«отрицательная» (от –3 до –1 с), «нулевая» (от –2 до +2 с), «положительная» (от +1 до +3 с)}.
7. «Управляющий сигнал начала объявления остановки» = {«не объявлять» (0%÷30%), «скоро объявлять» (20%÷90%), «объявлять» (80%÷100%)}.
8. «Длительность объявления остановки» = {«короткая»

(1–5 сек), «средняя» (3–10 сек), «длинная» (8–15 сек)}.

Примеры функций принадлежности для трех лингвистических переменных (л.п.) представлены на рис. 2–4.

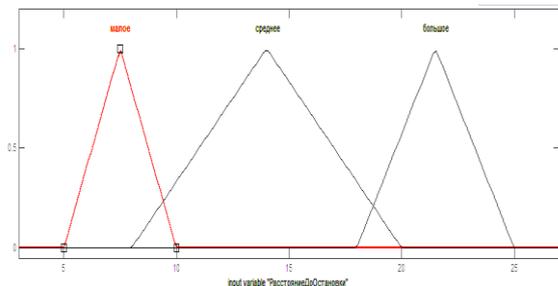


Рис. 2. Функции принадлежности термов л.п. «Расстояние до остановки»

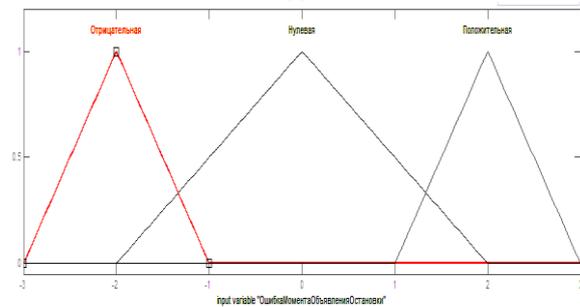


Рис. 3. Функции принадлежности термов л.п. «Ошибка момента объявления остановки»

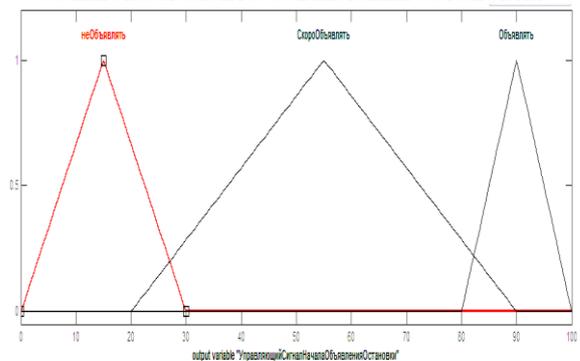


Рис. 4. Функции принадлежности термов л.п. «Управляющий сигнал начала объявления остановки»

Приведем примеры правил нечеткого логического вывода. Общее количество правил значительно больше.

Расстояние до остановки, скорость ПЕ и ускорение ПЕ влияет на время прибытия ПЕ на остановку по следующим правилам:

R1. Если «расстояние до остановки» «большое» и «скорость движения ПЕ» «средняя» и «ускорение движения ПЕ» «ускоряется», то «интервал до прибытия на остановку» «скоро».

R2. Если «расстояние до остановки» «среднее» и «скорость движения ПЕ» «средняя» и «ускорение движения ПЕ» «нулевое», то «интервал до прибытия на остановку» «почти прибыли».

R3. Если «расстояние до остановки» «малое» и «скорость движения ПЕ» «малая» и «ускорение движения ПЕ» «торможение», то «интервал до прибытия на остановку» «прибыли».

Ошибка момента объявления остановки позволяет НЛР сформировать управляющий сигнал начала объявления по следующим экспертным правилам:

M1. Если «ошибка момента объявления остановки» «нулевая», то «управляющий сигнал начала объявления остановки» «объявлять».

M2. Если «ошибка момента объявления остановки» «отрицательна», то «управляющий сигнал начала объявления остановки» «скоро объявлять».

Определение ошибки момента объявления остановки производится по следующим экспертным правилам:

E1. Если «интервал до прибытия на остановку» «почти прибыли» и «длительность объявления остановки» «средняя», то «ошибка момента объявления остановки» «нулевая».

После определения лингвистических переменных и экспертных правил алгоритм нечеткого логического вывода выполняет следующие шаги [20-22]: фаззификация, агрегирование, активация, аккумуляция и дефаззификация. На последнем этапе дефаззификации нечеткий управляющий сигнал, представленный в виде нечеткого логического множества с кусочнолинейной функцией принадлежности, заменяется на четкий управляющий сигнал – «начинать/не начинать озвучивание названия остановки».

### Численный пример работы нечеткого регулятора объявления остановки

Приведем пример работы нечеткого регулятора для следующих четких входных сигналов:

- расстояние до остановки  $s_0 = 18$  м,
- скорость ТС  $v_0 = 2$  м/с;
- ускорение ТС  $a_0 = -0,1$  м/с<sup>2</sup>;
- текущее время  $t_0 = 08$  ч. 00 мин. 30 с;
- длительность объявления названия ближайшей остановки = 6 с.

Для четких входных сигналов рассчитаем функции принадлежности термов лингвистических переменных:

1. «Расстояние до остановки»:  $\mu_{\text{малое}}(18) = 0$ ,  $\mu_{\text{среднее}}(18) = 0,33$ ,  $\mu_{\text{большое}}(18) = 0$ .
2. «Скорость движения ПЕ»:  $\mu_{\text{малая}}(2) = 0,66$ ,  $\mu_{\text{средняя}}(2) = 0,4$ ,  $\mu_{\text{большая}}(2) = 0$ .
3. «Ускорение движение ПЕ»:  $\mu_{\text{торможение}}(-0,1) = 0$ ,  $\mu_{\text{нулевое}}(-0,1) = 0,9$ ,  $\mu_{\text{ускорение}}(-0,1) = 0$ .

4. «Длительность объявления остановки»:  $\mu_{\text{короткая}}(6) = 0$ ,  $\mu_{\text{средняя}}(6) = 0,86$ ,  $\mu_{\text{длинное}}(6) = 0$ .

Проведем агрегирование посылок правил R1-R3. Для правил R1 и R3 значение посылок равно 0. Для правила R2 значение посылки равно 0,33. Поэтому активируем только правило R2 и получаем, что «время прибытия» равно терму «почти прибыли», усеченному по высоте 0,33.

Активируем правило E1. Истинность посылки правила E1 равна  $\min(0,33; 0,86) = 0,33$ . Поэтому истинность заключения E1 принимаем тоже 0,33, то есть истинность утверждения «Ошибка момента объявления остановки» = «нулевая» равна 0,33.

Активируем правило M1. Истинность посылки правила M1 равна 0,33. Поэтому истинность заключения M1 принимаем тоже 0,33, то есть истинность утверждения «Управляющий сигнал начала объявления остановки» = «объявлять» равна 0,33.

Аккумулируем нечеткий выходной сигнал - «Управляющий сигнал начала объявления остановки». Получаем, что функция принадлежности этого сигнала совпадает с термом «объявлять», усеченным по высоте 0,33.

Проведем дефаззификацию нечеткого выходного сигнала по принципу «середины площади». Получаем четкий выходной «управляющий сигнал начала объявления остановки», равный 90%.

Если установить пороговое значение для фактического начала объявления остановки, равное 95%, то для нашего примера в текущий момент  $t_0$  нужно готовиться начинать объявление остановки.

### Численный пример работы четкого регулятора объявления остановки

Сравним два подхода к управлению моментом начала объявления остановки: нечеткий и четкий. Для этого построим модель четкого регулятора, построенного на основе дифференциального уравнения движения ПЕ с использованием текущих входных параметров: расстояние, скорость и ускорение ПЕ. Будем предполагать, что регулятор использует программное управление без обратных связей.

Обозначим путь, пройденный ПЕ от начальной точки,  $s(t)$  и будем искать его в виде  $s(t) = b_2 t^2 + b_1 t + b_0$ . Тогда  $v(t) = 2b_2 t + b_1$ ,  $a(t) = 2b_2$ .

Начальные условия  $s(t_0) = 0$ ,  $v(t_0) = v_0$ ,  $a(t_0) = a_0$ . Дифференцируя дважды функцию  $s(t)$ , получаем  $a_0 = a(t_0) = 2b_2$ , откуда  $b_2 = \frac{a_0}{2}$ . Далее  $v_0 = 2 \frac{a_0}{2} t_0 + b_1$ , откуда  $b_1 = v_0 - a_0 t_0$ .

И наконец,

$$b_0 = -b_2 t_0^2 - b_1 t_0 = -\frac{a_0}{2} t_0^2 - (v_0 - a_0 t_0) t_0 = \frac{a_0}{2} t_0^2 - v_0 t_0$$

Таким образом, находим уравнение движения ТЕ в текущем времени  $t$ :

$$s(t) = \frac{a_0}{2} t^2 + (v_0 - a_0 t_0) t + \left( \frac{a_0}{2} t_0^2 - v_0 t_0 \right)$$

Найдем момент времени  $t_1$  прибытия ТЕ на остановку.

Решим квадратное уравнение  $s(t) = s_0$ , где  $s_0$  – расстояние до остановки в начальный момент  $t_0$ . Вычислим дискриминант:

$$D = (v_0 - a_0 t_0)^2 - 4 \frac{a_0}{2} (-s_0 + \frac{a_0}{2} t_0^2 - v_0 t_0)$$

Тогда

$$t_{1,2} = \frac{-v_0 + a_0 t_0 \pm \sqrt{D}}{a_0}.$$

Подставляя начальные условия  $s_0 = 18$  м,  $v_0 = 2$  м/с,  $a_0 = -0,1$  м/с<sup>2</sup>,  $t_0 = 30$  с, находим  $t_1 = 43,7$ с,  $t_2 = 56,3$ с. Выбираем ближайшее время прибытия на остановку  $t_1 = 43,7$ с. Таким образом, временной интервал до прибытия на остановку  $\Delta t = t_1 - t_0 = 43,7 - 30 = 13,7$ с. Учтем, что длительность объявления названия остановки  $T_{об} = 6$  с, а время от конца объявления остановки до прибытия на остановку планируется 5 с. Тогда временной интервал от текущего момента  $t_0$  до начала объявления остановки равен  $13,7 - 6 - 5 = 2,7$  с. Отсюда вытекает, что скоро (через 2,7с) надо объявлять остановку.

Данный результат вполне согласуется с выводом нечеткого регулятора.

### Заключение

В работе показано, каким образом нечеткий логический вывод может использоваться для управления технической системой автоинформатора.

Нечеткие регуляторы имеют ряд преимуществ перед четкими регуляторами. В их числе: учет опыта операторов и водителей, обобщенный в правилах нечеткого вывода; возможность настройки нечеткого регулятора в ходе эксплуатации путем увеличения и модификации правил вывода. Среди недостатков четкого регулятора отметим повышенную чувствительность к возмущениям входных параметров (расстояние, скорость, ускорение). Предложенная модель четкого регулятора построена на программном управлении и не использует обратных связей, которые сложно описать математически.

В то же время, мы считаем важным разработку четкого аналога, который можно использовать для тестирования нечетких регуляторов в идеальных условиях отсутствия помех.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дереха Л.С., Меремкулов А.К., Харитонов С.А. Мобильный навигационный терминал // Патент России на полезную модель № 75491. 2008.
2. Интерактивная геоинформационная система «Пилигрим» / Меремкулов А.К. и др. // Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2007614930. 2007.
3. Интерактивная геоинформационная система «Сириус Навигатор» / Животченко В.С. и др. // Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2010614154. 2010.
4. Сервер интерактивной геоинформационной системы «Сириус Навигатор» / Меремкулов А.К. и др. // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010616169. 2010.
5. Автоинформатор «Сириус» / Животченко В.С. и др. // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2012613393. 2012.
6. Программный комплекс «Автоинформатор» для WinCE (устанавливается на GPS навигатор). – URL: [https://www.fl.ru/users/m\\_d\\_m/viewproj.php?prjid=3359894](https://www.fl.ru/users/m_d_m/viewproj.php?prjid=3359894) (дата обращения 10.05.2016).
7. Токмаков А. А. Способ информационного обеспечения пассажиров общественного транспорта и устройство для информационного обеспечения пассажиров общественного транспорта // Патент России №2411591. 2011. Бюл. №4.
8. Макаров В.М. Способ информационного обеспечения пассажиров общественного транспорта // Патент России №2275691. 2006. Бюл. №12.
9. Информационно-навигационная система для метрополитенов «АРКУДА НАВИ» («АРКУДА НАВИ») / Правообладатель: ЗАО «АМТ-ГРУП» // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2015660839. 2015.
10. Автоматизированная система информирования пассажиров наземного транспорта. Клиент («Навитранс.Информирование.Клиент») / Правообладатель: ООО «ТрансНавиСофт» // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2016611713. 2016.
11. Информационная система по планированию и мониторингу работы автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта, осуществляющего регулярную перевозку пассажиров и багажа / Ромашенко С.Ю. и др. // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2016612377. 2016.
12. Дружинина Н.Г. Многофункциональное навигационное устройство водителя общественного транспорта / Н.Г. Дружинина, О.Г. Трофимова // Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления: сборник докл. Международной конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 144-120.
13. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. MATLAB.EXPONENTA / Проектирование систем управления / Fuzzy Logic Toolbox. – URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/> (дата обращения 10.05.2016).
14. Novák, V. Logical structure of fuzzy IF–THEN rules / V. Novák, S. Lehmke // Fuzzy Sets and Systems. – 2006. – vol. 157 (15). – P. 2003-2029.
15. Perfilieva, I. System of fuzzy relation equations as a continuous model of IF–THEN rules / I. Perfilieva, V. Novák // Information Sciences – 2007. – vol. 177(16). – P. 3218-3227.
16. Кудрявцев В.С., Страшинин Е.Э., Лисиенко В.Г. Способ нечеткого управления движением подвижного состава рельсового транспортного средства с возможностью плавного управления тягой // Патент России. №2296357. 2007. Бюл. №9.
17. Муравьева Е.А., Каяшева Г.А. Нечеткий регулятор с лингвистической обратной связью для управления технологическими процессами // Патент России. №2309443. 2007. Бюл. №30.

18. Каяшев А.И. Структурная схема нечеткого регулятора на основе лингвистических переменных с четкими терминами / А.И. Каяшев, Е.А. Муравьева, Г.А. Каяшева // Программные продукты и системы. – 2008. №4. – С. 34. – URL: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=1634> (дата обращения 10.05.2016).
19. Еремин Е. Л., Климец Ю.Л., Теличенко Д.А. Программа расчета и моделирования нечетких систем для объектов с запаздыванием по управлению // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2014614606. 2016.
20. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
21. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях: учебник / Л.С. Болотова. – М.: Финансы и статистика, 2012. – 664 с.
22. 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.

## MODEL OF FUZZY LINGUISTIC CONTROLLER OF AUTOINFORMER

N.G. Druzhinina<sup>1</sup>, O.G. Trofimova<sup>2</sup>, S.P. Trofimov<sup>3</sup>

Tram and Trolleybus Management, Yekaterinburg, Russia

Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Ural Institute of Economics, Management and Law, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** The article presents a model of a fuzzy control system of autoinformer of public transport. The purpose of the development is providing flexible adjustment of the start time of pronunciation of tram's stop name and improving the quality of service for public transport passengers. A model of fuzzy controller for generating a control signal for starting of pronunciation is developed. Presented the linguistic variables, terms and examples of fuzzy logical rules. For comparison purposes, a model of a simple classic program controller is presented. Numerical experiments show the advantages of fuzzy controller.

**Keywords:** public transport, autoinformer, model of fuzzy controller, linguistic variable, term, fuzzy inference, programmable controller.

### REFERENCES

1. Dereka L.S., Meremkulov A.K., Haritonov S.A. *Mobil'nyj navigacionnyj terminal* [Mobile navigation terminal]. Patent RF, no. 75491. 2008.
2. Meremkulov A.K. et al. *Interaktivnaya geoinformacionnaya sistema «Pilgrim»* [Interactive geographic information system «Pilgrim»]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2007614930. 2007.
3. ZHivotchenko V.S. et al. *Interaktivnaya geoinformacionnaya sistema «Sirius Navigator»* [Interactive geographic information system «Sirius Navigator»]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2010614154. 2010.
4. Meremkulov A.K. et al. *Server interaktivnoj geoinformacionnoj sistemy «Sirius Navigator»* [Server interactive geographic information system «Sirius Navigator»]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2010616169. 2010.
5. ZHivotchenko V.S. et al. *Avtoinformator «Sirius»* [Autoinformer «Sirius»]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2012613393. 2012.
6. *Programmnyj kompleks «Avtoinformator» dlya WinCE (ustanavlivaetsya na GPS navigator)* [The software package "answering machine" for WinCE (it is installed in the GPS Navigator)]. Available at: [https://www.fl.ru/users/m\\_d\\_m/viewproj.php?prjid=3359894](https://www.fl.ru/users/m_d_m/viewproj.php?prjid=3359894) (accessed 10 May 2016).
7. Tokmakov A. A. *Sposob informacionnogo obespecheniya passazhirov obshchestvennogo transporta i ustrojstvo dlya informacionnogo obespecheniya passazhirov obshchestvennogo t transporta* [Method of information provision of public transport and a device for providing information for public transport passengers]. Patent RF, no. 2411591. 2011.
8. Makarov V.M. *Sposob informacionnogo obespecheniya passazhirov obshchestvennogo transporta* [Method of information support of public transport passengers]. Patent RF, no. 2275691. 2006.
9. *Informacionno-navigacionnaya sistema dlya metropolitenov «ARKUDA NAVI» («ARKUDA NAVI»)* [Information and navigation system for metro ARKUDA NAVI ("ARKUDA NAVI")]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2015660839. 2015.
10. *Avtomatizirovannaya sistema informirovaniya passazhirov nazemnogo transporta. Klient («Navitrans.Informirovanie.Klient»)* [Automated system informing passengers of ground transportation. Client ("Navitrans.Informing.Client")]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2016611713. 2016.
11. Romashchenko S.YU. et al. *Informacionnaya sistema po planirovaniyu i monitoringu raboty avtomobil'nogo transporta i gorodskogo nazemnogo ehlektricheskogo transporta, osushchestvlyayushchego reguljarnuyu perezozku passazhirov i bagazha* [Information system for planning and monitoring of road transport and urban surface electric transport, carrying out regular carriage of passengers and Luggage]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2016612377. 2016.
12. Druzhinina N.G., Trofimova O.G. *Mnogofunkcional'noah navigacionnoe ustrojstvo voditelya obshchestvennogo transport* [Mnogofunkcional'noe navi-

- gacionnoe ustrojstvo voditelya obshchestvennogo transporta], *Trudy "Informacionnye tekhnologii, telekommunikacii i sistemy upravleniya"* [Proc. "Information technology, telecommunications and control systems"], Ekaterinburg, 2015. pp. 144-120.
13. SHtovba S.D. *Vvedenie v teoriyu nechetkih mnozhestv i nechetkuyu logiku. MATLAB.EXPONENTA/Proektirovanie sistem upravleniya/Fuzzy Logic Toolbox* [Introduction to the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. MATLAB.EXPONENTA/control systems/Fuzzy Logic Toolbox]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/> (accessed 10 May 2016).
  14. Novák, V., Lehmke, S. Logical structure of fuzzy IF–THEN rules. *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, vol. 157. pp. 2003-2029.
  15. Perfilieva, I., Novák, V. System of fuzzy relation equations as a continuous model of IF–THEN rules. *Information Sciences*, 2007, vol. 177(16). pp. 3218-3227.
  16. Kudryavcev V.S., Strashinin E.E.H., Lisienko V.G. *Sposob nechetkogo upravleniya dvizheniem podvizhnogo sostava rel'sovogo transportnogo sredstva s vozmozhnost'yu plavnogo upravleniya tyagoy* [Method of fuzzy traffic control of a rolling stock rail vehicle with smooth traction control]. Patent RF, no. 2296357. 2007.
  17. Murav'eva E.A., Kayasheva G.A. *Nechetkij regulyator s lingvisticheskoy obratnoj svyaz'yu dlya upravleniya tekhnologicheskimi processami* [Fuzzy logic controller with linguistic feedback for control of technological processes]. Patent RF, no. 2309443. 2007.
  18. Kayashev A.I., Murav'eva E.A., Kayasheva A.I. Structural scheme of a fuzzy controller based on linguistic variables with discrete terms [Strukturnaya skhema nechetkogo regulyatora na osnove lingvisticheskikh peremennykh s chetkimi termami], *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2008 no. 4, p. 34 (available at: <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=1634>).
  19. Eremin E. L., Klimec YU.L., Telichenko D.A. *Programma rascheta i modelirovaniya nechetkih sistem dlya ob"ektov s zapazdyvaniem po upravleniyu* [The solver and modeling of fuzzy system for objects with delay management]. The certificate of state registration of computer programs, no. 2014614606. 2016.
  20. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH], St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2003, 736 p.
  21. Bolotova L.S. *Sistemy iskusstvennogo intellekta: modeli i tekhnologii, osnovannye na znaniyah: uchebnik* [Artificial intelligence systems: models and technologies based on knowledge: study book], Moscow, Finansy i statistika, 2012, 664 p.
  22. Polko P.G., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.Yu., Andreev S.M., Parsunkin B.N. Algorithm of indistinct management for synthesis of digital contours of automatic stabilization of technological parameters [Algoritm nechetkogo upravleniya dlya sinteza cifrovyykh konturov avtomaticheskoy stabilizacii tekhnologicheskikh parametrov], *Avtomatizaciya v promyshlennosti* [Automation in the industry], 2010, no. 11, pp. 32-37.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗУБООБРАБОТКЕ КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ

С.С. Доброворский<sup>1</sup>, Е.В.Басова<sup>2</sup>, А.А. Клочко<sup>3</sup>, М.И. Гасанов<sup>4</sup>, Е.Э. Тонкошкур<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,4,5</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г.Харьков, Украина

e.v.basova@list.ru<sup>2</sup>

**Аннотация.** Представлена методика изготовления унифицированных конических колес с круговым зубом, которая не зависит от особенностей зубообрабатывающих станков. Рассмотрены перспективы применения многокоординатных обрабатывающих центров для качественного изготовления деталей такого типа. Приведены перспективные решения применения современных средств автоматизации проектных работ с целью оптимизации процесса качественного изготовления конических колес с круговыми зубьями.

**Ключевые слова:** коническое колесо, круговой зуб, качество, точность, высокоскоростная обработка, твердотельное моделирование, параметрический анализ.

### Актуальность работы

Современное машиностроение характеризуется повышением требований к качеству и точности изготовления сложных поверхностей деталей. Особый интерес представляет изготовление зубьев колёс, которые в процессе эксплуатации подвержены длительным переменным и динамическим напряжениям, ударным нагрузкам, поэтому требуют повышения нагрузочной способности с одновременным обеспечением чистоты рабочих поверхностей и качества поверхностного слоя. Кроме того для обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции возникла острая необходимость в одновременном снижении ее себестоимости. В условиях развития единичного и мелкосерийного производства эта задача решается за счет использования современных высокоскоростных многокоординатных обрабатывающих центров (ОЦ), на которых деталь проходит полный цикл обработки. Особый интерес и одновременно сложность представляет область качественной обработки поверхностей зубчатых конических колес с круговыми зубьями.

### Основные проблемы и решения

Зубчатые конические колеса с круговыми зубьями позволяют плавно и бесшумно передавать большие нагрузки при высоких скоростях. Поэтому они широко используются в машино- и авиастроительной промышленности. Анализ работ, посвященных изучению влияния усталостной прочности и разрушений рабочих поверхностей зубчатых колёс [1-4], дал понимание того, что рабочие поверхности зуба в процессе эксплуатации подвергаются комплексу динамических, знакопеременных ударных нагрузок. Это ведет к постоянной смене напряженно-деформированного состояния зуба, которое вызывается нелинейностью процесса деформации, и является первопричиной протекания деструктивных процессов в материале. При этом происходит наложение специфики сопротивления материала колеса усталости с

учетом влияния поверхностного слоя, его микро и макроструктуры [5]. Однако переменные напряжения, кроме прочего, являются первопричиной возникновения эрозионных и коррозионных процессов, которые ведут к снижению сопротивления зубчатого колеса усталости.

Целью представляемой работы является описание возможности изготовления зубчатого конического колеса с круговыми зубьями на многокоординатных обрабатывающих центрах.

Технология изготовления зубчатых конических колес с круговыми зубьями очень сложная и требует постоянного взаимосогласования большого количества наладочных параметров, что в свою очередь приводит к появлению задачи постоянного пересчета геометрических параметров пары для обеспечения необходимого пятна контакта и к многократным пробам изготовления качественного экземпляра.

Таким образом, для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- рассмотреть возможность качественного изготовления зубчатых конических колес с круговыми зубьями на базе ОЦ, что позволит контролировать зону касания при изготовлении звеньев зубчатой пары;
- оптимизировать процесс изготовления зубчатых конических колес с круговыми зубьями для обеспечения качества и геометрических параметров поверхности зуба.

Решение поставленных задач предполагает качественное твердотельное проектирование модели исследуемого объекта, его оптимизации и подготовку к изготовлению с помощью современных систем автоматизации проектных работ (CAD/CAM/CAE).

Необходимо отметить, что вопросом описания геометрии зубчатых конических колес с круговыми зубьями занимаются исследователи всего мира, однако готовые решения, в основном, носят коммерческий характер [6].

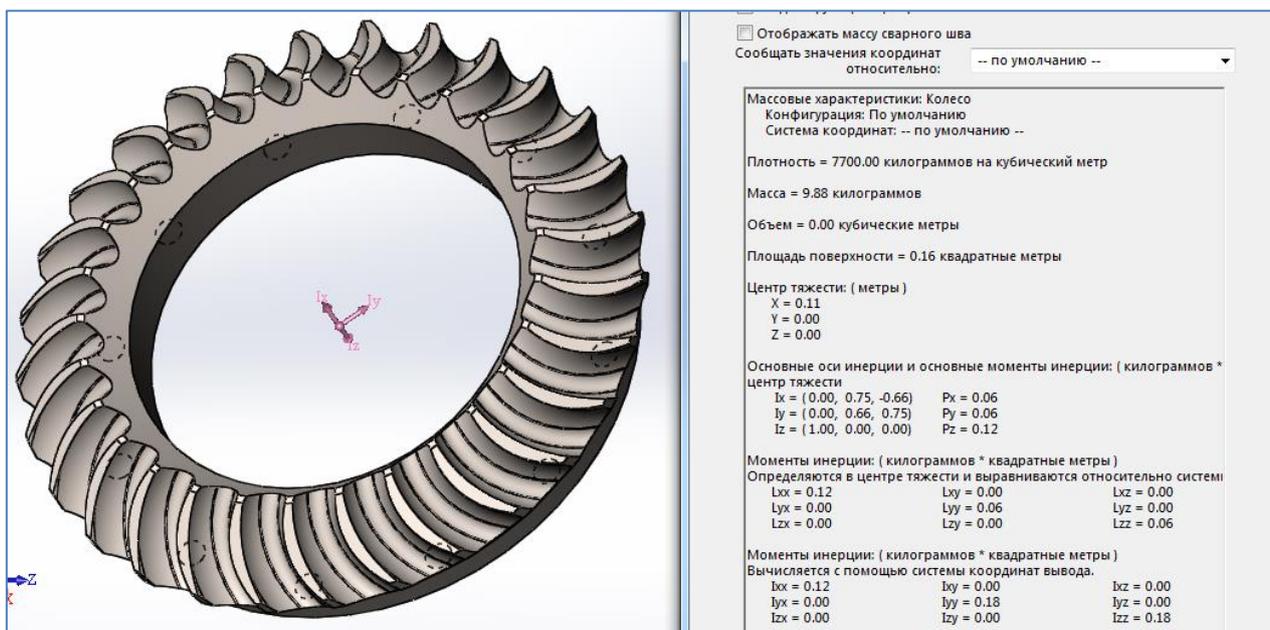


Рис. 1. Твёрдотельная модель зубчатого конического колеса с круговым зубом

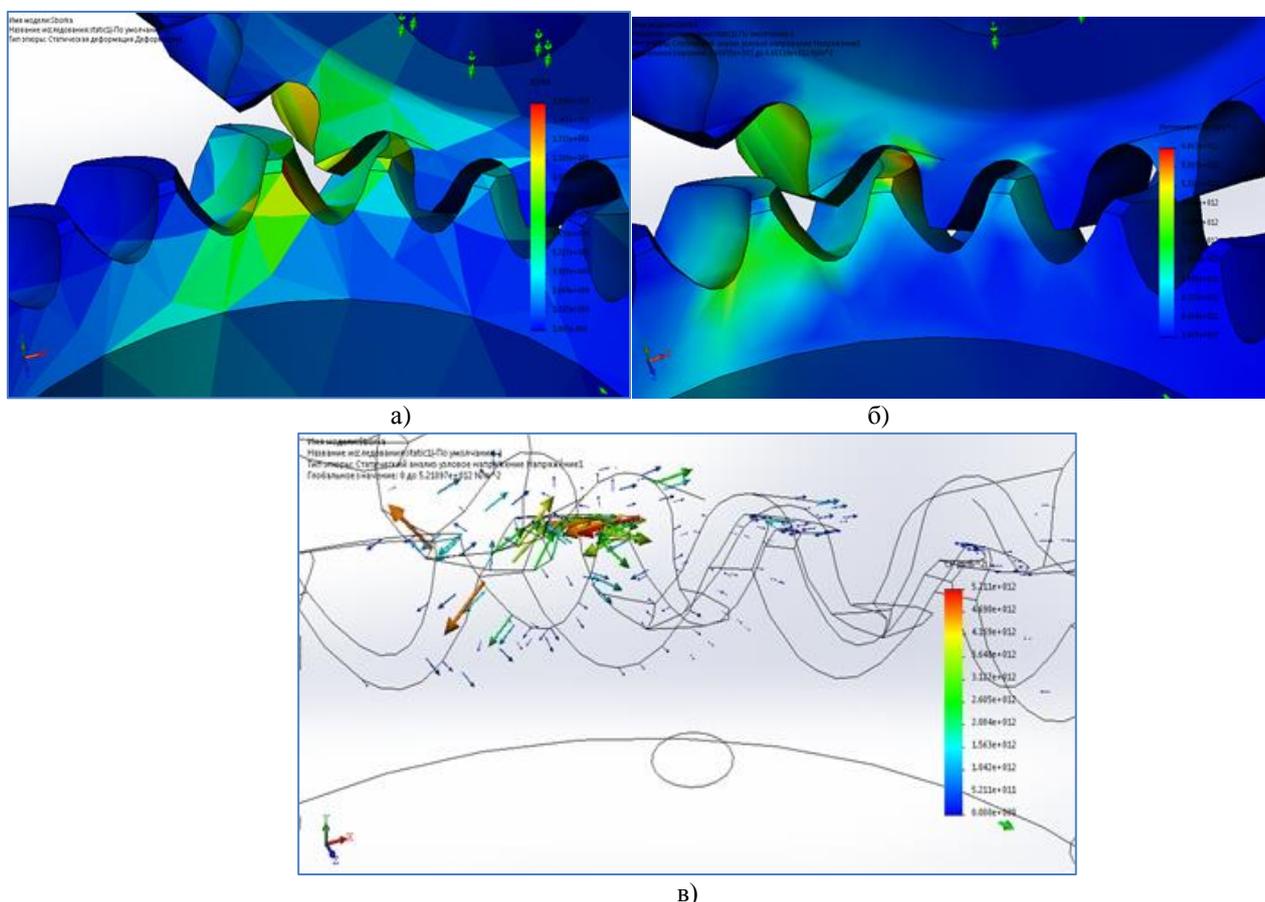
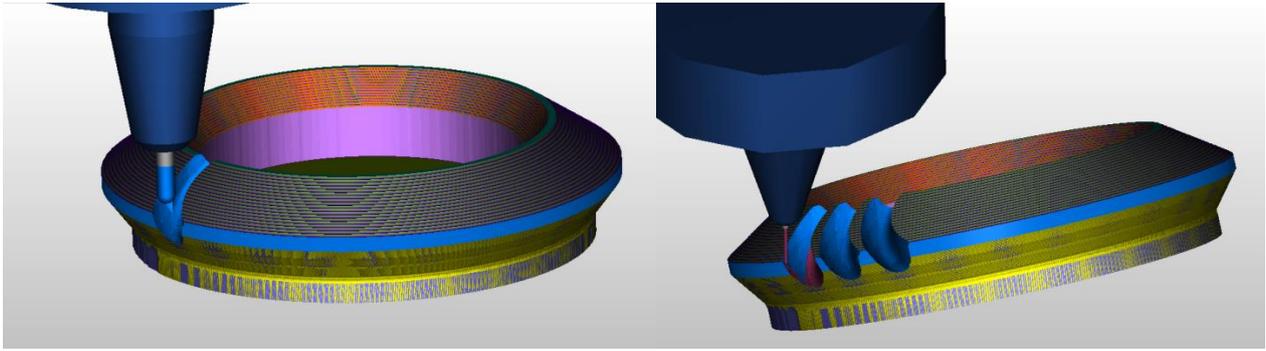


Рис. 2. Параметрический анализ зубчатого зацепления:  
 а) эпюра эквивалентной деформации в паре; б) эпюра интенсивности напряжений в паре;  
 в) эпюра контактного давления в паре

Высокие требования к твердотельной модели обусловлены требованиями к конечному продукту. Поэтому в качестве пакета CAD моделирования мы воспользовались SolidWorks (рис. 1).

Для оптимизации деталей в паре выполнен ее параметрический анализ (рис. 2).

Благодаря реализации управления некоторыми параметрами мы смогли подобрать оптимальную конфигурацию проектируемого зацепления при определенных внешних нагрузках и оптимизировать его конструкцию.



**Рис. 3. Верификация спроектированных траекторий**

Результатом работы, направленной на оптимизацию зубчатых конических колес с круговыми зубьями, является автоматизированный расчет допустимых параметров проектируемой детали с учетом заранее известных ограничений (внешних факторов). Проведенные компьютерные исследования позволили сократить время на проектирование и расчет конструкции детали, оптимизировать характеристики детали, относительно ее массы, габаритов в целом и отдельных элементов. Кроме того анализ позволил определить и скорректировать зону касания зубчатого зацепления.

Для решения задачи подготовки управляющей программы и верификации траекторий перемещения режущего инструмента при обработке зубчатого колеса на ОЦ был использован программный продукт FeatureCAM. Установлено, что для обеспечения точности изготовления зубчатых конических колес с круговыми зубьями необходимо обеспечить точность позиционирования инструмента и точность траектории его перемещения.

Как отмечалось выше, для построения точной траектории перемещения в САМ системе, необходимо иметь качественную твердотельную модель, что становится возможным только при наличии исходной геометрии объекта в виде массива точек или группы кривых. Кроме того при локальном изменении траектории перемещения режущего инструмента, вследствие изменения 3D-модели изделия, перспективным является именно применение кривых высокого порядка.

Для определения оптимальной степени кривой, нами были проведены ряд исследований с применением программного приложения DrawStyle. В ходе исследований был проведен ряд переборов вариантов, с целью определения необходимой степени кривой и количества контрольных вершин между крайними точками контрольного полигона. В результате анализа рациональной степени spline-кривых установлено, что наиболее адекватной является 5 степень [7]. Так как описание траектории режущего инструмента кривыми 3-го порядка не позволяет получить высокой точности, а 6-ой, 7-ой и выше порядки характеризуются большим количеством ошибок, при сшивке сегментов сплайна (подробными исследованиями в этом вопросе занимался Е.Н. Бут на базе Харьковского авиационного института и Харьковского государственного авиационного производственного предприятия).

Результатом применения САМ программы стала разработка и корректировка траекторий переходов, что

позволило значительно сократить время обработки, повысить стойкость инструмента и т.д. Верификация разработанных траекторий (рис.3), дала основание предположить, что они позволят точно обработать сложные поверхности зуба и избежать «зарезов» детали, столкновения инструмента с рабочими органами оборудования.

Перед изготовлением проектируемой детали была проведена оптимизация технологических режимов обработки, по ниже приведенному алгоритму, с учетом свойств обрабатываемого материала и материала режущего инструмента с целью получения требуемого качества поверхностей конических колес с круговыми зубьями (рис. 4).

Результатами проведенных работ в CAD/CAE/CAM модулях стало качественное изготовление проектируемого конического колеса с круговым зубом (рис. 5).

Реализация такой технологии перспективна в условиях единичного и мелкосерийного производства.

### **Заключение**

В результате выполненных работ получили методу изготовления унифицированных конических колес с круговым зубом, которая не зависит от особенностей зубообрабатывающих станков. Подтвердили возможность качественного изготовления такого вида колес на современном многокоординатном оборудовании с обеспечением требуемых геометрических и качественных характеристик объекта.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Елисеев Ю.С. Научные основы совершенствования технологии изготовления зубчатых колёс ГТД / Ю.С. Елисеев // Научно-технический журнал "Двигатель", Москва, 2001. – №4 (16). – С. 10-14.
2. Колодяжный П.В. Анализ эксплуатационных повреждений зубчатых колёс тепловозов, изготовленных по различной технологии / П.В. Колодяжный // Вісник СНУ ім. Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2011. – №4 (158). – Ч.2. – С. 84-90.
3. Баханович А.Г. Сравнительный анализ усталостной прочности зубьев приводных зубчатых ремней [Текст] / А.Г. Баханович, И.И. Сидоренко, Э.Д. Кравцов // Праці Одеського політехнічного університету. – 2011. – №1(35). – С. 32-35.



Рис. 4 Алгоритм оптимизации технологических параметров изготовления объекта



Рис. 5. Изготовление конического колеса с круговым зубом в условиях производства

4. Мельников В. З. Комплексное повышение качества зубчатых передач на основе традиционных и новых технологий [Текст] / В.З. Мельников // Машиностроитель. – 2003. – № 3. – С. 22-25.
5. Локтев Д.А. Современные методы контроля качества цилиндрических зубчатых колес [Текст] / Д.А. Локтев // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия: Металлообработка. – Х.: ЦентрИнформ, 2009. – № 4. – С. 6-11.
6. 3d gear MODELING – URL: <http://www.spiralbevel.com/>
7. Басова Е.В. Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дис... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с. – Библиогр. : с. 214–226.

## PROSPECTS FOR THE USE OF HIGH-END TECHNOLOGIES IN THE PROCESSING OF BEVEL GEARS WITH CIRCULAR TEETH

S.S. Dobrotvorsky<sup>1</sup>, E.V. Basova<sup>2</sup>, A.A. Klochko<sup>3</sup>, M.Y. Hasano<sup>4</sup>, E. E. Tonkoshkur<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,4,5</sup> National Technical University " Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine

**Abstract.** The technique of manufacturing of uniform bevel gears with circular tooth, which does not depend on the characteristics of gear-cutting machines, was presented. The prospects of the use of multi-axis machining centers for high-quality production of this type parts were described. Innovative solutions using modern means of design work automation in order to optimize the process of manufacturing high-quality bevel gears with circular teeth were discussed.

**Keywords:** angular wheel, circle-arc tooth, quality, precision, high-velocity manufacturing, solid state modeling, parameter analysis.

### REFERENCES

1. Eliseev Yu.S. Scientific bases of perfection technology gears GTD manufacturing [Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya tekhnologii izgotovleniya zubchatykh koles GTD], *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal "Dvigatel"* [The Editorial Staff of the "Engine" Journal], Moscow, 2001, no4(16), pp. 10-14.

- 
2. Kolodyazhnyy P.V. Analysis of operational damage gears locomotives manufactured by different technologies [Analiz ekspluatatsionnykh povrezhdeniy zubchatykh koles teplovozov, izgotovlennykh po razlichnoy tekhnologii], *Visnyk SNU im. Dalia.* [Of the Volodymyr Dal East Ukrainian National University], Luhansk, 2011, no4(158), T.2, pp. 84-90.
  3. Bakhanovich A.G., Sidorenko I.I., Kravtsov E.D. The comparative analysis of fatigue strength of teeth of drive toothed belts [Sravnitel'nyy analiz ustalostnoy prochnosti zub'yev privodnykh zubchatykh remney]. *Pratsi Odesko-ho politekhnichnoho universytetu* [Odes'kyi Politechnichniy Universytet Pratsi], 2011, no1(35), pp.32-35.
  4. Melnykov V. Z. Comprehensive improvement of the gears quality on the basis of traditional and new technologies [Kompleksnoe povushenye kachestva zubchatukh peredach na osnove tradytsionnykh y novykh tekhnolohiy], *Mashinostroitel'* [Mechanician], 2003, no3, pp.22-25.
  5. Loktev D.A. Modern Methods of Quality Control of Cylindrical Gears [Sovremennyye metody kontrolya kachestva tsilindricheskikh zubchatykh] koles, *Oborudovaniye i instrument dlya professionalov. Seriya: Metalloobrabotka* [Equipment And Tools For Professionals, Metalworking Series], Kharkov, 2009, no4, pp.6-11.
  6. [http://www.spiralbevel.com/3d gear modeling](http://www.spiralbevel.com/3d-gear-modeling)
  7. Basova E.V. Technological support surface quality and precision elements made of hardened chrome-molybdenum steel by high-speed milling [Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti poverkhnostey detaley iz zakalennykh khromomolibdenovykh staley metodom vysokoskorostnogo frezerovaniya]:... dis.... kand. tekhn. nauk : 05.02.08 / Basova Evgeniya Vladimirovna. – Kharkov, 2014. – 236 p. – Bibliogr. : pp. 214–226.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ СЕТЕЙ УЧРЕЖДЕНИЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПРИАРАЛЬЯ

Э.Б. Халтурсунов

«Туринский Политехнический Университет», г.Ташкент, Узбекистан

7-lucky@mail.ru

**Аннотация.** Излагается модульная структура математического и программного обеспечения системы генерации вариантов сетей учреждений обслуживания (на примере сети школ, учреждений здравоохранения и т.д.) для условий Приаралья, т.е. с низкой плотностью населения, и оценка проектных решений для выбора лучшего из них на базе многоуровневой, многокритериальной оценки их показателей, на основе технологии функционально-ориентированного проектирования прикладных программных систем.

**Ключевые слова:** строительные нормы и правила (СНиП), сети учреждений обслуживания (УО), одноуровневая сеть, многоуровневая сеть, функциональные модули (ФМ), оригинальные модули (ОМ), программное обеспечение (ПО).

### Актуальность работы

Специфика Приаралья – низкая плотность населения, что характеризуется малой численностью жителей населенных пунктов и большими расстояниями между ними, и специфика заболеваний не позволяют разворачивать полноценные (особенно на первом уровне) сети учреждений обслуживания, отвечающие методике их организации в градостроительном проектировании и строительным нормам и правилам (СНиП).

Так при проектировании многоуровневой поликлинической сети сельских районов [1], на первом уровне обслуживания, приходится, вместо поликлиники или амбулатории на несколько медицинских специальностей, размещать СВА (сельская врачебная амбулатория) на одного врача, который в данном случае должен владеть знаниями терапевта, хирурга, педиатра и акушера-гинеколога. В результате нарушаются нормативы СНиП по организации многоуровневого обслуживания, которые приходится корректировать, с одной стороны, и включать в технико-экономические показатели сети капитальные затраты по СВА эксплуатационные затраты по передвижению больных от СВА к зональным поликлиникам.

При проектировании школьной сети, согласно закона Республики Узбекистан об образовании [2], в котором принята двухуровневая организация сети (1-4 классы – первый уровень обучения и 1-9 классы – общее среднее образование) и ликвидация школьных интернатов, приходится размещать даже очень малые по емкости школы (20-40 ученических мест) для 1-го уровня обучения. Такие школы объединяют с детскими садами. Типовые проекты таких школ разработаны проектными институтами Госкомархитекстроя РУз. В результате необходимо для доставки учащихся 2-го уровня к средним школам вводить школьный автобус.

В показателях варианта организации школьной сети, кроме технико-экономических показателей, в которые включаются все виды расходов по школьным автобусам и школам 1-го уровня обучения, появляются такие градостроительные показатели, как количество крупных и больших по емкости школ в сети, процент детей обучающихся в них, максимальный перевозимый поток

школьников, максимальная длина поездки и т.д.

Вышесказанное предопределило создание математического аппарата генерации вариантов организации сетей учреждений обслуживания различного назначения, учитывающие вышеприведенные требования, и многопараметрической, многокритериальной, многоуровневой оценки показателей вариантов с целью определения оптимального.

### Основные проблемы и решения

Сети учреждения обслуживания (УО) сами по себе являются неотъемлемой частью любого города или сельской местности, а их качество функционирования и месторасположения в особенности играет не маловажную роль для каждого жителя.

УО многообразны как по уровням обслуживания, назначению, так и по специфике функционирования. На базе изучения процессов функционирования учреждений обслуживания – рис. 1 (двухуровневая школьная сеть (блок 1), многоуровневые амбулаторно-поликлиническая сеть (блок 2) и сеть многопрофильных больниц (блок 3), одноуровневая сеть многоэтажных гаражей индивидуального автотранспорта (блок 4) предложен математический аппарат генерации вариантов организации сетей УО который реализует триединую задачу (определение необходимого количества, мест размещения, зон обслуживания и мощности УО на каждом уровне обслуживания) характерной для данного класса задач. Хотя он различен в зависимости от рассматриваемых УО (алгоритм определения наименьшего внешне устойчивого множества графа, симплекс-метод линейного программирования, алгоритм случайного поиска и др.), однако во всех случаях стержневым является алгоритм определения наименьшего внешне устойчивого множества графа, модификация которого разработана применительно к данному классу задач [2].

Программное обеспечение разрабатываемой системы, как принято в САПР [3], состоит из общего (системного) и специального. Общее программное обеспечение системы это операционная система ЭВМ, т.е. все существующие программы, включенные в

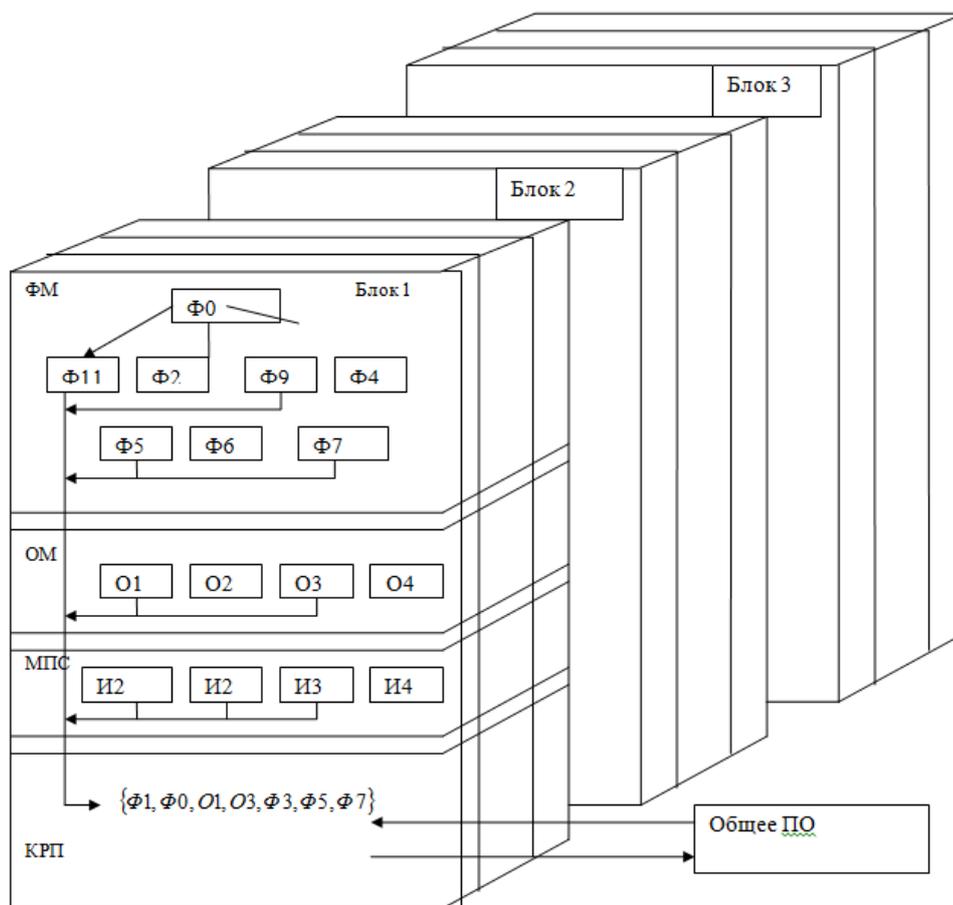


Рис 1. Укрупненная структура специального ПО системы

математическое обеспечение ЭВМ. Специальное программное обеспечение системы представляет собой прикладные программы или модули, реализующие алгоритмы выполнения проектных операций и процедур по каждой проектируемой сети УО.

Прикладные программы и модули являются самостоятельными программными компонентами, предназначенными для решения определенной свойственной только этому компоненту задачи, и исходные данные полностью независимы. Они по назначению делятся на функциональные и оригинальные - рис.1.

Функциональные модули (ФМ) представляют собой программы реализующие многократно используемые алгоритмы. Эти модули по функциональному признаку объединяются в несколько групп, называемых библиотечными модулями.

Оригинальные модули (ОМ) отражают специфические особенности сетей УО. Они не являются типовыми и для каждой сети УО, включаемой в систему, создаются заново.

Разрабатываемое программное обеспечение (ПО) системы реализуется на основе ФОП - технологии [4], где алгоритмические знания представляются в системе в виде совокупности независимых модулей и моделей предметной среды (МПС), образующих для модулей единое информационное поле. Объединение модулей в прикладную программу может осуществляться на разных этапах проектирования системы или решения задачи. Сформированная программа в общем случае представляет собой многоуровневую композицию программных модулей,

каждый из которых, а также МПС, может эксплуатироваться отдельно, одновременно использоваться на разных уровнях этой композиции, а также входить в разные программы.

Рассмотрим структуру специального ПО системы (на примере проектирования 2-х уровневой школьной сети сельских районов - блок 1 рис.1).

#### Функциональные модули:

Ф0 - модуль определения наименьшего внешне устойчивого множества графа (выполняет функции генератора вариантов сети УО во многих блоках системы);

Ф1 - модуль расчета кратчайших расстояний на сети дорог (для сети с неориентированными ребрами графа). Реализует метод потенциалов линейного программирования;

Ф2 - модуль расчета кратчайших расстояний на сети (для сетей с ориентированными или частично ориентированными ребрами графа);

Ф3, Ф4 - модули нормализации технико-экономических и градостроительных показателей вариантов сети УО;

Ф5 - модуль многокритериальной оценки вариантов сети УО. Она производится по следующим критериям [5] выбора оптимального варианта:

- по критерию Вальда

$$B_i = \max_i \min_j \overline{P_{ij}}; \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m},$$

где  $P_{ij}$  - нормированные показатели вариантов; n - количество показателей в варианте; m - количество

рассматриваемых вариантов сети УО;

- по критерию Гурвица

$$H_i = \max_i \left\{ \alpha \min_j \bar{P}_{ij} + (1-\alpha) \max_j \bar{P}_{ij} \right\},$$

где  $\alpha$  - коэффициент, значение которого определяется экспертно и заключено между 0 и 1;

- по критерию Лапласа

$$S_j = \max \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{P}_{ij} \right\},$$

- по критерию Сэвиджа

$$C_i = \left\{ \min_i \max_j \left( \max_i \bar{P}_{ij} - \bar{P}_{ij} \right) \right\}.$$

Полученные по этим критериям ранги вариантов сводятся в таблицу. По ним вычисляются коэффициенты корреляции рангов по Спирмену и производится итоговое ранжирование вариантов.

Ф6 - модуль оценки вариантов по аддитивному критерию, являющемуся одним из способов свертки векторного критерия:

$$\min F(x) = \sum_{j=1}^k a_j P_j^-(x) - \sum_{j=k+1}^m a_j P_j^+(x),$$

где  $\alpha_j \geq 0$  - весовой коэффициент, определяющий степень важности  $i$ -го показателя;  $P_j^-(x), P_j^+(x)$  - показатели, значения которых следует соответственно минимизировать или максимизировать.

Ф7 - модуль оценки вариантов по рейтинговым критериям [2].

#### Оригинальные модули:

О1, О2 - модули расчета технико-экономических и градостроительных показателей школьной сети, соответственно при 2-х и 3-х ступенчатой системе обучения;

О3 - модуль расчета транспортной составляющей технико-экономических показателей (ТЭП) при перевозке школьников маршрутными автобусами;

О4 - модуль расчета транспортной составляющей ТЭП при использовании школьных автобусов.

#### Модели предметной среды:

И1- исходные данные по сети дорог сельского района;

И2- исходные данные по численности жителей (учащихся и т.п.) НП;

И3 - ТЭП типовых проектов школ;

И4 - стоимостные и эксплуатационные показатели автобусов.

В результате компоновки (объединения) модулей для решения конкретной задачи формируются (см. рис. 1) компоненты рабочей программы (КРП), которая при функционировании может использовать и программы из общего ПО.

Как видно из рис. 1, блоки разрабатываемой системы не только многомодульны, но и "многослойны", каждый слой предназначен для решения специфичных задач обязательных для сетей УО - анализ существующей сети УО; реконструкция или развитие сети; проектирование новой сети, а также для отражения многоуровневости некоторых сетей УО. Однако ряд модулей системы и МПС инвариантны и могут быть использованы в различных "слоях" и блоках.

В некоторых блоках системы, наряду с модулями, используются и крупные программы. Так в блоке 2 используются программы:

- прогноза общей численности и половозрастной структуры населения;
- пересчета (для учета специфики заболеваний) нормативов в услугах медицинской помощи в целом и по этапам обслуживания;
- расчета количества пациентов дифференцированно по медицинским специальностям и уровням обслуживания, и т.д.

Разработанные модели, алгоритмы и программные модули апробированы на конкретных проектных материалах ряда сельских и городских районов Республики и внедрены в проектную практику.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Джумабаев Х.Р., Исакулов Б.Р. Моделирование сети учреждений здравоохранения на ЭВМ. - Т.: Фан, 1990.- 150 с.
2. Халтурсунов Э.Б. Моделирование и оптимизация организации школьной сети. Анализ. Генерация. Оценка, Изд-во LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, ФРГ, 2012. - 176 с.
3. Норенков И.П. Система автоматизированного проектирования. Принципы построения и структура. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 127 с.
4. Кузин Е.С. Концепция информационной технологии функционально-ориентированного проектирования прикладных программных систем // Информационные технологии. - М.; 2000, N 1. - С. 28-33.
5. Борисов А.Н., Левченко А.С. Методы интерактивной оценки решений. - Рига: Зинатне, 1982. - 139 с.

## MATHEMATICAL SOFTWARE FOR GENERATING OF NETWORKS SERVICE ESTABLISHMENTS FOR THE ARAL SEA REGION CONDITIONS

E.B. Khaltursunov  
Turin Polytechnic University in Tashkent city, Uzbekistan

**Abstract.** Here present a modular structure of mathematical and software of the system generating variants of establishments services (for example, a network of schools, health facilities, etc.) for the Aral Sea area conditions, i.e. with low population density, and estimation of design decisions to select the best of them on the basis of a multi-level, multicriteria estimation of their performance, based on the technology function-oriented design of applications software systems.

---

**Keywords:** buildings norms and rules, network establishments service (ES), single-level network, a multi-level network function modules (FM), the original modules (OM), software (SW).

#### REFERENCES

1. Dzhumabaev H.R., Isakulov B.R. *Modelirovanie seti uchrezhdenij zdravooohranenija na JeVM* [Modeling the network of health care institutions on a computer], T.: Fan, 1990, 150 p.
2. Khaltursunov E.B. *Modelirovanie i optimizacija organizacii shkol'noj seti. Analiz. Generacija. Ocenka* [Modelling and optimization of the organization of the school network. Analysis. Generation. Estimation], Publishing House of the LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2012 - 176 c.
3. Norenkov I.P. *Sistema avtomatizirovannogo proektirovanija. Principy postroenija i struktura* [Computer-aided design system. Principles of design and structure], Moskva, Energoatomisdat, 1986, 127 p.
4. Kuzin E.S. The concept of the information technology function-oriented design of application software systems [Konceptija informacionnoj tehnologii funkcional'no-orientirovannogo proektirovanija prikladnyh programmnyh system], *Informacionnye tehnologii [Information technology]*, 2000, no 1, pp. 28-33.
5. Borisov A.N., Levchenko A.S. *Metody interaktivnoj ocenki reshenij* [Methods for interactive estimation of solutions], Riga, Zinatne, 1982, 139 p.

УДК 681.58.8

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ФОСФАТНОЙ РУДЫ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА

А.Г. Рыбаков<sup>1</sup>, С.М. Андреев<sup>2</sup>, Е.Э. Бодров<sup>3</sup>, М.В. Фёдорова<sup>4</sup>, И.С. Бурмистрова<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,4,5</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

rybakov.a@konsom.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема осуществления автоматизации производства фосфоритных удобрений, главной целью которой является качество материала. Описан производственный процесс и дробильно-помольный комплекс. Проанализированы особенности получения химического состава, их проблемы и пути решения. Выявлена и обоснована необходимость замены пробоотборников на конвейерные анализаторы с использованием метода гамма-нейтронно-активационного анализа (PGNAA). На основании данных, полученных с помощью анализатора Thermo Scientific CB Omni, в режиме реального времени происходит перенаправление потоков фосфоритной руды в автоматическом режиме. Применение такой системы позволяет эффективно управлять качеством и формировать рудопотоки с заданными показателями.

**Ключевые слова:** фосфатная руда, качество материала, химический анализ в потоке, управление потоками, отслеживание химического состава и веса.

### Введение

Увеличение объёмов сельскохозяйственного производства невозможно без применения удобрений, которые должны содержать максимальное количество питательных веществ, быть легкоусвояемыми и иметь хорошую однородную структуру, что облегчает их дальнейшее хранение и использование. Одним из видов таких удобрений являются фосфориты, но для применения в качестве удобрений их необходимо сначала добыть и измельчить. Для этого построен производственный комплекс, показанный на рис. 1.

Фосфориты – осадочные горные породы, основным компонентом которых являются скрыто- или микрокристаллические фосфаты кальция из группы апатита. Нижний предел содержания  $P_2O_5$  в фосфоритах условно принят 12%.

### Описание производственного комплекса

Добыча руды производится с двух карьеров, после чего самосвалом материалы перевозятся в буферный склад, где происходит усреднение химического состава, из него руда доставляется в дробильно-помольный комплекс.

Начальной точкой дробильно-помольного комплекса является загрузочный бункер, с которого руда высыпается на конвейер и доставляется в валковую дробилку, изображённую на рис. 2. В валковой дробилке руда измельчается до фракции 0-80мм и высыпается на конвейер.

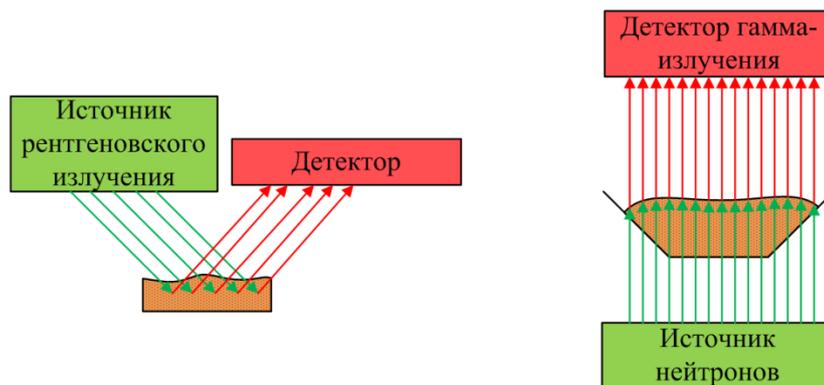
Дальнейшим этапом является взятие пробы пробоотборником и взвешивание при помощи конвейерных весов.

После конвейера располагается перекидной шибер, который позволяет перенаправлять потоки руды с целью не допустить попадание руды с химическим составом не соответствующим нормативному в дальнейшем производстве, такая руда попадает на склад дроблёной руды, где происходит усреднение. В дальнейшем малыми порциями руда высыпается на конвейер и транспортируется в бункер мельницы. Основной же поток материала проходит через перекидной шибер и транспортируется в бункер мельницы, т.е. минуя склад дроблёной руды.

Следующим этапом производства является измельчение руды в валковой мельнице до так называемой фосфоритной муки, которая и является конечным продуктом комплекса (валковая мельница изображена на рис. 3).

Сырьевая руда подается в мельницу через питатель (1) и через желоб (2) попадает в центр помольного стола (3). Свободные железосодержащие инородные тела отделяются от подаваемого материала магнитным сепаратором перед питателем мельницы магнитным сепаратором и удаляются через отвод в виде спускной трубы. Аналогично работает металлодетектор, который обеспечивает отбраковку не поддающихся намагничиванию инородных тел. На рабочей поверхности помольного стола материал под действием центробежной силы устремляется к внешнему краю стола и, таким образом, попадает под помольные валки (4), прижимаемые гидropневматической системой. Попавший под помольные валки материал перемалывается в зазоре между валками и рабочей поверхностью. При накатывании на материал (5) валки приподнимаются. За счет этого





Рентгеновский метод хим. анализа      Гамма-нейтронно-активационный анализ  
**Рис.4. Отличительные особенности двух методов определения элементного состава руды в потоке**



**Рис.5. Общий вид анализатора Thermo Scientific CB Omni**

Помольный стол приводится в движение электродвигателем (13) через эластичную муфту (14) и планетарный редуктор мельницы (15). Сегментный упорный подшипник скольжения в верхней части редуктора принимает на себя усилия помола.

Перед пуском двигателя мельницы, гидравлическая система поднимает помольные валки над рабочей поверхностью. За счет этого мельница может быть запущена при малом пусковом моменте как без материала, так и в заполненном состоянии. Автоматическая система контроля поднятия валков предотвращает металлический контакт мелющих элементов загруженной и пустой мельницы. [2].

После мельницы материал попадает на конвейер, где снова берётся проба и происходит взвешивание, основываясь на данных с лаборатории поток перенаправляется либо на склад фосфоритной муки или на силосный склад (процесс аналогичен описанному выше для склада дроблёной руды).

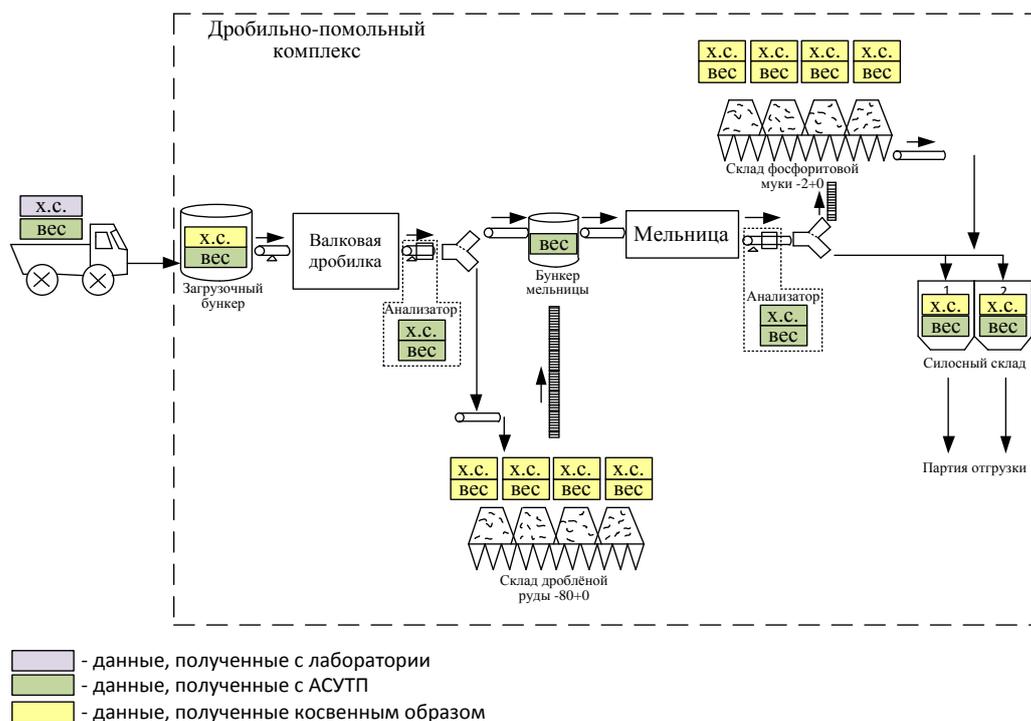
Конечным этапом производства является упаковка и отправка потребителю.

Основной проблемой данного комплекса является получение требуемого химического состава. Если же мы в автоматическом режиме и в реальном времени получаем данные с АСУ ТП, то с химическим составом всё обстоит несколько сложнее. Руда собирается посредством пробоотборника и транспортируется в лабораторию, где путём химического анализа происходит формирование элементного состава и путём ручного ввода вся информация вносится в систему. Всё это занимает слишком много времени и не даёт общей картины качества продукции, что в условиях автоматизации производства даёт большую погрешность и уменьшает производительность [9,10,12,13].

### Пути решения проблемы

Основным качественным показателем, характеризующим фосфоритные удобрения, является химический состав. На сегодняшний день существуют различные методы приборного элементного анализа химического состава материалов в потоке: рентгеновский, лазерный, инфракрасный, гамма-нейтронно-активационный и др. [5,6,11,14].

Для решения задачи могут быть применены два наиболее используемых метода: рентгеновский и гамма-нейтронно-активационный. Принцип гамма-нейтронно-активационного анализа заключается в том, что нейтроны излучаемые изотопом  $^{252}\text{Cf}$  бомбардируют весь поток материала, находящегося на конвейерной ленте, вследствие чего ядро каждого из элементов временно переходит в возбужденное состояние. После возвращения в стабильное состояние ядро излучает гамма-квант, который фиксируется натрий-йодидным детектором. Выделяемая удельная энергия гамма-квантов является уникальным для каждого из элементов периодической таблицы Д.И. Менделеева. Из-за того, что гамма-кванты обладают хорошим проникновением в материал размер руды и однородность не влияют на показатели точности, в рентгеновском же методе перед анализом необходимо, чтобы руда была однородна, также на показатели может повлиять толщина материала на конвейере, что при использовании метода гамма-нейтронно-активационного анализа не критично. Также метод PGNAА позволяет одновременно определять в пробе более 20 элементов [4,8]. На рис. 4 изображено схемы рассмотренных методов определения элементного состава.



**Рис.6. Схема дробильно-помольного комплекса с учётом внесённых изменений**

Учитывая все описанные выше преимущества метода гамма-нейтронно активационного анализа был выбран конвейерный анализатор Thermo Scientific CB Omni, который представлен на рис. 5.

#### Автоматизация процесса

Проверка качества происходит в зависимости от процентного содержания  $P_2O_5$  среди общего объёма исследуемого материала, удобрения высшего сорта содержат 25%, первого – 22% и второго 19% [3]. Данные, полученные с Thermo Scientific CB Omni, попадая в систему, анализируются и если процентное соотношение не удовлетворяет текущей настройке системы, то происходит перенаправление потока при помощи перекидных шиберов на склады, где происходит усреднение и дальнейшее распределение сырья обратно в комплекс.

Разработана программа, позволяющая косвенным образом контролировать химический состав и вес сырья, что значительно упрощает отслеживание химического состава на протяжении всего комплекса.

За процессом прохождения материала через комплекс наблюдает оператор дробильно-помольного комплекса, который может переводить систему в автоматический режим или же сам управлять потоками руды при помощи перекидных шиберов на автоматизированном рабочем месте, основываясь на данных с АСУТП и косвенных показателей веса и хим. состава. Также в обязанности оператора входит настройка параметров элементного состава. В зависимости от выбранных условий выпуска продукции система производит перенаправление потоков. Схема дробильно-помольного комплекса с учётом изменений представлена на рис. 6.

#### Заключение

Замена пробоотборников конвейерными анализаторами значительно сокращает время получения элементного (химического) состава сырья, что позволяет более тщательно отслеживать изменение качества материала и перенаправлять потоки в соответствии с выставленными настройками системы - это повышает качество продукции. Также вследствие отсутствия человеческого фактора можно увеличить скорость прохождения материала, что может привести к увеличению производительности комплекса.

Рассмотренные методы качественного анализа сырья выявили, что наиболее подходящим для данного технологического процесса является метод гамма-нейтронно-активационного анализа (PGNAA), который по сравнению с другими методами способен обеспечивать контроль элементного состава по более чем 20 элементам и не критичен к количеству материала на конвейерной ленте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Азарян В.А. Разработка функциональной схемы управления качеством в рудопотоках карьеров с целью повышения эффективности работы // Качество минерального сырья . - 2011. - Вып. 2011. - С. 60-64.
2. Мельница Loesche для переработки руд и минералов. – URL: [http://www.loesche.com/assets/PageContent/Data/Multimedia/Brochures/Ores/pdf/167\\_loesche\\_mills\\_for\\_ores\\_and\\_minerals\\_%20R.pdf](http://www.loesche.com/assets/PageContent/Data/Multimedia/Brochures/Ores/pdf/167_loesche_mills_for_ores_and_minerals_%20R.pdf)
3. Ягодин Б. А. Агрохимия: учебник для вузов / Б. А. Ягодин ; под ред. Б. А. Ягодина. - М.: Колос, 2002. - 584 с.
4. Кушнеров В.Ю. Управление основностью агломерационной шихты / Бредихин В.Н., Червоный И.Ф. // Научные труды SWorld. 2014. Т. 3. № 3. С. 64-72.

5. Hassan A.M. Bulk-samples prompt gamma-rays neutron activation analysis (pgnaa) with isotopic neutron sources // Proceedings of the 7th Conference on Nuclear and Particle Physics, 11-15 Nov. 2009, Sharm El-Sheikh, Egypt. P. 69-78.
6. Андреев А.В. Нейтронно-активационный анализ геологических проб с использованием микротрона и нейтронного генератора / А.В. Андреев, В.И. Фирсов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т.78, №5. – С. 19-23.
7. Крупка, Е.Ю. Гамма-нейтронно-активационный анализатор состава сырья / Е.Ю. Крупка, В.Н. Бредихин // Metallurgy XXI столетия глазами молодых : всеукраинская научно-практическая конференция студентов: сборник докладов.- Донецк: ДонНТУ, 2013.- С.52.
8. Конвейерные анализаторы. – URL: [http://www.intech-gmbh.ru/go\\_conveyor\\_analyzers.php](http://www.intech-gmbh.ru/go_conveyor_analyzers.php)
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Рябчиков М.Ю. Выбор критерия оптимизации управления качеством металлургического агломерата / М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова, В.В. Гребенникова // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 2. С. 96-106.
13. Рябчиков М.Ю. Модель разрушения металлургического агломерата / М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова, Н.В. Богданов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 3. С. 159-166.
14. Рябчиков М.Ю. Проблемы управления качеством металлургического агломерата на основе результатов оперативных рентгенофлуоресцентных анализов / М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова, Н.В. Богданов // Качество и жизнь. 2016. № 2. С. 14-21.

## THE MANAGEMENT OF PHOSPHATE ORE FOR THE PURPOSE OF PROVIDING THE SPECIFIED QUALITY

**S.M. Andreev, A.G. Rybakov, E.S. Aleynikova, M.V. Fedorova, I.S. Burmistrova**  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The article considers the problem of automating the production of phosphate fertilizers, the main purpose of which is the quality of the material. The manufacturing process, crushing and grinding complex are described. The peculiarities of chemical composition, its problems and solutions are analyzed. The necessity of the replacement of samplers on conveyor analyzers with the method of gamma-neutron-activation analysis (PGNAA) is identified. On the basis of the data obtained using the analyzer the Thermo Scientific CB Omni, there is redirection of the flows of phosphate ore in automatic mode in real time. The use of such a system allows controlling the quality effectively and generating production intensity with specified parameters.

**Keywords:** phosphate ore, the quality of material, chemical analysis in the flow, flow control, monitoring of the chemical composition and weight.

### REFERENCES

1. Azarian V.A. Development of functional quality management scheme in quarries with the aim of increasing the efficiency [Razrabotka funktsional'noi skhemy upravleniya kachestvom v rudopotokakh kar'erov s tsel'yu povysheniya effektivnosti raboty], *Kachestvo mineral'nogo syr'ya* [The quality of mineral raw materials], 2011, pp. 60-64.
2. Mel'nitsa Loesche dlya pererabotki rud i mineralov [Loesche mills for ores and minerals] Available at: [http://www.loesche.com/assets/PageContent/Data/Multimedia/Brochures/Ores/pdf/167\\_loesche\\_mills\\_for\\_ores\\_and\\_minerals\\_%20R.pdf](http://www.loesche.com/assets/PageContent/Data/Multimedia/Brochures/Ores/pdf/167_loesche_mills_for_ores_and_minerals_%20R.pdf)
3. Yagodyn B.A., Zhukov Yu.P., Kobzarenko V.I. Agrokhimiya [Agrochemicals: a textbook for high schools], Moskva, Kolos, 2002, 584 p.
4. Kushnerov V.Yu., Bredykhin V.N., Chervony I.F. Management basicity of sintering mixture [Upravlenie osnovnost'yu aglomeratsionnoi shikhty], *Nauchnye trudy SWorld [Collection of scientific works SWorld]*, 2014, vol.3, No. 3, pp. 64-72.
5. Hassan A.M. Bulk-samples prompt gamma-rays neutron activation analysis (pgnaa) with isotopic neutron sources Proceedings of the 7th Conference on Nuclear and Particle Physics, 11-15 Nov. 2009, Sharm El-Sheikh, Egypt, pp. 69-78.
6. Andreev A.V., Firsov V.I., Tsipenyuk Yu. M. Neutron Activation Analysis of Geological Samples Using Microtron and the Neutron Generator [Neitronno-aktivatsionnyi analiz geologicheskikh prob s ispol'zovaniem mikrotrona i neitronnogo generatora], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Materials diagnostics]*, 2012, Vol. 78, No.5, pp. 19-23.

- 
7. Krupka E.Yu. Gamma neutron activation analyzer of raw materials [Gamma-neitronno-aktivatsionnyi analizator sostava syr'ya], *Metallurgiya XXI stoletiya glazami molodykh : vseukrainskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov: sbornik dokladov [Metallurgy of XXI century through the eyes of young generation]*, 2013, Donetsk, 52 p.
  8. *Konveiernye analizatory [Conveyor analyzers]*. Available at: [http://www.intech-gmbh.ru/go\\_conveyor\\_analyzers.php](http://www.intech-gmbh.ru/go_conveyor_analyzers.php)
  9. Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S. Control of the Metallurgical Sinter Quality by Using the Model of Reducibility [Kontrol kachestva metallurgicheskogo aglomerata s ispolzovaniem modeli vosstanovimosti], *Stal [Steel]*, 2014, no. 2, pp. 4-8.
  10. Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V. Simulation of the combined effect of production factors on metallurgical sinter mechanical strength [Modelirovanie kompleksnogo vliyaniya proizvodstvennykh faktorov na mehanicheskuyu prochnost metallurgicheskogo aglomerata], *Metallurg [Metallurgist]*, 2013, no. 4, pp. 40-47.
  11. Grebennikova V.V., Bogdanov N.V., Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S. The review of X-ray fluorescent analyzers for control of properties of ore materials [Obzor rentgenofluorescentnykh analizatorov dlya kontrolya svoystv rudnykh materialov], *Pribory [Device]*, 2014, no. 11, pp. 45-50.
  12. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Grebennikova V.V. The option of criteria for optimized quality control of metallurgical sinter mix [Vybor kriteriya optimizatsii upravleniya kachestvom metallurgicheskogo aglomerata], *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii [Problems of mechanical engineering and automation]*, 2016, no. 2, pp. 96-106.
  13. Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S., Bogdanov N.V. Fracture model of metallurgical sinter [Model razrusheniya metallurgicheskogo aglomerata], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]*, 2016, T. 59. no. 3, pp. 159-166.
  14. Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S., Bogdanov N.V. Sinter quality control on the basis of x-ray fluorescence analyses monitoring [Problemy upravleniya kachestvom metallurgicheskogo aglomerata na osnove rezultatov operativnykh rentgenofluorescentnykh analizov], *Kachestvo i zhizn [Quality and life]*, 2016, no. 2, pp. 14-21.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ ТЭС

К.М. Реймов

«Ташкентский государственный технический университет», г. Ташкент, Узбекистан

kamal\_tstu@mail.ru

**Аннотация.** В работе приводится подход для определения часового расхода топлива на основе исходных данных относительных приростов расхода топлива блока с применением метода численного интегрирования. Исследован критерий оптимального распределения активной нагрузки между двумя агрегатами тепловой электрической станции с использованием программного комплекса Matlab. Рассмотрен пример оптимального покрытия нагрузки энергосистемы одного из суточных интервалов обеспечивающих минимальный расход топлива.

**Ключевые слова:** критерия; режим; энергосистема, топливо, расходная характеристика, нагрузка.

### Актуальность работы

Одной из основных задач, решаемых при управлении режимами электроэнергетических систем (ЭЭС) на современном этапе является оптимизация режимов работы тепловых электростанции (ТЭС). Она предусматривает определения оптимальных значений мощности в регулируемых диапазонах агрегатов, обеспечивающих минимальный расход топлива. В настоящее время используемые на практике методы и алгоритмы решения этой задачи имеют некоторые недостатки, связанные с ненадёжностью сходимости итеративного расчетного процесса при оптимизации тяжелых режимов электрических сетей с учетом программной реализации [1-3].

### Основные проблемы и решения

Электрические системы являются управляемыми. Управляющие воздействия позволяют при одной и той же совокупности электрических нагрузок реализовывать различные режимы системы. В связи с этим возникает задача выбора оптимального режима. Под оптимальным режимом электрической системы обычно подразумевается режим, наиболее экономичный из всех возможных. Таким образом, критерием оптимизации в общем случае является один из критериев экономической эффективности, например, приведенные затраты. Для ТЭС в качестве этих затрат можно принимать расход топлива использующих этих станций.

Расходная характеристика агрегата  $B_i = f(P_i)$  представляет собой зависимость часового расхода условного топлива  $B$  от генерируемой им активной мощности  $P$ , изменяющейся в диапазоне  $[P_{min}, P_{max}]$ . Начальный расход  $B_0$  используется на генерацию минимально возможной мощности  $P_{min}$  (рис. 1). По расходной характеристике методом численного дифференцирования можно получить характеристику относительных приростов расхода топлива (ОПРТ)  $b_i = f(P_i)$  (рис. 2). Причём:

$$b = \frac{dB}{dP} = \lim_{\Delta P} \frac{\Delta B}{\Delta P} = \frac{B^{(2)} - B^{(1)}}{P^{(2)} - P^{(1)}}$$

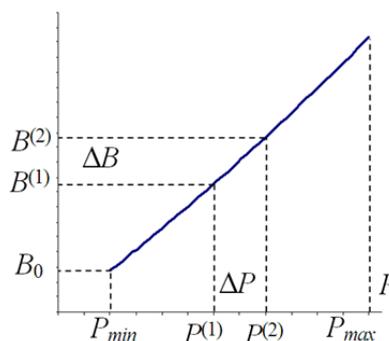


Рис. 1. Расходная характеристика агрегата

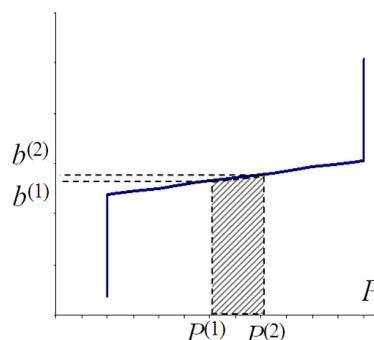


Рис. 2. Характеристика ОПРТ агрегата

Обратный переход от характеристики ОПРТ к расходной осуществляется методом численного интегрирования. Так, площадь  $\Delta B$  криволинейной трапеции (рис. 2) можно приблизительно определить по формуле

$$\Delta B = \frac{1}{2} (b^{(2)} - b^{(1)}) (P^{(2)} - P^{(1)}).$$

Тогда

$$B^{(2)} = B^{(1)} + \Delta B.$$

И остальные значения расхода топлива соответственно определяются аналогично.

Рассмотрим ТЭС с двумя энергоблоками (рис.3), работающие параллельно на шинах станции.

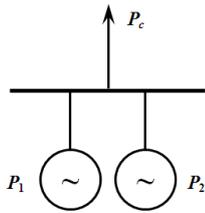


Рис. 3. Расчетная схема энергосистемы

В каждый момент времени должно выполняться следующее условие баланса мощности:

$$P_c = P_1 + P_2$$

Суммарный расход топлива на ТЭС:

$$B_\Sigma = B_1 + B_2$$

Если произвольным образом загрузить первый энергоблок до значения  $P_1^{(0)}$ , то мощность второго агрегата определится как

$$P_2^{(0)} = P_c - P_1^{(0)}$$

Чтобы оценить экономичность такого распределения нагрузки, разгрузим первый энергоблок от значения  $P_1^{(0)}$  до  $P_1^{(1)} = P_1^{(0)} - \Delta P$ . Тогда второй блок нужно загрузить на величину

$$P_2^{(1)} = P_c - P_1^{(1)}$$

Такая операция приведёт к уменьшению расхода топлива первого блока на  $\Delta B_1^{(1)}$  и увеличению расхода топлива второго энергоблока на  $\Delta B_2^{(1)}$ . Пусть  $\Delta B_1^{(1)}$  меньше  $\Delta B_2^{(1)}$  (характеристика  $B_1(P_1)$  более пологая, чем  $B_2(P_2)$ ), то есть суммарный расход топлива двух блоков увеличится на

$$\Delta \Delta B^{(1)} = \Delta B_2^{(1)} - \Delta B_1^{(1)} > 0$$

При загрузке первого блока на  $\Delta P$  и разгрузке второго на столько же

$$P_1^{(2)} = P_1^{(0)} + \Delta P$$

$$P_2^{(2)} = P_2^{(0)} - \Delta P$$

получим:

$$\Delta \Delta B^{(2)} = \Delta B_2^{(2)} - \Delta B_1^{(2)} < 0$$

то есть имеется экономический выигрыш. Продолжая действовать в этом же направлении, можно убедиться, что наиболее экономичным режимом является случай, когда

$$\Delta B_2 = \Delta B_1$$

Из условия баланса мощностей  $\Delta P_2 = \Delta P_1$ , тогда можно получить:

$$\frac{\Delta B_1}{\Delta P_1} = \frac{\Delta B_2}{\Delta P_2}$$

или в пределе  $b_1 = b_2$ .

Этот вывод можно обобщить и для ТЭС с «n» энергоблоками, то есть оптимальное распределение  $P_c$  достигается при  $b_1 = b_2 = \dots = b_n = idem$ .

Таким образом, критерием экономичного (оптимального) распределения активной нагрузки

тепловой электростанции между ее энергоблоками является равенство относительных приростов расхода топлива отдельных ее агрегатов [4].

Для подтверждения полученного вывода рассмотрим пример, заключающийся в оптимальном покрытии нагрузки энергосистемы одного из интервалов суток (остальные интервалы определяются аналогично), двумя агрегатами ТЭС, разработанных в комплексе Matlab, со следующими исходными данными (табл. 1 и 2):

Таблица 1

ХОП I-й станции

|                          |     |      |      |      |      |
|--------------------------|-----|------|------|------|------|
| <b>b1</b><br>[т.у.т/МВт] | 0,3 | 0,31 | 0,34 | 0,36 | 0,38 |
| <b>P1</b> [МВт]          | 80  | 100  | 110  | 130  | 150  |

Таблица 2

ХОП II-й станции

|                          |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|------|------|------|------|
| <b>b2</b><br>[т.у.т/МВт] | 0,31 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,39 |
| <b>P2</b> [МВт]          | 90   | 140  | 170  | 180  | 200  |

Нагрузка энергосистемы 260 МВт.

На основе разработанного программного комплекса Matlab результаты расчета имеют следующий вид (рис.4, табл. 3 и 4):

- минимальный суммарный расход топлива электростанции:  $B_{sum} = 70,220$  т.у.т.;
- оптимальный расход топлива I-й станции:  $Port\ 1 = 29,372$  т.у.т.;
- оптимальная выработка мощности I-й станции:  $Port\ 1 = 110,0$  МВт;
- оптимальный расход топлива II-й станции:  $Port\ 2 = 40,848$  т.у.т.;
- оптимальная выработка мощности II-й станции:  $Port\ 2 = 150,0$  МВт;
- значение величины b1 при выработке оптимальной мощности I-й станцией:  $b1 = 0,329$  т.у.т./МВт;
- значение величины b2 при выработке оптимальной мощности II-й станцией:  $b2 = 0,325$  т.у.т./МВт.

Таблица 1

Суммарная характеристика расхода топлива от мощности I-ой станции

|                        |       |       |       |              |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Bsum</b><br>[т.у.т] | 71,02 | 70,54 | 70,28 | <b>70,22</b> | 70,34 | 70,65 | 71,12 | 71,76 |
| <b>P1</b><br>[МВт]     | 80    | 90    | 100   | <b>110</b>   | 120   | 130   | 140   | 150   |
| <b>Psum</b><br>[МВт]   | 260   | 260   | 260   | <b>260</b>   | 260   | 260   | 260   | 260   |

Таблица 2

Суммарная характеристика расхода топлива от мощности II-ой станции

|                        |       |       |       |              |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Bsum</b><br>[т.у.т] | 71,02 | 70,54 | 70,28 | <b>70,22</b> | 70,34 | 70,65 | 71,12 | 71,73 |
| <b>P2</b><br>[МВт]     | 180   | 170   | 160   | 150          | 140   | 130   | 120   | 110   |
| <b>Psum</b><br>[МВт]   | 260   | 260   | 260   | <b>260</b>   | 260   | 260   | 260   | 260   |

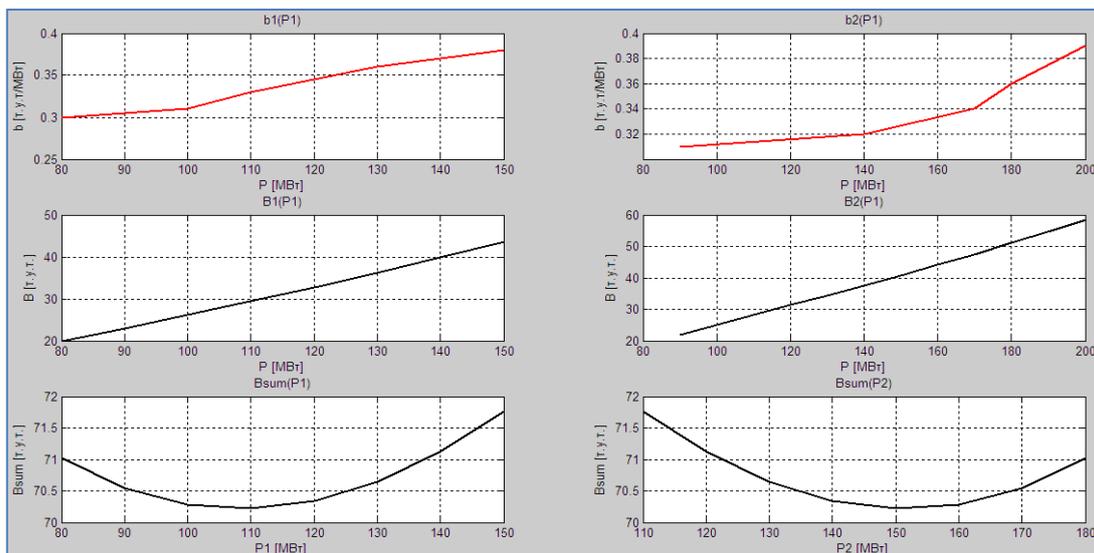


Рис. 4. Результаты расчета на программном комплексе Matlab

Из рис. 4 видно что, минимум функций  $Bsum=f(P1)$  достигается при значении  $P_{opt1} = 110$  МВт, а для функций  $Bsum=f(P2)$ ,  $P_{opt2} = 150$  МВт. Это подтверждает, что при равенстве относительных приростов расхода топлива двух станции обеспечивает самый минимальный расход топлива.

#### Вывод

Выбранную критерию можно легко реализовать в программе Matlab и использовать при оптимальном планировании суточных режимов ТЭС с учетом ограничений в виде неравенств при максимальных и минимальных мощностях станции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фазылов Х.Ф. Установившиеся режимы электроэнергетических систем и их оптимизация / Х.Ф. Фазылов, Т.Х. Насыров. – Т.: Молия, 1999. – 370 с.
2. С.К. Panigrahi, P.K. Chattopadhyay and U. Prasad, "Linear Programming Approach for Bidding of Generators in Restructured Power Industry," International Electrical Engineering Journal, vol. 3, no. 1, pp. 589-594, 2012.
3. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под общей ред. Ю.Н.Руденко и В.А.Семенова. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 648 с.
4. Гайибов Т.Ш., Реймов К.М. Программа «TESGES» для оптимального покрытия графиков нагрузок энергосистемы тепловыми и гидравлическими электрическими станциями // Программа для ЭВМ. № DGU 03033. 10.02.2015 г.

## THE DETERMINATION OF THE CRITERIA FOR OPTIMAL DISTRIBUTION ACTIVE POWER LOAD BETWEEN GENERATORS ON THERMAL POWER STATION

K.M.Reymov

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** The work presents the approach for determination of hourly fuel consumption on the base of initial values of fuel incremental rates consumption of the block with the use of the method of numerical integration. The criterion for active power flow optimal distribution between two units of the thermal electric power station with the use of the program Matlab was studied. The example for active power load optimal distribution in the Electrical Power Network for one of the day's interval which provides minimal fuel consumption.

**Keywords:** criteria; mode; power system; fuel; consumption characteristics; load

#### REFERENCES

1. Fozilov Kh.F., Nosirov T.Kh. *Ustanovivshiesya rejimy elektroenergeticheskix sistem i ix optimizatsiya* [Calculations of steady state regimes of power electrical systems and their optimization]. Tashkent, Moliya., 1999, 377 p.
2. Panigrahi C.K. Linear Programming Approach for Bidding of Generators in Restructured Power Industry / C.K.Panigrahi, P.K.Chattopadhyay, U.Prasad // International Electrical Engineering Journal. – 2012. - vol. 3, no. 5(4). P. 589-594.
3. Rudenko Yu.N., Semyonov V.A. *Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike* [Automation of dispatching management in power energetics]. Moscow, Publishing house of MEI., 2000, 648 p.
4. Gayibov T.Sh., Reymov K.M. *Programma «TESGES» dlya optimalnogo pokrytiya grafikov nagruzok energosistemy teplovymi i gidravlichesкими elektricheskimi stantsiyami* [The program «TESGES» for providing power loads in Electrical Power Network with thermal and hydro power stations] // The program № DGU 03033. 10.02.2015 y.

## ОБЗОР СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ

И.Г. Самарина<sup>1</sup>, В.Э. Каюмова<sup>2</sup>

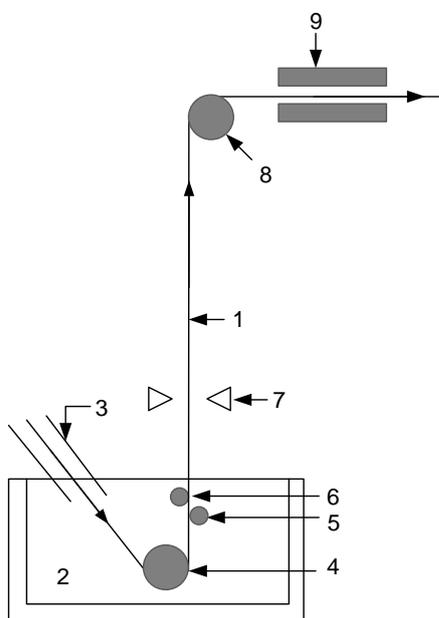
<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»,  
г. Магнитогорск, Россия

<sup>1</sup>ig\_samarina@inbox.ru

**Аннотация.** Современные системы управления имеют возможность с высокой точностью контролировать и управлять толщиной покрытия на полосе. С их помощью на полосу можно равномерно наносить покрытия по длине и ширине. Эти системы увеличивают производительность и уменьшают расход материалов и энергии. В статье рассмотрены системы управления толщиной цинкового покрытия на агрегатах непрерывного горячего цинкования. Для удаления избытка цинка в данных системах используют новую конструкцию газового ножа с регулируемым профилем сопла.

**Ключевые слова:** горячее цинкование, толщина покрытия, система регулирования, газовый нож.

Горячее цинкование – это наиболее крупномасштабный способ нанесения цинковых покрытий на сталь. Покрытие наносится кратковременным погружением предварительно обезжиренных и протравленных изделий из черных металлов в ванну с расплавленным цинком (430-470 °С) [1, 2]. Слой покрытия при таком способе нанесения формируется только при выходе стальной полосы, покрытой твердым слоем сплава, из металлической ванны, когда захваченный в результате адгезии жидкий слой затвердевает на полосе. Схема процесса нанесения покрытия представлена на *рис. 1*.



**Рис. 1. Оборудование для нанесения покрытия:**  
1 – полоса; 2 – ванна жидкого цинка; 3 – погружной рукав; 4 – погружной ролик; 5 – корректирующий ролик; 6 – стабилизирующий ролик; 7 – газовые ножи; 8 – верхний ролик; 9 – измеритель массы покрытия

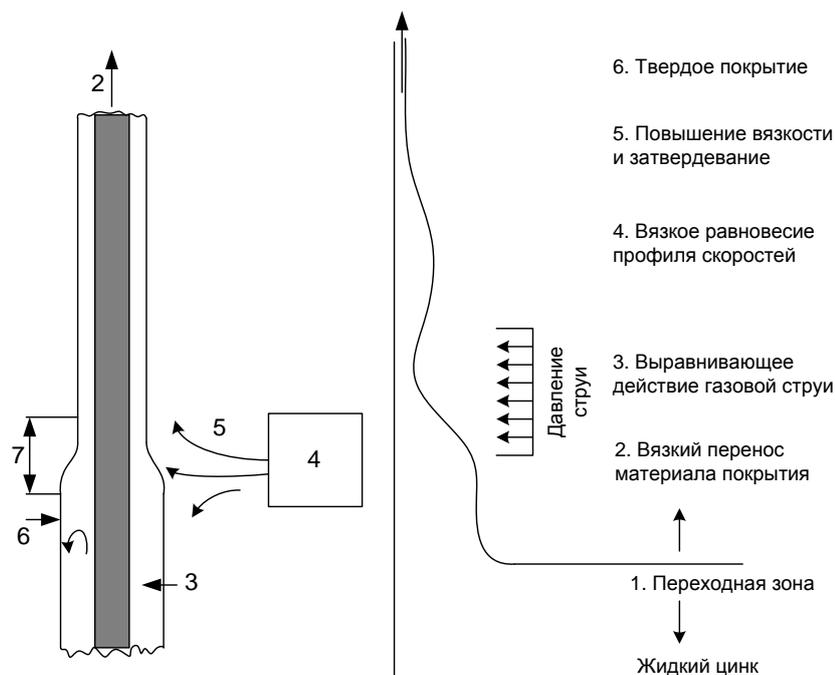
Полоса огибает снизу погружной ролик 4 и движется вверх через корректирующий 5 и стабилизирующий 6 ролики. Далее полоса выходит из ванны и проходит через комплект газовых ножей 7, которые сдувают избыточный цинк, направляя его обратно в ванну и регулируя таким образом толщину покрытия. Рабочим газом в ножах может служить горячий воздух, азот, пар или инертный газ, но чаще используют воздух и азот. Далее полоса продолжает перемещаться вверх, имея опорных элементов на длине около 45 м, где цинковое покрытие охлаждается и затвердевает (оцинкованная полоса) или подвергается нагреву для образования железоцинкового покрытия (оцинкованная отожженная полоса) [3].

Толщина и свойства слоя покрытия зависят от скорости выхода полосы из ванны; вязкости металла ванны; химического состава ванны; плотности металла покрытия; вида разравнивающего устройства (контактный ролик или воздушные ножи) [4].

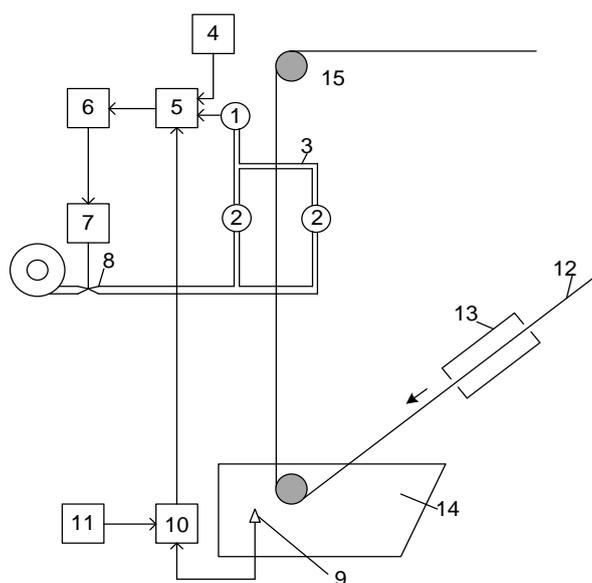
Значительные успехи по оптимизации технологических процессов на агрегатах непрерывного горячего цинкования (АНГЦ) стальной полосы за последние 10 лет были достигнуты благодаря внедрению регулирования толщины покрытия газовой (воздушной) струей взамен ролика. Это позволило: 1) повысить производительность агрегатов из-за увеличения скорости полосы до 180 м/мин и уменьшения простоев на замену роликов; 2) уменьшить толщину и разнотолщинность покрытия, то есть получили экономию цинка; 3) наносить на две стороны полосы покрытия разной толщины; 4) улучшить качество поверхности покрытия [5, 6].

Принципиальная схема процесса нанесения покрытия при горячем цинковании с использованием газовых ножей приведена на *рис. 2*.

Покрытие регулируется потоком газа выходящего из щелевых сопел, установленных под прямым углом к полосе. Толщина покрытия зависит от скорости полосы, давления газа, скорости истечения газа из ножей, формы сопел, расстояния между соплами и полосой, расстояния от поверхности ванны. Для получения равномерного по



**Рис. 2. Процесс нанесения покрытия при горячем цинковании:**  
 1 – полоса; 2 – направление движения; 3 – жидкое покрытие; 4 – сопловой блок;  
 5 – газовая струя; 6 – обратный поток; 7 – зона взаимодействия



**Рис. 3. Устройство регулирования толщины цинкового покрытия:**  
 1 – датчик давления; 2 – воздушные ножи; 3 – трубопроводы; 4 – датчик скорости;  
 5 – блок суммирования; 6 – усилитель; 7 – двигатель; 8 – клапан;  
 9 – датчик температуры расплава цинка; 10 – схема сравнения;  
 11 – блок задания температуры; 12 – стальная полоса;  
 13 – печь отжига; 14 – ванна с расплавом цинка; 15 – тянущий ролик

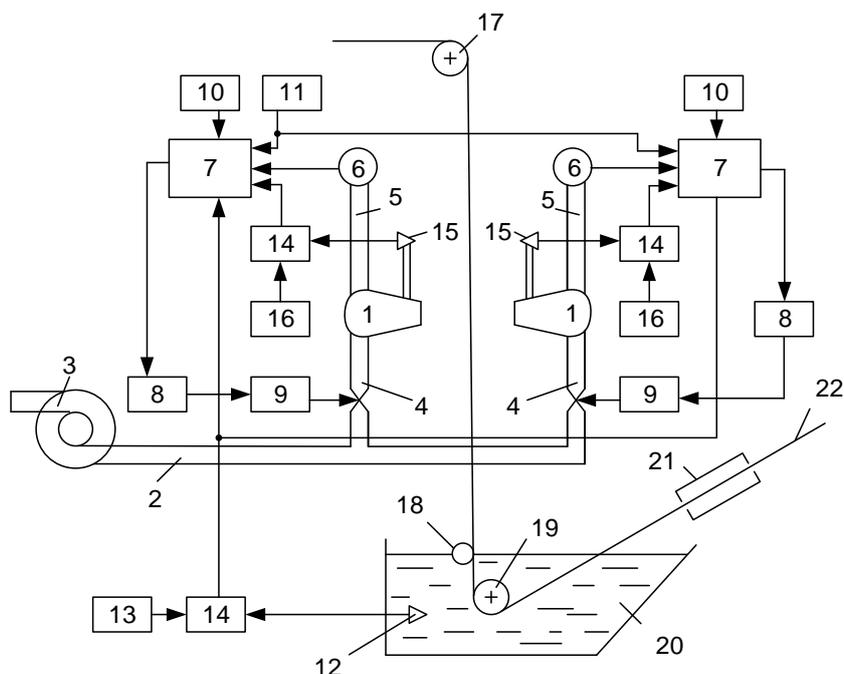
толщине покрытия необходимо поддерживать постоянным расстояние между полосой и соплом [3].

В работе [7] предложена система, учитывающая все перечисленные выше параметры и в то числе изменение температуры жидкого цинка в ванне. Так как с увеличением температуры жидкого цинка толщина покрытия уменьшается, а при снижении температуры – увеличивается. Поэтому целью данного изобретения является повышение равномерности покрытия по толщине

не путем введения коррекции по температуре.

Устройство для автоматического регулирования толщины покрытия в процессе горячего цинкования снабжено датчиком температуры расплава, схемой сравнения и блоком задания температуры, причем входы схемы сравнения соединены с датчиком и блоком задания температуры, а выход ее – с входом блока суммирования.

Блок-схема устройства представлена на рис. 3.



**Рис. 4. Устройство для автоматического регулирования толщины покрытия в процессе горячего цинкования:**  
**1 – воздушные ножи; 2 – трубопровод подвода воздуха; 3 – воздуходувка; 4 – клапаны; 5 – трубопроводы подвода воздуха к датчикам давления; 6 – датчики давления воздуха; 7 - блоки суммирования сигналов датчиков; 8 – усилители; 9 – двигатели; 10 – блоки задания толщины покрытия; 11 – датчик скорости; 12 – датчик температуры; 13 – блок задания температуры; 14 – схема сравнения; 15 – датчики расстояния; 16 – блоки задания расстояния; 17 – ролик; 18 – ребристый ролик; 19 – донный барабан; 20 – ванна с цинком; 21 – печь термической обработки; 22 – полоса**

Но в работе [7] не предусмотрена возможность задания толщины покрытия, что реализовано [8].

Устройство снабжено блоком задания толщины покрытия, выход которого соединен с входом блока суммирования, и узлом автоматической корректировки давления воздуха в воздушных ножах в зависимости от изменения расстояния от воздушных ножей до полосы. Узел коррекции состоит из датчика расстояния, блока задания расстояния и схемы сравнения, выход которой соединен с входом блока суммирования. На *рис. 4* приведен вариант реализации предлагаемого устройства.

Фирма IMS Messsysteme GmbH (г. Хейлигенхаус, Германия) разработала корректирующую систему, контролирующую давление в линии воздушного ножа и его расстояние от поверхности полосы, *рис. 5*.

Толщину покрытия измеряют над ванной цинкования (точка горячего измерения) и за участком охлаждения (точка холодного измерения). Для измерения используют рентгеновскую систему, детекторы которой расположены с верхней и нижней сторон полосы. С их помощью измеряют толщину покрытия в средней части полосы [9]. Принцип работы и конструкция толщиномера подобна [10].

На процесс отжима влияют следующие параметры: скорость полосы, давление воздуха в соплах ножа, расстояние между соплами и полосой (а также прогиб полосы в поперечном сечении), форма сопел и головки, на которой они закреплены, угол наклона сопел к поверхности полосы, расстояние между воздушным ножом и ванной горячего цинкования, температура и шероховатость поверхности полосы, химический состав и

температура расплава цинка.

Модель процесса автоматически адаптируется к переменным условиям конкретной технологической линии.

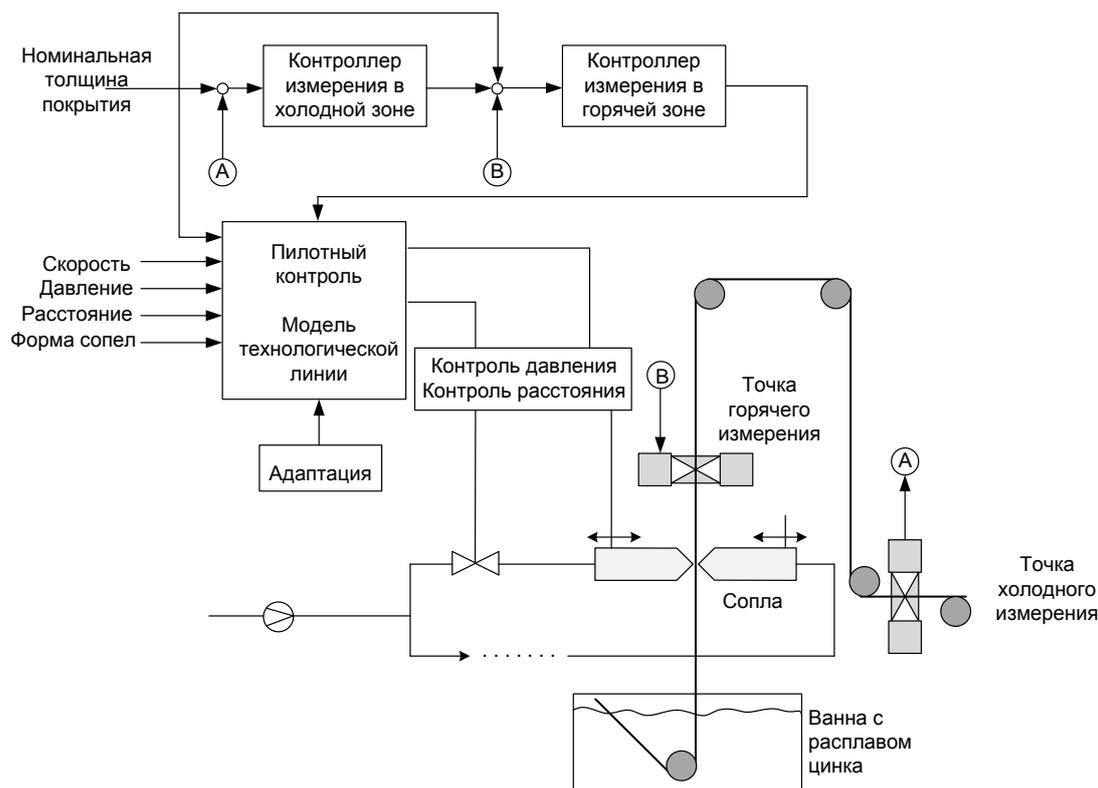
Используемая в линии аппаратура с самообучающимися программами производит идентификацию процесса. Если в ходе идентификации обнаруживается отклонение параметров процесса от модели, то вводится поправочный коэффициент.

Практический опыт работы этой системы в линии нанесения покрытия показал, что среднее отклонение от номинальной толщины покрытия обычно не превышало 0,5%. Доступность статической информации позволяет обслуживающему персоналу легко и точно контролировать процесс нанесения покрытия и немедленно вмешиваться в его ход в случае отклонения от нормального режима [9].

Компанией Thermo Electron Corporation (США) представлена адаптивная система автоматического регулирования Radiometrie RM 400 EZ [10].

Адаптивная система автоматического регулирования реагирует на изменения между измеренными величинами покрытий, полученными измерительными устройствами на холодном конце, и расчетным покрытием, полученным на основе параметров соответствующего процесса. Изменения таких параметров процесса, как скорость полосы, расстояние от воздушного ножа до полосы и желаемого цинкового покрытия, принимаются во внимание в процессе управления с обратной связью.

Регулировка среднего значения толщины/веса покрытия и профиля основывается на данных измерения,



**Рис. 5. Регулирование давления воздуха и расстояния воздушного ножа от полосы**

полученных с толщиномеров, которые установлены на линии.

Система оценивает статическое распределение покрытия по направлению процесса, вследствие чего заданное значение регулируемой величины может изменяться с учетом установленных пределов допуска для верхней стороны, нижней стороны и общего толщины/веса покрытия, что приводит к минимальному расходу цинка.

В системах измерения и регулирования [9] и [10], горячая точка измерения, находится сразу за соплом и выдает не вполне точный результат, но быстрый сигнал обратной связи на регулятор толщины цинкового покрытия. Горячая точка измерения требует затрат на техническое обслуживание и плохо поддается калибровке. И расположенная дальше холодная точка измерения подает на регулятор с некоторым смещением во времени точный измерительный сигнал.

Для устранения недостатков горячей точки измерения и обеспечения быстрого регулирования на заводе фирмы Preussag Stahl AG (г. Зальцгиттер, Германия) была разработана система регулирования на основе нейронной сети.

Данная система обходится без горячей точки измерения. Факторы, эффективно влияющие на толщину цинкового покрытия, обрабатываются нейронной сетью. Основными факторами являются давление в сопле, скорость полосы и расстояние сопла от полосы [11].

На распределение массы покрытия по ширине полосы влияют форма (неплоскостность) полосы и профиль щелевого сопла газового ножа. В реальных условиях параметры полосы изменяются во времени, а профиль сопла остается неизменным [12]. Поэтому компания

Siemens разработала собственную модификацию воздушных ножей SIROLL DAK®E с дистанционным регулированием в режиме реального времени профиля отверстия сопла в соответствии с фактической толщиной полосы, заданной толщиной покрытия и другими характеристиками рабочего режима линии. Профиль отверстия может изменяться в поперечном направлении на величину от 0,1 до 2,5 мм. Каждый воздушный нож оборудован устройством для автоматической очистки сопла, установленное с обеих сторон полосы.

Система DAK®E была установлена в линии цинкования CGL 3 компании Borcelik (Турция). На рис. 6 представлен контроллер толщины покрытия полосы.

Контроль покрытия осуществляется по длине полосы и по ширине в замкнутой цепи регулирования с целью минимизации колебаний толщины покрытия. Учитывая удаленность системы DAK®E от толщиномера, применяют упреждающий контроль для сокращения времени отклика замкнутой системы контроля.

В цепи контроля покрытия в продольном направлении осуществляется ввод коррекции давления газа в воздушных ножах. В цепи контроля покрытия в поперечном направлении происходит регулирование профиля щели сопла для каждого воздушного ножа.

По результатам измерений было установлено, что система DAK®E обеспечивает более плотное распределение (меньший разброс) результатов измерений относительно заданной величины, чем традиционная система. Также с данной системой возможно уменьшение расхода цинка на 6%, а заданной толщины цинкового покрытия на 2% [13].

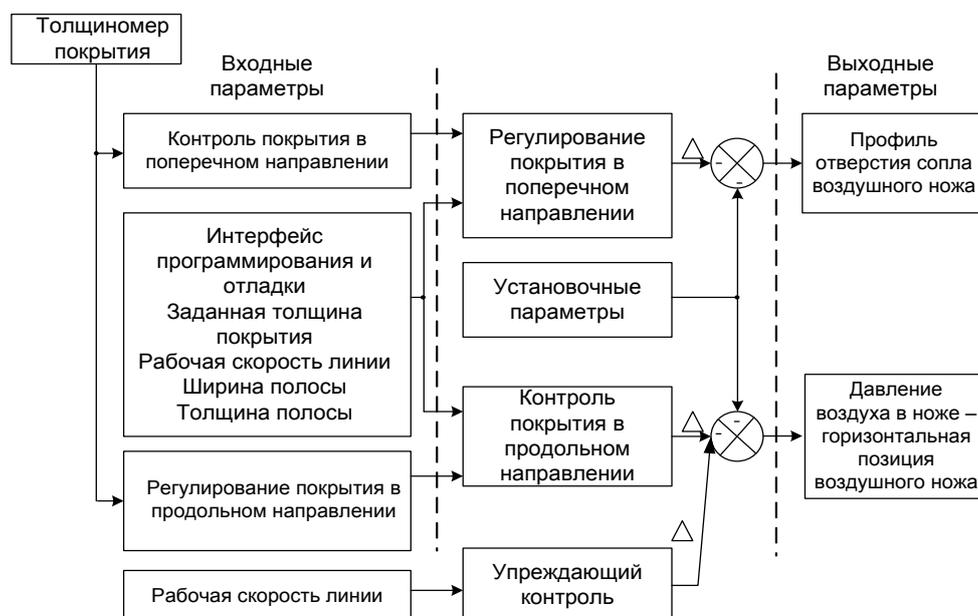


Рис. 6. Контроллер толщины покрытия

### Заключение

Основным требованием к покрытию, получаемому методом горячего погружения, является равномерность его толщины, жесткие допуски на толщину при минимальных производственных расходах, хорошее качество.

Система регулирования толщины цинкового покрытия имеет решающее значение при производстве высококачественной продукции в линиях нанесения покрытия.

Работа рассмотренных систем направлена на повышение равномерности и уменьшения отклонения толщины цинкового покрытия. Что позволяет уменьшить расход цинка и заданную толщину покрытия, обеспечив экономию цинка при сохранении отклонений толщины покрытия в заданных допусках.

Система регулирования и контроля позволяет повысить производительность и снизить расход материалов и энергии. Так же упрощает работу персонала, так как измерительные приборы интегрированы в системы управления процессом. Данные системы уже показывают хорошие результаты от их внедрения на производстве, и дальнейшее их усовершенствование сделает регулирование толщины покрытия еще более точным и повысит качество готовой продукции.

### ЛИТЕРАТУРА

- Окулов В.В. Цинкование. Техника и технология: приложение к журналу / Под редакцией проф. В.Н. Кудрявцева. – М.: Глобус, 2008. – 252 с.
- Беняковский М.А. Автомобильная сталь и тонкий лист / М.А. Беняковский, В.А. Масленников. – Череповец: Издательский дом Череповец, 2007. – 636 с.
- Лойд Джонс. Исследование магнитного способа удаления избытка цинка на агрегатах горячего цинкования / Лойд Джонс, Х. Баркер, В. Уорнер // Прокатное производство 1998. 25. №2. С.117-123.
- Агрегаты непрерывного горячего цинкования стальной полосы. – URL: [http://metallcheckiy-portal.ru/articles/zashita\\_ot\\_korrozii\\_metalla/gorachee\\_cinkovanie](http://metallcheckiy-portal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/gorachee_cinkovanie)
- Пахалуев В.М. Формирование тонкого цинкового покрытия на стальной полосе воздушным «ножом»/ В.М. Пахалуев, В.М. Кукушкин, Д.Л. Гринберг// Сталь. 1980. N3. С.207-209.
- Кукушкин В.М. Формирование цинкового покрытия на стальной полосе в агрегатах непрерывного действия / В.М. Кукушкин, С.И. Попель, В.М. Пахалуев, Д.Л. Гринберг// Сталь. 1980. N11. С.992-994.
- Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР № 606897, кл. С 23 С 1/14, 1978.
- Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР № 910832, кл. С 23 С 1/14, 1982.
- Райнер Ф. Измерение и контроль толщины покрытий / Металлургическое производство и технология: приложение к журналу «Черные металлы». ISSN 0934-8077. 2009, №2. С. 30-36.
- Thermo Electron Corporation. Толщиномеры для измерения толщины/веса металлического покрытия и система автоматического регулирования. Спецификация изделия. – URL: <http://www.thermo.com.cn/Resources/200802/productPDF31460.pdf>
- Цимник В. Модернизация горизонтального агрегата горячего цинкования на заводе фирмы Preussag Stahl AG/ В. Цимник, О. Шандерль // М.:Черные металлы, 1998. С.58-64.
- Ивамото Х. Новая конструкция газового ножа с регулируемым профилем сопла для горячего цинкования /Х. Ивамото, А Юмаши, Т. Изона // Прокатное производство. Новости черной металлургии за рубежом. 1999, N 1. С. 72-74.
- Харди Ж. Преимущество применения динамических воздушных ножей в линиях непрерывного цинкования/ Ж. Харди, Б. Гренье, С. Ёзер, М. Барас // Металлургическое производство и технология: приложение к журналу «Черные металлы» ISSN 0934-8077. 2013, №2. С. 46-53.
- 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.

15. 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. Головко // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2011. № 5. С. 41-50.
16. 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.
17. 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.

## OVERVIEW OF CONTROL SYSTEMS AND MEASURING THE THICKNESS OF THE ZINC COATING

I.G.Samarina<sup>1</sup>, V.E. Kayumova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** Modern control systems have the ability to accurately monitor and control the coating thickness on the strip. With them on the strip can be coated uniformly over the length and width. These systems increase performance and reduce the consumption of materials and energy. This article deals the control system of the thickness of the zinc coating on the continuous hot-dip galvanizing. For wiping excess zinc is used in these systems a new air knife system with adjustable lip gaps.

**Keywords:** hot-dip galvanizing, coating thickness, control system, air knife.

### REFERENCES

- Okulov V.V. Cinkovanie. *Tehnika i tehnologiya: prilozhenie k zhurnalu* [Galvanizing. Equipment and technology: annex to the magazine], Moscow, Globus, 2008, 252 p.
- Benyakovskiy M.A. *Avtomobilnaya stal i tonkiy list* [Automobile steel and thin leaf], Cherepovec, Izdatelskiy dom Cherepovec, 2007, 636 p.
- Dzhons Loyd, Barker H., Uorner V. Research of a magnetic way of zinc excess removal on hot galvanizing units [Issledovanie magnitnogo sposoba udaleniya izbytko cinka na agregatah goryachego cinkovaniya], *Prokatnoe proizvodstvo [Plate rolling]*, 1998, no. 2 (25), pp. 117-123.
- [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/zashita\\_ot\\_korrozii\\_metalla/gorachee\\_cinkovanie](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/gorachee_cinkovanie) (accessed 1 June 2016).
- Pahaluev V.M., Kukushkin V.M., Grinberg D.L. Formation of a thin zinc covering on a steel strip an air knife [Formirovanie tonkogo cinkovogo pokrytiya na stalnoy polose vozdushnym nozhom], *Stal [Steel]*, 1980, no. 3, pp. 207-209.
- Kukushkin V.M., Popel S.I., Pahaluev V.M., Grinberg D.L. Formation of a zinc covering on a steel strip in units of continuous action [Formirovanie cinkovogo pokrytiya na stalnoy polose v agregatah nepreryvnogo deystviya], *Stal [Steel]*, 1980, no. 11, pp. 992-994.
- Opisanie izobreteniya k avtorskomu svidetelstvu SSSR № 606897, kl. S 23 S 1/14* [The description of the invention to the copyright certificate of the USSR No. 606897, C. With 23 C 1/14], 1978.
- Opisanie izobreteniya k avtorskomu svidetelstvu SSSR № 606897, kl. S 23 S 1/14* [The description of the invention to the copyright certificate of the USSR No. 910832, C. With 23 C 1/14], 1982.
- Rayner F. Measurement and control of thickness of coverings [Izmerenie i kontrol tolschiny pokrytiy], *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tehnologiya: prilozhenie k zhurnalu «Chernye metally»* [Metallurgical production and technology: annex to the Ferrous metals magazine], 2009, no. 2, pp. 30-36.
- <http://www.thermo.com.cn/Resources/200802/productPDF31460.pdf> (accessed 1 June 2016).
- Cimnik V., Shanderl O. Modernization of the horizontal unit of hot galvanizing at plant of Preussag Stahl AG firm [Modernizatsiya gorizontalnogo agregata goryachego cinkovaniya na zavode firmy Preussag Stahl AG], *Chernye metally [Ferrous metals]*, 1998, pp. 58-64.
- Ivamoto H., Yumashi A., Izona T. New design of a gas knife with an adjustable profile of a nozzle for hot galvanizing [Novaya konstrukciya gazovogo nozha s reguliruemym profilom sopla dlya goryachego cinkovaniya], *Prokatnoe proizvodstvo. Novosti chernoy metallurgii za rubezhom [Rolling production. News of ferrous metallurgy abroad]*, 1999, no. 1, pp. 72-74.
- Hardi, Zh. Advantage of application of dynamic air knives in lines of continuous galvanizing [Preimuschestvo primeniya dinamicheskikh vozdushnykh nozhey v liniyakh nepreryvnogo cinkovaniya], *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tehnologiya: prilozhenie k zhurnalu «Chernye metally»* [Metallurgical production and technology: annex to the Ferrous metals magazine], 2013, no. 2, pp. 46-53.
- Pavlov A.S., Ryabchikov M.Yu., Mihalchenko E.S. Forecasting of production of defective production the unit of continuous hot galvanizing of JSC MMK by means of neural network model of process of heating of metal [Prognozirovaniye proizvodstva defektnoy produktsii agregatom nepreryvnogo goryachego cinkovaniya OAO «MMK» s pomoschyu neyrosetevoy modeli processa nagreva metalla], *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы [Electro-technical systems and complexes]*, 2009, no.17, pp.135-139.
- Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Golovko N.A. Use of heating of a band model for temperature mode control in the tower type lingering furnace [Ispol-zovanie modeli nagreva polosity pri upravlenii temperaturnym rezhimom v protyazhnoy pechi bashennogo tipa], *Neyrokompyutery: razrabotka, primeniye [Neurocomputers: development, application]*, 2011, no. 5, pp. 41-50.
- Ryabchikov M.Yu., Samarina I.G. Studying of strip heating dynamics in the lingering tower type furnace [Izuchenie rezhimov nagreva stalnoy polosity v protyazhnoy pechi bashennogo tipa dlya svetlogo otzhiga], *MetallООbrabotka [Metal working]*, 2013, no. 1 (73), pp. 43-49.
- Ryabchikov M.Yu., Rahmanov S.N., Belyakov A.A. Statistical models of heating of a strip in the lingering furnace of tower type of the unit of continuous hot galvanizing [Statisticheskie modeli nagreva polosity v protyazhnoy pechi bashennogo tipa agregata nepreryvnogo goryachego ocinkovaniya], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [The automated technologies and productions]*, 2012, no. 4, pp. 81-97.

## СЭМПЛИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

М.Ю. Рябчиков<sup>1</sup>, Е.С. Рябчикова<sup>2</sup>, А.И. Сунаргулова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Россия

<sup>1</sup>mr\_mgn@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы автономности и эффективности работы алгоритмов обработки данных, полученных в условиях действующих технологических процессов с использованием сэмплинга (отбора данных). Выполнен обзор современных достижений в области автоматизированного отбора информации с целью создания выборок статистической информации для последующего агрегирования данных и создания моделей на их основе.

**Ключевые слова:** сэмплинг; отбор данных; выборка данных для создания модели; алгоритмы обработки данных.

### Введение

Для эффективного использования систем поддержки принятия решений в производственных условиях [8, 9] часто требуется оценка степени соответствия рассчитываемых режимов типовым для агрегата. Для этого необходимо создание ограниченной по размеру базы данных, содержащей информацию по оценкам приемлемости использованных ранее режимов управления.

Современные процессы металлургического производства отличаются высокой информационной насыщенностью. Технологические датчики производят контроль не только параметров, напрямую связанных с технологическим процессом, но и параметров, которые обеспечивают функционирование второстепенных систем. Как правило, период опроса датчиков выбирается достаточно малым, и объем информации, поступающий с агрегата, поэтому избыточен. Поэтому такие базы данных технологических параметров имеют ограниченный срок хранения и обычно не содержат данных по всем используемым режимам.

В современных системах диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) содержатся средства для выявления причин возникновения сбоев. Например, в SCADA Intouch реализован механизм SPC [12], ведущий свою базу и представляющий результаты в виде диаграммы Парето. Однако, такие системы оказываются недостаточно эффективны, когда решается задача адаптации или формирования ограничений для задействованной в системе управления модели процесса, так как к выборкам данных предъявляется ряд требований. Например, на производстве часто возникает ситуация, когда существуют большие массивы информации о ходе технологического процесса в каком-то одном установившемся режиме, причем значения технологических параметров изменяются в очень узком диапазоне, а информация о переходных процессах в других режимах составляет очень небольшую долю.

Очевидно, что сам по себе сбор технологических данных еще не означает решения проблем управления качеством продукции. Необходимо применение алгоритмов обработки данных и принятия решений,

связанных с управлением технологическими агрегатами. Для условий металлургического гиганта ОАО «ММК» является актуальной задача повышения качества продукции на многих стадиях металлургического передела, из которых можно выделить такие задачи, как комплексная оптимизация аглококсодового производства, снижение доли дефектов конечной продукции, например, оцинкованного листа, получаемого на агрегатах непрерывного горячего оцинкования.

В 2014 году на ОАО «ММК» начато внедрение технологии обработки больших объемов данных. Потребность в ней возникла после формирования требований к информационному аудиту различных систем управления металлургическими производственными процессами, которые должны обеспечивать необходимый уровень качества продукции. Так как объем такой информации плохо поддается обработке традиционными методами, на ММК решили использовать специализированное программное обеспечение – Apache Hadoop [11].

Для решения задач обработки данных в Hadoop содержатся специализированные библиотеки Mahout и MLlib. Mahout включает в себя алгоритмы для кластеризации, коллаборативной фильтрации, случайных деревьев, а также несколько примитивов для факторизации матриц. В составе MLlib реализуются операции базовой статистики, линейная и логистическая регрессия, SVM (метод опорных векторов), k-means (алгоритм кластеризации), SVD (сингулярное разложение) и PCA (метод главных компонент), а также методы оптимизации SGD и L-BFGS [10].

Несмотря на высокую полезность при анализе больших данных, такие системы оказываются недостаточно эффективны, когда решается задача адаптации обучающей или задействованной в системе управления модели процесса, так как к выборкам, которые при этом используются, предъявляется ряд требований. Нередко возникают ситуации, когда в обучающем наборе данных доля примеров некоторого класса слишком мала (миноритарный класс). Настроенный на таких данных классификатор может оказаться абсолютно неэффективным, например, вследствие сильно выраженной гетеро-

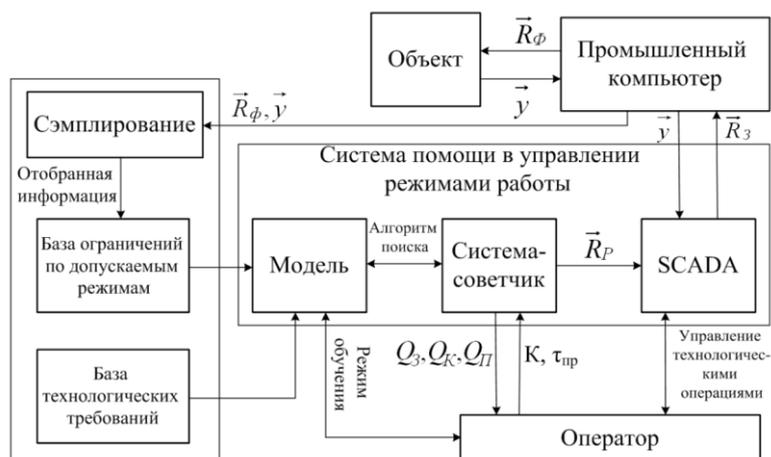


Рис.1. Структура информационного обмена системы управления технологическим объектом:

$\tau_{пр}$  – время процесса;  $Y$  – вектор контролируемых технологических параметров;  
 $\vec{R}_z, \vec{R}_\phi, \vec{R}_P$  – векторы заданного, фактического и рекомендуемого управления;  
 $Q_z, Q_P, Q_K$  – оценки затрат, производительности и качества получаемой продукции  
и режимов использования оборудования

скедастичности, и не будет удовлетворять требованиям к адекватности модели.

Одним из эффективных способов, позволяющих в таких условиях сформировать ограниченную по размеру выборку для последующей настройки модели или оперативного выбора режимов управления, является сэмплинг (отбор данных).

### Отбор технологической информации

Структура автоматизированной системы интеллектуальной поддержки (АСИП) управления технологическим процессом показана на рис. 1. Задачей системы является поиск режимов, соответствующих заданному оператором критерию  $K$ .

Результатом работы АСИП является схема распределения ресурсов управления по времени процесса, исходя из исходных условий и принятого критерия оптимизации. Для эффективного использования АСИП в производственных условиях требуется оценка степени соответствия рассчитываемых режимов типовым для агрегата, а также решение задач адаптации комплексной физико-химической модели процесса. Для этого необходим отбор данных и создание ограниченной по размеру базы данных, содержащей представительную информацию по использованным ранее режимам управления.

Теория сэмплинга представлена рядом направлений и стратегий, позволяющих решать широкий круг задач. В то же время отсутствие широкого внедрения в производственной сфере продуктов, позволяющих автоматизировать процесс создания ограниченных по размеру выборок данных, подготовленных для последующего создания моделей, свидетельствует о чрезвычайной сложности подобной задачи.

Ряд факторов, препятствующих созданию таких систем, связан с необходимостью предварительной индивидуальной настройки алгоритмов сэмплинга под каждую новую комбинацию данных. Многие алгоритмы

сэмплинга, требующие минимум такой настройки, являются чрезвычайно громоздкими в вычислительном плане и плохо применимы к задаче динамического отбора данных из массива оперативно поступающей информации.

В этой связи особую важность приобретает изучение особенностей современных алгоритмов сэмплинга, имеющих максимальную универсальность, и поиск путей повышения их скоростных показателей, в том числе за счет применения методов параллельных вычислений, что требует разработки специализированного алгоритмического и программного обеспечения.

Практическое применение сэмплинга к обработке динамично обновляющихся данных реального функционирующего технологического процесса осложнено рядом дополнительных причин.

Так, для многих технологических процессов характерна цикличность в выпуске различных видов продукции, период которой может достигать недель и месяцев. Возможно появление новых продуктов, данные по которым ранее не были представлены в выборке. В таких условиях работа стандартных алгоритмов сэмплинга может привести к сбою и интерпретации новых данных как нежелательного шума.

Для производственных процессов характерен достаточно быстрый износ контрольно-измерительной техники. В ходе замен старого оборудования могут быть установлены устройства нового типа. Периодически может производиться поверка и перенастройка измерительных устройств, а также изменение места их установки. Это также приводит к существенным проблемам при фильтрации данных, так как для одних и тех же условий процесса в течение различных временных интервалов приборы могут давать различные показания.

Простое добавление в качестве еще одного измерения гиперкуба параметров времени не является эффективным решением проблемы, так как не ясна периодичность, с которой должна производиться дискре-

тизация и разбивка на группы по данному измерению.

Одним из простейших подходов является применимый в рамках рассматриваемой проблемы стратифицированный сэмплинг, при котором генеральная совокупность сначала делится на подгруппы, а затем элементы случайным образом выбираются из каждой группы.

Рассмотрим пример использования стратифицированного сэмплинга. В цехе покрытий металлургического гиганта ОАО «ММК» ведется база данных значений основных и вспомогательных технологических параметров работы агрегата непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ). За два года была собрана информация объемом 10 млн. записей по тремстам параметрам, характеризующим работу агрегата. В ходе создания имитационной модели системы управления АНГЦ возникли проблемы, связанные с созданием математического описания процесса нагрева полосы в башенной печи АНГЦ, невыполнение требований которого ведет к получению дефектов. Учитывая значительный объем накопленной информации, было принято решение о создании нейросетевой модели расчета температуры полосы на выходе отделения нагрева [13], дополненной системой описания допустимых (реализованных ранее) режимов.

Было выделено семь ключевых факторов, определяющих текущее значение температуры нагрева полосы, и диапазоны значений по каждому из факторов были разбиты на интервалы. При использовании стратифицированного сэмплинга нужно учитывать, что при значительном числе факторов рост количества интервалов резко увеличивает объем выборки. В свою очередь, малое число интервалов снижает эффективность стратифицированного сэмплинга.

При шести интервалах для каждого фактора было получено, что все данные разместились на 38 тыс. комбинациях интервалов. При этом 1 640 тыс. комбинаций интервалов не содержат наборов, то есть заполненными оказались 2,4 % общего числа ячеек данных восьмерного (выходной параметр также рассматривается как измерение) гиперкуба, который можно рассматривать как описание существующих режимов работы отделения нагрева АНГЦ.

При отборе данных в ограниченную по размеру выборку задавали минимально допустимое количество наборов данных на комбинации интервалов значений факторов (группа). Для отбора данных по такому принципу необходима информация о заполненности комбинаций интервалов, задача хранения которой и обработки в производственных условиях сама по себе также является сложной. Задачу отбора данных в таком случае можно решить, анализируя свойства набора гиперкубов меньшей размерности, построенных на основе данных исходного гиперкуба, что снижает качество выборки.

Например, в исходном гиперкубе можно выделить 28 различных комбинаций по 2 фактора. Для каждой комбинации двух факторов ( $n = 2$ ) имеется  $6^2$  комбинаций интервалов, что дает в общем 1008 комбинаций интервалов. Согласно анализу данных, 17 комбинаций (1,68%) не содержат данных. Исключение из исходного гиперкуба элементов, которые образуют найденные проекции, позволяет при оценке допустимости режимов исключить 36% пустых интервалов. Если дополнительно принять

ограничение, что комбинация интервалов двух факторов не может содержать менее  $N = 500$  наборов, то будет исключено  $\xi_1 = 77,8\%$  пустых и  $\xi_2 = 6,7\%$  заполненных интервалов. Из табл. 1 видно, что уже при работе с комбинациями интервалов трех и четырех факторов можно добиться приемлемой классификации данных на реализованные ранее и новые режимы.

Полученные ограниченные по размеру выборки данных по режимам нагрева полосы на АНГЦ были использованы при адаптации математических моделей полосы, учитывающих особенности теплообмена в рабочем пространстве печи [14].

При отсутствии единой базы данных, в условиях динамично обновляющейся информации о текущем состоянии процесса рассмотренный подход может быть затруднен, так как предварительно неизвестны значения параметров плотности распределения данных в гиперкубе. Оценка этих параметров при значительном числе измерений является чрезвычайно сложной задачей.

В целом восстановление баланса классов может проходить двумя путями. В первом случае удаляют некоторое количество примеров мажоритарного (избыточного) класса, во втором – увеличивают количество примеров миноритарного (недостающего) [1]. Каждое из указанных направлений представлено своими стратегиями.

Например, может применяться метод одностороннего сэмплинга, при котором на первом этапе используется правило сосредоточенного ближайшего соседа, а далее удаляются все мажоритарные примеры, участвующие в связях Томека. При этом удаляются большие скопления мажоритарных примеров, а область со скоплением миноритарных очищается от шумовых эффектов.

Известна стратегия, основанная на правиле «очищающего» соседа, направленная на то, чтобы удалить те примеры, которые негативно влияют на исход классификации миноритарных. Для этого все примеры классифицируются по правилу трех ближайших соседей и удаляются мажоритарные примеры, которые получили верную метку класса или являются соседями миноритарных примеров, которые были неверно классифицированы.

Одним из основных требований, предъявляемых к системе автоматизированного сбора данных для последующей адаптации моделей, является требование ограниченности максимального размера выборки. При этом нужно учитывать, что кроме эффективных механизмов отбора экспериментальной информации, возможно дальнейшее повышение качества выборки за счет алгоритмов ее дополнения новыми данными, полученными расчетным способом. Простейший вариант реализации такого подхода – метод дублирования примеров миноритарного класса или применение алгоритма SMOTE, основанного на идее генерации некоторого количества искусственных примеров, которые были бы «похожи» на имеющиеся в миноритарном классе, но при этом не дублировали их.

Алгоритм SMOTE «вслепую» увеличивает плотность примерами в области слабо представленного класса. В случае, если миноритарные примеры равномерно распределены среди мажоритарных и имеют низкую плотность, алгоритм SMOTE только сильнее перемешает классы [2].

Результативность отбора данных по анализу гиперкубов размерности меньшей исходного гиперкуба

| $n$ | $N$   | $\xi_2, \%$ | $1 - \xi_1, \%$ | Относительные затраты памяти на классификатор, % |
|-----|-------|-------------|-----------------|--|
| 2   | 0     | 0,00        | 64,32           | 0,061  |
| 2   | 500   | 6,67        | 22,25           |  |
| 2   | 1000  | 16,56       | 13,57           |  |
| 2   | 2500  | 41,93       | 4,17            |  |
| 2   | 5000  | 63,14       | 1,29            |  |
| 2   | 10000 | 86,46       | 0,15            |  |
| 3   | 0     | 0,00        | 27,14           | 0,737  |
| 3   | 50    | 8,61        | 9,40            |  |
| 3   | 100   | 18,24       | 5,38            |  |
| 3   | 250   | 38,35       | 2,23            |  |
| 3   | 500   | 58,27       | 0,70            |  |
| 4   | 0     | 0,00        | 6,63            | 5,530  |
| 4   | 10    | 13,11       | 3,13            |  |
| 4   | 25    | 27,25       | 1,61            |  |
| 4   | 50    | 42,88       | 0,77            |  |
| 4   | 100   | 60,54       | 0,28            |  |
| 5   | 0     | 0,00        | 1,51            | 25,926   |
| 5   | 5     | 24,68       | 0,67            |  |
| 5   | 10    | 38,60       | 0,38            |  |
| 6   | 0     | 0,00        | 0,28            | 79,626   |
| 7   | 0     | 0,00        | 0,03            | $136,501 = 8 \cdot (6^7) / (6^8)$                |

В качестве решения данной проблемы известен алгоритм адаптивного искусственного увеличения числа примеров миноритарного класса ASMO (Adaptive Synthetic Minority Oversampling). Данный алгоритм включает в себя алгоритм SMOTE и применяется в случае, если наборы данных считаются «рассеянными». Он позволяет выделить несколько кластеров (например, с помощью алгоритма k-means) на основе примеров только миноритарного класса и применить алгоритм SMOTE только к примерам миноритарного класса, для которых находятся ближайшие соседи и на их основе создаются новые наборы данных.

Одним из важных для сэмплинга направлений является комплекс различных решений задач аппроксимации совместной плотности распределения вероятности точек в векторном пространстве признаков. Подобного рода информация может использоваться в задачах восстановления плотности как при отборе данных в выборку, так и при генерации новых данных, несмотря на то, что не существует наилучшего решения при подобном использовании оцененной плотности.

Решение задачи заполнения пропусков в  $n$ -мерных кубах данных заключается в получении распределений, которые даются маргинальными интегралами от совместной плотности  $P$ :

$$P(x_k | x_q^* \dots x_n^*) \approx \int dx_1 \dots dx_n P(x_1 \dots x_n, \dots, x_k, \dots, x_q^* \dots x_n^*).$$

Искомые функционалы могут быть определены Марковскими методами Монте-Карло с различными

вариациями. Одним из самых известных в этой области является алгоритм Метрополиса-Гастингса и его частный случай – сэмплирование по Гиббсу [3].

Алгоритм Метрополиса-Гастингса позволяет сэмплировать любую функцию распределения. Он основан на создании цепи Маркова, то есть на каждом шаге алгоритма новое выбранное значение  $x^{t+1}$  зависит только от предыдущего  $x^t$ . Алгоритм использует вспомогательную функцию распределения  $Q(x' | x^t)$ , зависящую от  $x^t$ , для которой генерировать выборку просто (например, нормальное распределение). Лучше всего алгоритм работает тогда, когда форма вспомогательной функции близка к форме целевой функции  $P$ . Однако добиться этого априори зачастую невозможно. Для решения этой проблемы вспомогательную функцию настраивают в ходе подготовительной стадии работы алгоритма, что ограничивает его применение в автоматизированных системах сбора данных.

К достоинству алгоритма Гиббса можно отнести возможность его работы без явно выраженного совместного распределения на основе условных вероятностей для каждой переменной.

Более независимым, с точки зрения необходимости вмешательства оператора, является алгоритм Slice sampling. Для него нет необходимости подстраивать вспомогательную функцию, и он предполагает автоматическую подстройку шага так, чтобы соответствовать локальной форме функции плотности [5]. В основе метода лежит положение о том, что можно сгенерировать

случайную переменную путем дополнительной генерации равномерно распределенной случайной величины под графиком функции плотности распределения исходной переменной. В случае одномерных распределений данный алгоритм успешно комбинируется с алгоритмом Метрополиса. К сожалению, с ростом числа измерений сэмпирование с помощью горизонтального “slice” осложняется возможными большими перемещениями (случайными блужданиями) в области пространства распределения. Известен ряд способов повышения эффективности алгоритма в таком случае [5, 6, 7].

Например, в работе [7] отмечается особенно сильное снижение эффективности алгоритма при сильной взаимозависимости нескольких переменных. Для таких переменных предлагается организация одновременного обновления с применением их совместного распределения. Отмечается существенная вычислительная сложность такого алгоритма из-за необходимости расчета большого количества оценок требуемого целевого распределения.

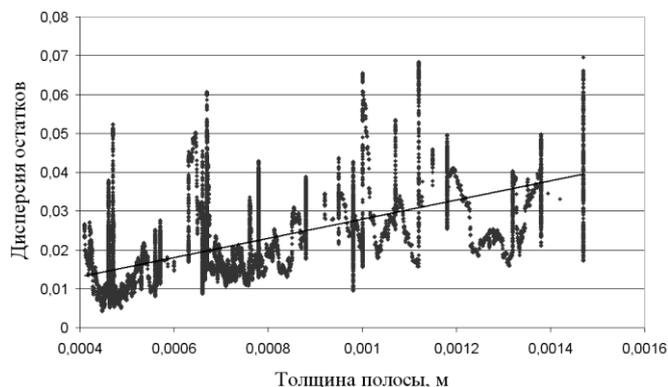
Среди алгоритмов, основанных на функциональном представлении плотности, можно выделить работу [4]. Автором предложено решение, основанное на нейросетевой аппроксимации плотности, в основе которого лежит замена аппроксимации эквивалентной задачей классификации. При этом рассмотрение ведется на уровне совместной многомерной плотности распределения вероятностей. Суть метода заключается в построении наилучшего решающего правила, позволяющего отличить наблюдаемую совокупность данных от некоторой искусственной, шумовой (например, равномерно распределенной) выборки с известной плотностью распределения.

Данный метод имеет ряд видимых проблем, основной из которых является проблема «проклятия» размерности. При росте числа переменных надежность статистического описания данных существенно снижается, требуя все больших их объемов. В то же время автор отмечает, что очень сложные, существенно многомерные формы поверхности плотности встречаются редко, делая данный метод достаточно жизнеспособным, если речь идет о достаточно большом объеме собранной информации.

Однако практическое применение данного метода в рамках решаемой задачи автономного динамического формирования выборки данных производственного процесса осложнено тем, что число примеров аппроксимируемой плотности, хоть и фиксировано на отдельный момент времени, но может постепенно изменяться в некоторых заданных пользователем пределах (установленных, исходя из назначения выборки). Одним из способов решения этой проблемы являются способы дообучения статистических моделей, развивающиеся в течение последнего десятилетия [15].

Если многомерная форма поверхности имеет сложный вид, то работоспособность приведенного метода остается под вопросом. Интерес представляет изучение метода в условиях сильной диспропорции между примерами миноритарного и мажоритарного классов по незначительному числу отдельных измерений, при относительно равномерном распределении мажоритарных примеров по измерениям. Примером может являться

распределение данных по толщине обрабатываемой на агрегате непрерывного горячего оцинкования полосы [13]. Наряду со стандартным сортаментом распространенных толщин, выборка содержит в незначительных количествах практически все промежуточные значения толщины между мажоритарными примерами. На рис. 2. приведен пример дисперсии остатков нейросетевой модели, настроенной по выборке после отбора данных.



**Рис. 2. Дисперсия остатков модели, рассчитанная по результатам сортировки остатков по возрастанию толщины полосы**

Рассмотренная ситуация может потребовать генерации шума по сложному распределению с совпадением пиков с искомым распределением, так как в противном случае возможно, что число сэмплов мажоритарного класса окажется слишком велико.

### Заключение

Возможным направлением дальнейшего совершенствования алгоритмов сэмпинга является поиск путей их адаптации к условиям, когда в наличии нет всех собранных данных о процессе, а имеется только текущее его состояние, отдельные выборки и модели, описывающие представление плотности распределения на текущий момент. При этом представляет интерес использование технологий дообучения статистических моделей плотности распределения данных.

Автоматизированный отбор данных из технологической информации (в форме пригодной для дальнейшего создания моделей технологических процессов) при ограничениях на затраты памяти актуален при создании систем помощи в выборе рекомендуемых режимов управления. Подобные системы также будут полезны специалистам, решающим задачи совершенствования и оптимизации технологических процессов, так как позволяют организовать сбор информации при минимальном привлечении рабочего персонала предприятия.

Интеграция систем сбора данных и создания моделей позволяет использовать результаты при создании интерактивных обучающих систем, работа которых основана на комплексе взаимодействующих моделей. Такие системы востребованы как предприятиями для обучения собственного персонала, так и в учебных заведениях различного уровня, где существуют специальности, ориентированные на конкретные технологические процессы.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Garcia S., Herrera F. Evolutionary Undersampling for Classification with Imbalanced Datasets: Proposals and Taxonomy, *Evolutionary Computation*, 2009, no.17(3), pp. 275-306.
2. Chawla N., Bowyer, K., Hall, L., Kegelmeyer, W. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2002, no.16, pp. 341-378.
3. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: Учеб. Пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010.
4. С.А. Терехов. Нейросетевые аппроксимации плотности распределения вероятности в задачах информационного моделирования. / Научная сессия МИФИ-2002. IV Всероссийская научно-техническая конференция “Нейроинформатика-2002”: Лекции по нейроинформатике. Часть 2. –М.: МИФИ, 2002. – 172 с.
5. Neal, R. M. Markov Chain Monte Carlo Methods based on ‘Slicing’ the Density Function. Technical report, Department of Statistics, University of Toronto. 1997.
6. Chandra, R., Dagum, L., Kohr, D., Maydan, D., McDonald, J., and Menon, R. Parallel programming in OpenMP. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 2001.
7. Matthew M. Tibbits, John C. Liechty, Murali Haran. Parallel Multivariate Slice Sampling. Department of Statistics Pennsylvania State University, USA. 2009.
8. 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.
9. Рябчиков М.Ю. Выбор режимов работы агрегата ковш-печь с использованием обобщенных оценок качества и затрат на процесс / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, Е.С. Рябчикова // Черные металлы. – 2014. – № 12 (996). – С. 28-34.
10. Nadoop: что, где и зачем / Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/240405/> – Заглавие с экрана.
11. ММК внедряет технологии обработки больших объемов данных / Режим доступа: <http://chelyabinsk-news.net/economy/2014/07/10/35480.html>. – Заглавие с экрана.
12. Андреев С.М.. Проектирование систем визуализации технологических процессов в среде Intouch / С.М. Андреев, М.Ю. Рябчиков. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. – 2010. – 160с.
13. 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.
14. 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.
15. Дмитриенко В.Д. Трехслойный перцептрон, способный дообучаться / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, В.А. Бречко // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – № 6. – С. 12 – 21.

---

## SAMPLING IN TECHNICAL DATA ACQUISITION TASKS

<sup>1</sup>M.Yu. Ryabchikov, <sup>2</sup>E.S. Ryabchikova, <sup>3</sup>A.I. Sunargulova  
<sup>1,2,3</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The paper considers the issues of autonomy and efficiency of processing algorithms for the data acquired using the sampling theory in the course of operating technical processes. We overview recent achievements in computer-aided data selection in order to form retrievals of statistical information for the purpose of subsequent data aggregation and to design models on their basis.

**Keywords:** sampling; data selection; data selection for modeling; data processing algorithms.

## REFERENCES

1. Garcia S., Herrera F. Evolutionary Undersampling for Classification with Imbalanced Datasets: Proposals and Taxonomy, *Evolutionary Computation*, 2009, no.17(3), pp. 275-306.
2. Chawla N., Bowyer, K., Hall, L., Kegelmeyer, W. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2002, no.16, pp. 341-378.
3. Paklin, N.B. and V.I. Oreshkov, 2010. Business analytics: from data to knowledge. SPb.: Piter.
4. Terekhov S.A. Neural network approximations of density of distribution of probability in problems of information modeling [Нейросетевые аппроксимации плотности распределения вероятности в задачах информационного моделирования], *Trudy “IV Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya “Neuroinformatika-2002””* [Neuroinformatics-2002], Moscow, 2002, pp. 172.
5. Neal, R. M. Markov Chain Monte Carlo Methods based on ‘Slicing’ the Density Function. Technical report, Department of Statistics, University of Toronto. 1997.
6. Chandra, R., Dagum, L., Kohr, D., Maydan, D., McDonald, J., and Menon, R. Parallel programming in OpenMP. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA. 2001.
7. Matthew M. Tibbits, John C. Liechty, Murali Haran. Parallel Multivariate Slice Sampling. Department of Statistics Pennsylvania State University, USA. 2009.

- 
7. Matthew M. Tibbits, John C. Liechty, Murali Haran. Parallel Multivariate Slice Sampling. Department of Statistics Pennsylvania State University, USA. 2009.
  8. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Grebennikova V.V. Features development and programming of mathematical models used in the training tasks of process management [Osobennosti razrabotki i programmirovaniya matematicheskikh modeley, ispolzuemyh v zadachah obucheniya upravleniyu tehnologicheskimi processami], *Informatizaciya obrazovaniya i nauki [Informatization of science and education]*, 2015, no. 3 (27), pp. 55-64.
  9. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Ryabchikova E.S. Choice of the technical procedures of the ladle furnace operation using generalized evaluations of quality and process expenditures [Vybor rezhimov raboty agregata kovsh-pech s ispolzovaniem obobshchennyh ocenok kachestva i zatrat na process], *Chernye metally [Ferrous metals]*, 2014, no. 12 (996), pp. 28-34.
  10. <http://habrahabr.ru/post/240405/> (accessed 20 June 2016).
  11. <http://chelyabinsk-news.net/economy/2014/07/10/35480.html> (accessed 20 June 2016).
  12. Andreev S.M., Ryabchikov M.Yu. *Proektirovanie sistem vizualizacii tehnologicheskikh processov v srede Intouch* [Design of technological processes visualization systems in the Intouch environment], Magnitogorsk, MG TU im. G.I. Nosova., 2010, 160 p.
  13. M.Yu. Ryabchikov, S.N. Rahmanov, A.A. Belyakov. Statistical models of strip heating in the lingering tower type furnace of the continuous hot galvanizing unit [Statisticheskie modeli nagreva polosy v protyazhnoy pechi bashennogo tipa agregata nepreryvnogo goryachego ocinkovaniya], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2012, no. 4 (2), pp. 81-97.
  14. Ryabchikov M.Yu., Samarina I.G. Studying of strip heating dynamics in the lingering tower type furnace [Izuchenie rezhimov nagreva stalnoy polosy v protyazhnoy pechi bashennogo tipa dlya svetlogo otzhiga], *Metalloobrabotka [Metalloobrabotka]*, 2013, no. 1 (73), pp. 43-49.
  15. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyy A.Yu., Brechko V.A. Three-layered perceptron that is able to learn [Trehslonnyy perceptron, sposobnyy doobuchatsya], *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2014, no. 6, pp. 12-21.

УДК 658.512.22

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО НЕЧЁТКОГО ПИД РЕГУЛЯТОРА<sup>1</sup>

Ю.И. Кудинов<sup>1</sup>, Ф.Ф. Пашенко<sup>2</sup>, А.В. Бухтияров<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем управления Российской Академии Наук, г. Москва, Россия

kaf-inf@stu.lipetsk.ru<sup>1</sup>, bkobri@gmail.com<sup>3</sup>

**Аннотация.** В работе рассматривается построение замкнутой системы управления с нечетким аналитическим ПИД регулятором и объектом – апериодическим звеном третьего порядка. С привлечением программы Simulink в замкнутой системе управления определялись параметры нечеткого аналитического ПИД регулятора. Полученные параметры обеспечили требуемое качество переходного процесса в замкнутой системе управления.

**Ключевые слова:** ПИД регулятор; нечёткое управление; нечёткие системы; аналитический синтез; система управления.

### Актуальность работы

Предлагается процедура настройки нечёткого ПИД регулятора аналитическим способом, позволяющая обеспечить требуемое качество управления в системах с нелинейным объектом.

### Основные проблемы и решения

В настоящее время для целей управления нелинейными объектами широко используются линейные ПИД регуляторы, которые не всегда обеспечивают требуемое качество регулирования. Данный недостаток можно устранить, применяя нечёткий аналитический ПИД регулятор, оснащённый процедурой оптимизации его параметров. Системы на основе нечетких регуляторов имеют достаточно широкую область применения [6-8].

### Описание аналитического нечёткого ПИД регулятора

Аналитический нечеткий ПИД или ПИ+Д регулятор содержит нечеткие ПИ ( $\tilde{f}_{\text{пи}}$ ) и Д ( $\tilde{f}_{\text{д}}$ ) составляющие, имеющие по два входа, изображенные на рис. 1.

Выход аналитического нечеткого ПИ регулятора  $u_{\text{пи}}$  (рис. 1) является функцией ошибки  $e$  и ее скорости  $\dot{\Delta}e$ , а выход нечеткого Д регулятора  $u_{\text{д}}$  – функцией задания  $y^0$  и изменения выхода  $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$  [1]:

$$u(k) = u_{\text{пи}}(k) + u_{\text{д}}(k) = \tilde{f}_{\text{пи}}(K_e e(k), K_{\Delta e} \dot{\Delta}e(k)) K_{\Delta u} + \sum_{i=1}^k \Delta u_{\text{пи}}(i) + \tilde{f}_{\text{д}}(K_d \Delta y(k), K y^0) K_{ud} - \sum_{i=1}^k \Delta u_{\text{д}}(i). \quad (1)$$

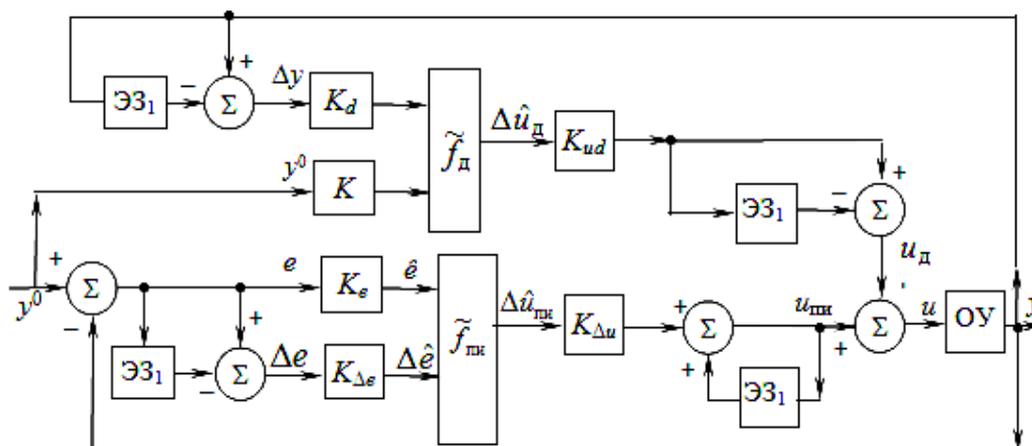


Рис. 1. Схема нечёткого аналитического ПИ+Д регулятора

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 14-19-01772

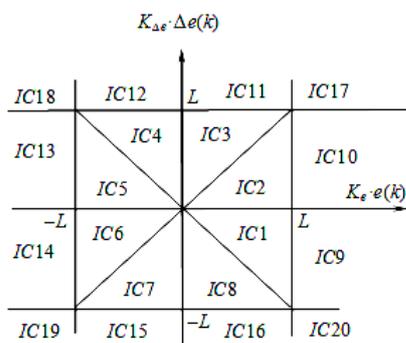


Рис. 2. Сектора разбиения пространств переменных ПИ регулятора

В данной работе реализация нечёткого ПИД регулятора осуществляется при помощи аналитической модели, состоящей из секторов разбиения переменных ошибки и скорости изменения ошибки, а также формул для расчета инкрементного управления, связанных с каждым сектором.

На рис. 2 представлено разбиение пространств переменных  $K_e e(k)$  и  $\Delta e(k)$  аналитической модели нечёткого ПИ регулятора на 20 секторов [2,3].

Формулы для вычисления инкрементного ПИ управления представлены в табл. 1.

На рис. 3 представлено разбиение пространств переменных  $K_d \Delta y(k)$  и  $K_y y_d(k)$  аналитической модели нечёткого Д регулятора на 20 секторов [2,3].

Соотношения для вычисления инкрементного Д управления представлены в табл. 2.

### Оптимизация параметров аналитического нечеткого ПИД регулятора

Приступим к построению модели и оптимизации в MATLAB - Simulink замкнутой цифровой системы управления (рис. 4), содержащей нечеткий ПИД регулятор и объект управления с передаточной функцией:

Таблица 1

| ICN     | $K_e e(k), \Delta e(k)$   |
|---------|---|
| 1,2,5,6 | $\Delta u(k) = \frac{L[K_e e(k) + K_{\Delta e} \cdot \Delta e(k)]}{2(2L - K_e  e(k) )}$                 |
| 3,4,7,8 | $\Delta u(k) = \frac{L[K_e e(k) + K_{\Delta e} \cdot \Delta e(k)]}{2(2L - K_{\Delta e}  \Delta e(k) )}$ |
| 9,10    | $\Delta u(k) = \frac{1}{2}[L + K_{\Delta e} \cdot \Delta e(k)]$   |
| 11,12   | $\Delta u(k) = \frac{1}{2}[L + K_e \cdot e(k)]$   |
| 13,14   | $\Delta u(k) = \frac{1}{2}[-L + K_{\Delta e} \cdot \Delta e(k)]$  |
| 15,16   | $\Delta u(k) = \frac{1}{2}[-L + K_e \cdot e(k)]$  |
| 18,20   | $\Delta u(k) = 0$   |
| 17      | $\Delta u(k) = -L$  |
| 19      | $\Delta u(k) = L$   |

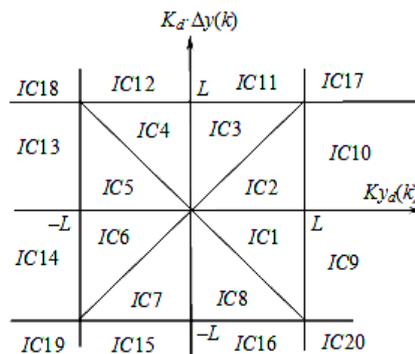


Рис. 3. Карта пространств переменных Д регулятора

$$W(s) = \frac{1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

Для создания модели цифровой системы управления с нечетким ПИД регулятором в пакете динамического моделирования Simulink в окне MATLAB перейдем на вкладку Simulink Library, откроется окно элементов Simulink Library Browser. Командой File, New Model откроем окно модели "Untitled".

В окне "Simulink Library Browser" (рис. 5) найдем категорию Simulink, в ней выделим подкатеорию Sources, а в правой части окна - блок Step, вырабатывающий единичную ступенчатую функцию. Удерживая нажатой левую кнопку мыши, перетащим значок блока Step в окно моделирования. "Untitled". Двойным щелчком на блоке Step, откроем окно параметров, в котором установим момент возникновения единичного скачка Step time: 0 с, его начальную величину Initial value: 0, конечную величину Final value: 1 и интервал дискретности Sample time: 0.1.

Аналогичным образом из подкатегории Math Operations перетащим блок сравнения Sum в окно моделирования. Дважды щелкая на элементе сравнения

Таблица 2

| ICN     | $K_e e(k), \Delta e(k)$  |
|---------|--|
| 1,2,5,6 | $\Delta u_D(k) = \frac{L[K_y y_d(k) + K_d \Delta y(k)]}{2(2L - K  y_d(k) )}$   |
| 3,4,7,8 | $\Delta u_D(k) = \frac{L[K_y y_d(k) + K_d \Delta y(k)]}{2(2L - K_d  y_d(k) )}$ |
| 9,10    | $\Delta u_D(k) = \frac{1}{2}[L - K_d \cdot \Delta y(k)]$                       |
| 11,12   | $\Delta u_D(k) = \frac{1}{2}[-L + K_y y_d(k)]$                                 |
| 13,14   | $\Delta u(k) = \frac{1}{2}[-L - K_d \Delta y(k)]$                              |
| 15,16   | $\Delta u(k) = \frac{1}{2}[L + K_e \cdot y_d(k)]$                              |
| 18,20   | $\Delta u(k) = 0$  |
| 17      | $\Delta u(k) = -L$   |
| 19      | $\Delta u(k) = L$  |

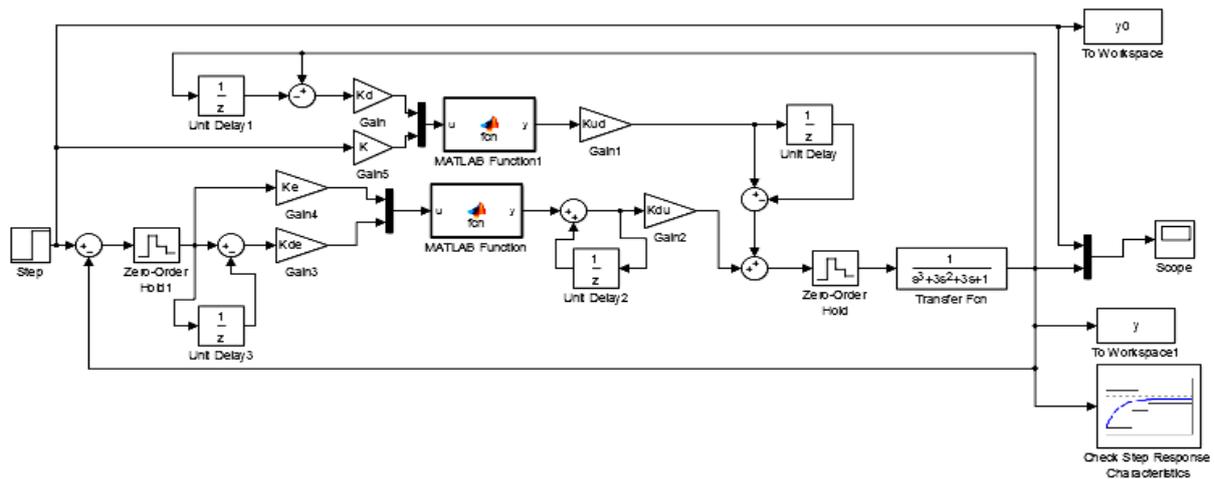


Рис. 4. Схема ПИ+Д регулятора, выполненная в MATLAB Simulink

Sum, откроем окно параметров и в поле List of sign (список знаков) правый знак + заменим на -, а в поле Sample time (время дискретизации) подставим 0.1 и нажмем ОК. При нажатии левой клавиши мыши соединим блоки Step и Sum.

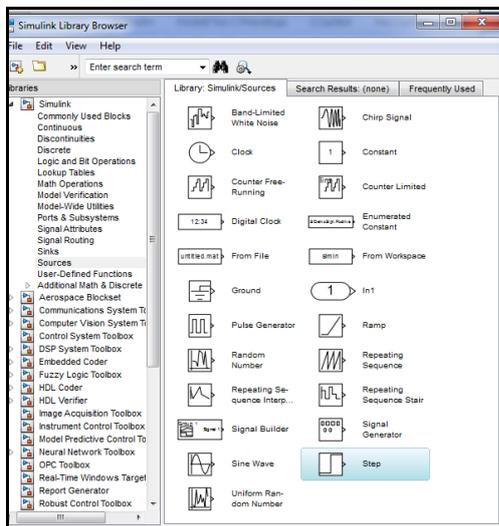


Рис. 5. Окно библиотеки Simulink

В модель цифровой замкнутой системы управления из категории Simulink и подкатегории Math Operations перетащим блоки Gain и Unit Delay в окно моделирования. Двойным щелчком на блоке Gain (или Gain1) откроем окно параметров и зададим в поле Gain: Ke (или K, Ku, Kde, Kdu, Kud), а в поле Sample time: 0.1 и нажмем кнопку ОК. Из подкатегории Simulink Design Optimization перейдем в подкатегорию Signal Constraints (АЦП и ЦАП).

Из категории User-Defined Functions перенесём блок MATLAB Function в окно модели.

Из подкатегории Continuous перетащим блок передаточной функции объекта Transfer Fcn в окно модели. Дважды щелкнем на блоке Transfer Fcn и откроем окно передаточной функции с параметрами числителя (Numerator) и знаменателя (Denominator) обобщенной передаточной функции  $n$ -го порядка.

Тогда согласно выражению передаточной функции объекта введем следующие значения для Numerator: [1] и Denominator: [1 3 3 1] и нажмем ОК. Соединим блоки

Sum, Gain, Zero-Order Hold, Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer, Gain2, Zero-Order Hold1, Transfer Fcn.

В окно модели из категории Simulink и подкатегории Sink перетащим два блока To Workspace, подкатегории Commonly Used Block - блок мультиплектора сигналов Mux и блок осциллографа Scope с двумя входами. Двойным щелчком по блоку Scope откроем его окно и введем ряд параметров. Установим курсор на линии ординат и нажатием правой кнопки вызовем окно, в котором выделим опцию Axes properties и в появившемся окне введем значения нижнего Y-min: 0 и верхнего Y-max: 1.41 пределов изменения выхода системы и нажмем ОК. Соединим блок Transfer Fcn с блоком Mux, а последний - с блоком Scope. Для того, чтобы после блока Step сделать отвод линии на мультиплексор Mux, щелкнем левой кнопкой мыши по линии, соединяющей блоки Step и Sum, и, удерживая клавишу Ctrl, мышью создадим отвод линии. Аналогичным образом проведем линию отрицательной обратной связи или отвод от линии, соединяющей блоки Transfer Fcn и Mux, до блока Sum.

В настройках всех блоков Gain во вкладке Parameter Options в значении Parameter Minimum требуется обязательно указать значение 0 для того, чтобы в дальнейшем их значения изменялись в пределах от нуля до бесконечности.

В блоке MATLAB Function заключены следующие соотношения для расчета инкрементного управления  $\Delta u(k)$ .

В блоке MATLAB Function1 заключены следующие соотношения для расчета инкрементного управления  $\Delta u_D(k)$ .

Принадлежность пары входов  $\hat{e} = K_e e$  и  $\Delta \hat{e} = K_{\Delta e} \Delta e$  к одной из 20 областей ICN,  $N = 1, 20$  определяется условиями принадлежности из табл. 3.

Аналогичным образом описываются области для  $K_e e(k)$ ,  $\Delta e(k)$ .

После построения модели в SIMULINK MATLAB, приступим к реализации программного кода, в которой будут содержаться соотношения расчета инкрементного управления. Для этого, для ПИ-составляющей, двойным щелчком по блоку MATLAB function откроем окно, в котором опишем соотношения, представленные ниже.

| ICN  | Условия принадлежности к области ICN   |
|------|--|
| IC1  | $(\hat{e} > 0) \text{ И } (\hat{e} < L) \text{ И } (\Delta\hat{e} > -L) \text{ И } (\Delta\hat{e} < 0) \text{ И } (\Delta\hat{e} > -\hat{e})$ .                    |
| IC2  | $(\hat{e} \geq 0) \text{ И } (\hat{e} \leq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \geq 0) \text{ И } (\Delta\hat{e} \leq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \leq \hat{e})$ .       |
| IC3  | $(\Delta\hat{e} > \hat{e}) \text{ И } (\Delta\hat{e} \leq L) \text{ И } (\hat{e} \leq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \geq 0)$ .                                      |
| IC4  | $(\Delta\hat{e} + \hat{e} \geq 0) \text{ И } (-\hat{e} \geq 0) \text{ И } (-\hat{e} \geq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \leq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \geq 0)$ . |
| IC5  | $(\Delta\hat{e} > -\hat{e}) \text{ И } (-\hat{e} > 0) \text{ И } (-\hat{e} > L) \text{ И } (\Delta\hat{e} > 0) \text{ И } (\Delta\hat{e} < L)$ .                   |
| IC6  | $(\Delta\hat{e} \geq \hat{e}) \text{ И } (-\hat{e} \geq 0) \text{ И } (-\hat{e} \geq -L) \text{ И } (-\Delta\hat{e} \leq 0) \text{ И } (-\Delta\hat{e} \geq -L)$ . |
| IC7  | $(-\Delta\hat{e} + \hat{e} < 0) \text{ И } (-\hat{e} > 0) \text{ И } (-\hat{e} < -L) \text{ И } (-\Delta\hat{e} < 0) \text{ И } (-\Delta\hat{e} > -L)$ .           |
| IC8  | $(\Delta\hat{e} + \hat{e} \geq 0) \text{ И } (\hat{e} \geq 0) \text{ И } (\hat{e} \leq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \geq -L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \leq 0)$ .  |
| IC9  | $(\Delta\hat{e} \geq -L) \text{ И } (\hat{e} \geq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \leq 0)$ .  |
| IC10 | $(\Delta\hat{e} < L) \text{ И } (\hat{e} > L) \text{ И } (\Delta\hat{e} > 0)$ .  |
| IC11 | $(\hat{e} \geq 0) \text{ И } (\hat{e} \leq L) \text{ И } (\Delta\hat{e} \geq L)$ .   |
| IC12 | $(-\hat{e} \geq -L) \text{ И } (-\hat{e} \geq 0) \text{ И } (\Delta\hat{e} \geq L)$ .  |
| IC13 | $(-\Delta\hat{e} \geq 0) \text{ И } (-\Delta\hat{e} \geq -L) \text{ И } (-\hat{e} \leq -L)$ .  |
| IC14 | $(-\hat{e} \leq -L) \text{ И } (-\hat{e} \leq -L) \text{ И } (-\Delta\hat{e} \geq 0) \text{ И } (-\Delta\hat{e} \geq -L)$ .  |
| IC15 | $(\hat{e} \geq 0) \text{ И } (\hat{e} \geq -L) \text{ И } (-\Delta\hat{e} \leq -L)$ .  |
| IC16 | $(\hat{e} \geq L) \text{ И } (\hat{e} \geq 0) \text{ И } (-\Delta\hat{e} \leq -L)$ .   |
| IC17 | $(\Delta\hat{e} > L) \text{ И } (\hat{e} > L)$ .   |
| IC18 | $(\Delta\hat{e} > L) \text{ И } (-\hat{e} < -L)$ .   |
| IC19 | $(-\Delta\hat{e} < -L) \text{ И } (-\hat{e} < -L)$ .   |
| IC20 | $(-\Delta\hat{e} < -L) \text{ И } (\hat{e} > L)$ .   |

```
function y = fcn(u)
y=zeros(1,1);
L=1;
if u(1)>0 && u(1)<L && u(2)>-L && u(2)<0 &&
u(2)>-u(1) || u(1)>=0 && u(1)<=L && u(2)>=0 &&
u(2)<=L && u(2)<=u(1) || u(2)>-u(1) && -u(1)>0 &&
-u(1)>L && u(2)>0 && u(2)<L || u(2)>=u(1) &&
-u(1)>=0 && -u(1)>=-L && -u(2)<=0 && -u(2)>=-L
y=(L*(u(1)+u(2)))/(2*(2*L-u(1)));
disp('1');
elseif u(2)>u(1) && u(2)<L && u(1)<L &&
u(2)>0 || u(2)+u(1)>=0 && -u(1)>=0 && -u(1)>=L &&
u(2)<=L && u(2)>=0 || -u(2)+u(1)<0 && -u(1)>0 &&
-u(1)<-L && -u(2)<0 && -u(2)>-L || u(2)+u(1)>=0 &&
u(1)>=0 && u(1)<=L && u(2)>=-L && u(2)<=0
y=(L*(u(1)+u(2)))/(2*(2*L-u(2)));
disp('2');
elseif u(2)>=-L && u(1)>=L && u(2)<=0 || u(2)<L &&
u(1)>L && u(2)>0
y=0.5*(L+u(2));
disp('3');
elseif u(1)>=0 && u(1)<=L && u(2)>=L || -u(1)>-L &&
-u(1)>0 && u(2)>L
y=0.5*(L+u(1));
disp('4');
elseif -u(2)>=0 && -u(2)>=-L && -u(1)<=-L || -u(1)<-L &&
-u(2)>0 && -u(2)>-L
y=0.5*(-L+u(2));
disp('5');
elseif u(1)>=0 && u(1)>=-L && -u(2)<=-L || u(1)>L &&
u(1)>0 && -u(2)<-L
y=0.5*(-L+u(1));
disp('6');
```

```
elseif u(2)>L && -u(1)<=-L || -u(2)<-L && u(1)>=L
y=0;
disp('7');
elseif u(2)>=L && u(1)>L
y=-L;
disp('8');
elseif -u(2)<=-L && -u(1)<-L
y=L;
disp('9');
end
end
Для создания Д-составляющей двойным щелчком
по блоку MATLAB function1 откроем окно, в котором
запишем следующий программный код:
function y = fcn(u)
y=zeros(1,1);
L=1;
if y>0 && y<L && u>-L && u<0 && u>-y || y>=0 &&
y<=L && u>=0 && u<=L && u<=y || u>-y && -y>0 &&
-y>L && u>0 && u<L || u>=y && -y>=0 && -y>=-L &&
-u<=0 && -u>=-L
y=(L*(y+u))/(2*(2*L-y));
disp('1');
elseif u>y && u<L && y<L && u>0 || u+y>=0 && -y>=0
&&
-y>=L && u<=L && u>=0 || -u+y<0 && -y>0 && -y<-L
&& -u<0 && -u>-L || u+y>=0 && y>=0 && y<=L &&
u>=-L && u<=0
y=(L*(y+u))/(2*(2*L-u));
disp('2');
elseif u>=-L && y>=L && u<=0 || u<L && y>L && u>0
y=0.5*(L-u);
disp('3');
```

```

elseif y>=0 && y<=L && u>=L || -y>-L && -y>0 && u>L
    y=0.5*(-L+y);
    disp('4');
elseif -u>=0 && -u>=-L && -y<=-L || -y<-L && -u>0 && -
u>L
    y=0.5*(-L-u);
    disp('5');
elseif y>=0 && y>=-L && -u<=-L || y>L && y>0 && -u<-L
    y=0.5*(L+y);
    disp('6');
elseif u>L && -y<=-L || -u<-L && y>=L
    y=0;
    disp('7');
elseif u>=L && y>L
    y=-L;
    disp('8');
elseif -u<=-L && -y<-L
    y=L;
    disp('9');
end
end

```

В командной строке Matlab зададим значения коэффициентов  $K=1$ ,  $K_e = 0.5$ ,  $K_{de} = K_e / 3.1$ ,  $K_{du} = 3.6 / K_{de}$ ,  $K_d = 1$ ,  $K_{ud} = 1$  и запустим процесс моделирования системы управления нажатием Start simulation. В блоках Display отразятся текущие значения коэффициентов  $K_e$ ,  $K_u$  и  $K_{de}$ . В ходе симуляции был получен график переходного процесса в окне Scope (рис. 6).

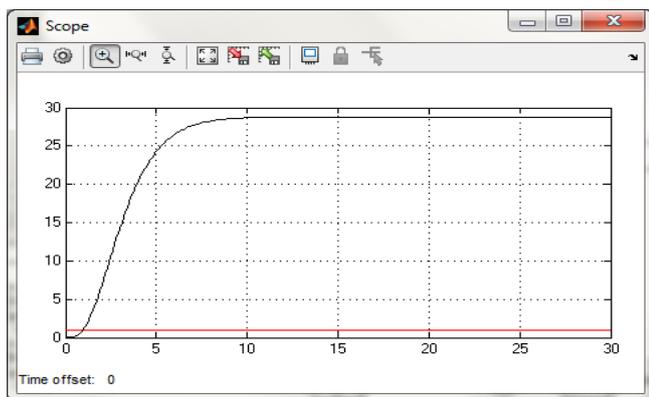


Рис. 6. Исходный график переходного процесса

Двойным щелчком по блоку Check Step Response Characteristics откроем окно задания параметров блока “Sink Block Parameters: Check Step Response Characteristics” (рис. 7) и зададим границы выходного сигнала: время нарастания (Rise time) – не более 5 с и длительность переходного процесса (Setting time) – не более 15 с, поставим флажок напротив Show plot on block open.

Для выбора дополнительных параметров оптимизации нажмем на кнопку Response Optimization, в результате чего откроется окно “Design Optimization” (рис. 8).

Перетащим мышью в поле Model Workspace коэффициенты, подлежащие оптимизации. После чего зададим переменные, за счет оптимизации которых будет улучшено качество переходного процесса. Для этого на вкладке Response Optimization в поле Design Variables Set выберем пункт New. Откроется окно “Create Design

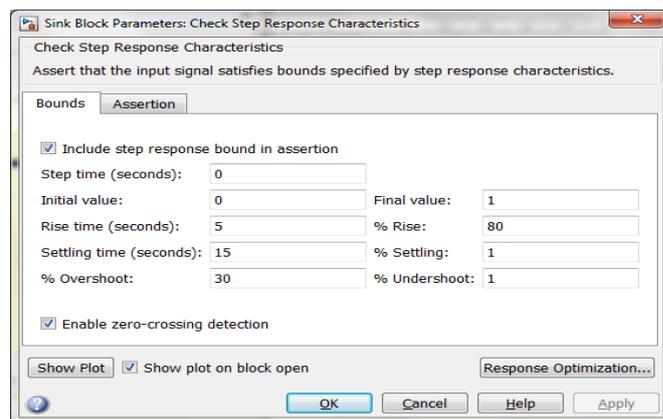


Рис. 7. Окно настройки блока оптимизатора

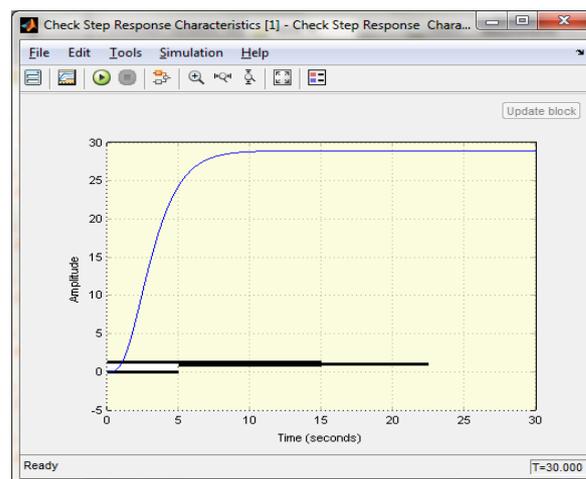


Рис. 8. Окно Design Optimization

Variables Set”, в правой части которого выберем настраиваемые переменные  $K_e$ ,  $K_{de}$  и  $K_u$  и с помощью стрелки перенесем их в левую часть окна, как изображено на рис. 9.

В окне “Design Optimization” запустим процесс оптимизации параметров регулятора, используя алгоритм Pattern Search.

Если график переходного процесса не укладывается в границы коридора, заданного на рис. 7, 8, и снижается скорость сходимости, нажимаем на кнопку Options и на вкладке Optimization method заменяем метод оптимизации Pattern Search на Simplex Search (рис. 10), после чего снова запускаем процесс оптимизации.

При каждом снижении скорости сходимости меняем попеременно алгоритм оптимизации Pattern Search на Simplex Search, а затем Simplex Search на Pattern Search и т. д., до тех пор, пока не получим график оптимального переходного процесса (рис. 11), удовлетворяющего принятым ограничениям.

В командной строке MATLAB введём программу для расчета среднемодульной ошибки

```

k=0; Sum=0;
for i=1:315
    if abs(y0(i)-y(i))/y0(i)<0.05
        k=k+1;
        y0(k)=y0(i);
        y(k)=y(i);
    end
end;
sum(abs(y0-y)/1)/k

```

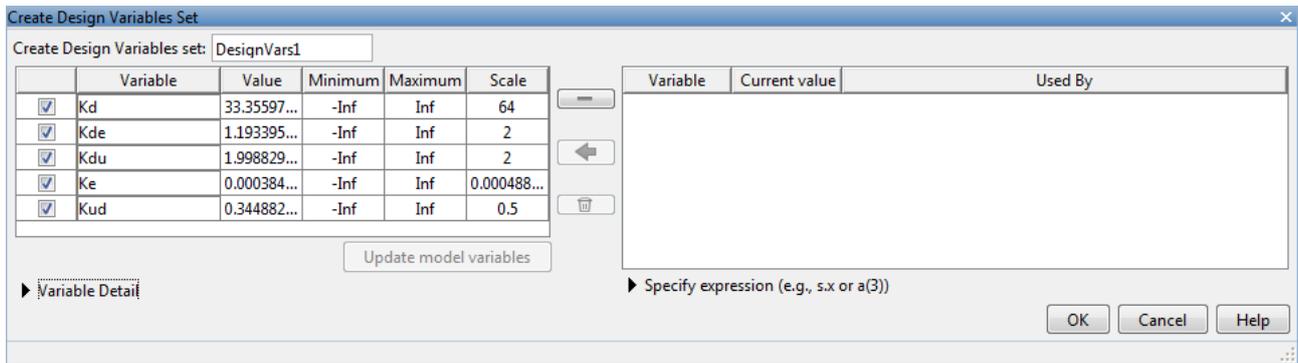


Рис. 9. Окно выбора переменных

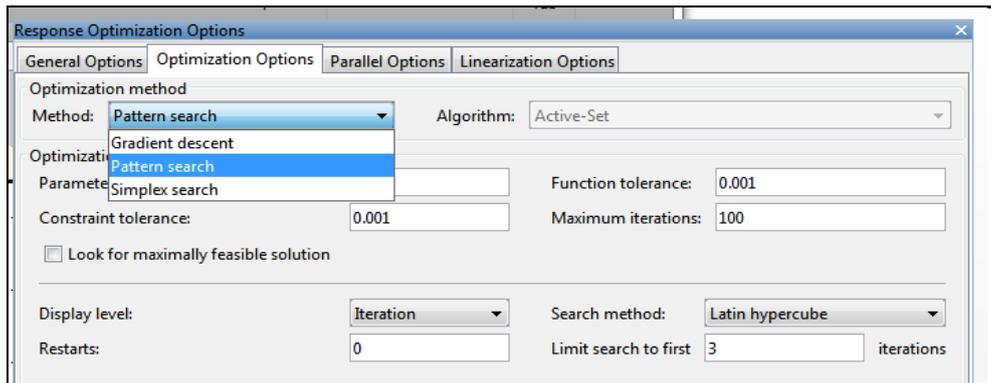


Рис. 10. Окно свойств оптимизации

При найденных коэффициентах  $K_e = 0.00004$ ,  $K_d = 1.4957$ ,  $K_{de} = 0.1724$ ,  $K_{du} = 20.9764$ ,  $K_{ud} = 1.1383$  среднемодульная ошибка составила 0,0056%, что говорит о высоком качестве процесса регулирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов Ю.И. Методы синтеза и настройки нечетких ПИД регуляторов Мамдани / Ю.И. Кудинов, А.Ю. Келина // Приложение к журналу «Информационные технологии», 2012, №6. – С. 2-32.
2. G. Chen, T.T. Pham, Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems, CRC Press, London, 2001, 313p.
3. Y. Nao, Fuzzy Control and Modeling, IEEE Press, New York, 2000, 310p.
4. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К. Радиоаматор, 2008. – 972 с.
5. Chen G., Pham T.T., Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems, CRC Press, London, 2001, 313p.
6. 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.
7. Рябчиков М.Ю. Достижение максимальной производительности оптимизируемого процесса измельчения руды при использовании принципов нечеткого экстремального управления / М.Ю. Рябчиков, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, Е.С. Рябчикова, Н.А. Головкин, П.Г. Полько // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 2. С. 5-9.
  8. 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. Головкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4. С. 65-69.

## ESTIMATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE ANALYTICAL FUZZY PID REGULATOR

Y.I. Kudinov<sup>1</sup>, F.F. Paschenko<sup>2</sup>, A.V. Bukhtiyarov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk

<sup>2</sup>Institute of Control Problems RAS, Russia, Moscow

**Abstract.** The paper deals with the construction of closed-loop control system with fuzzy analytical PID controller and the object - the aperiodic links of the third order. With the use of Simulink software in closed-loop control system, the parameters of fuzzy analytical PID determined. These options provide the desired quality of the transition process in the closed-loop control system.

**Keywords:** PID regulator; fuzzy control; fuzzy systems; analytical synthesis; control system.

---



---

REFERENCES

1. Kudinov Yu.I., Kelina A.Yu. Synthesis and control methods of Mamdani indistinct PID regulators [Metody sinteza i nastroyki nechetkih PID regulyatorov Mamdani], *Prilozhenie k zhurnalu «Informacionnye tehnologii» [Annex to the Information Technologies magazine]*, 2012, no. 6, pp. 2-32.
2. G. Chen, T.T. Pham, *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, London. – 2001, - 313c.
3. Y. Hao, *Fuzzy Control and Modeling*, IEEE Press, New York, - 2000, - 310c.
4. Gostev V.I. *Nechetkie regulatory v sistemah avtomaticheskogo upravleniya* [Indistinct regulators in systems of automatic control], Kiev, Radioamator, 2008, 972 p.
5. Chen G., Pham T.T., *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, London, 2001, 313p.
6. Polko P.G., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Ryabchikov M.Yu., Andreev S.M., Parsunkin B.N. Algorithm of indistinct management for synthesis of digital contours of automatic stabilization of technological parameters [Algoritm nechetkogo upravleniya dlya sinteza cifrovyyh konturov avtomaticheskoy stabilizatsii tehnologicheskikh parametrov], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in the industry]*, 2010, no. 11, pp. 32-37.
7. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Golovko N.A., Polko P.G. Achievement of the maximum productivity of the optimized process of ore crushing when using the principles of indistinct extreme management [Dostizhenie maksimalnoy proizvoditelnosti optimiziruemogo processa izmelcheniya rudy pri ispolzovanii principov nechetkogo ekstremalnogo upravleniya], *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik MSTU]*, 2011, no. 2, pp. 5-9.
8. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Polko P.G., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Golovko N.A. Indistinct extreme management of ore crushing process for ensuring the maximum productivity [Nechetkoe ekstremalnoe upravlenie processom izmelcheniya rudy dlya obespecheniya maksimalnoy proizvoditelnosti], *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik MSTU]*, 2011, no. 4, pp. 65-69.

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

С.Д.Хайдаров<sup>1</sup>, А. Г.Солиев<sup>2</sup>, Ш.Ш. Рустамова<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> МВиССО РУз «Ташкентский государственный технический университет им. А.Р. Беруни»,  
г. Ташкент, Узбекистан  
penturikkio@bk.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются сложные электромеханические переходные процессы в простой электрической системе, которые характеризуются электромеханическими колебаниями синхронных машин. Несмотря на большое число степеней свободы регулируемой синхронной машины, электромеханические колебания в простой системе установлены как практически одночастотные. В силу большой механической инерции ротора и большой постоянной времени обмотки возбуждения синхронных машин, не пропускают высокочастотные колебания, вызываемые электромагнитными контурами системы регулирования возбуждения. Для оценки качества электромеханических колебаний по частоте свободных колебаний и коэффициенту затухания определены их численные значения, необходимые для отстройки релейной защиты и противоаварийной автоматики.

**Ключевые слова:** электромеханические колебания, частота свободных и вынужденных колебаний, эквивалентная частота свободных колебаний ЭМК, низкочастотные колебания.

Проведенные многими исследователями работы показали, что задача обеспечения колебательной устойчивости режимов электроэнергетической системы (ЭЭС) сложной структуры с большим числом эквивалентных генераторов оснащенных автоматического регулирования возбуждения сильного действия (АРВ – СД) тесно связана с динамическим свойствам электрической системы, таких например как эквивалентная частота свободных колебаний и эквивалентной коэффициент затухания отдельных составляющих движения. В связи с этим можно отметить, что расчеты статической устойчивости ЭЭС сводятся к расчету общей области устойчивости в плоскости координатах стабилизации для совокупности режимов и определении демпферных свойств системы на основе расчета кривых равной степени устойчивости и оценка наилучшего затухания при принятом законе регулирования АРВ – СД [1-4].

Несмотря на большое число степеней свободы регулируемой синхронной машины (СМ) электромеханические колебания (ЭМК) в системе практически одночастотные. В силу большой механической инерции ротора и большой постоянной времени обмотки возбуждения СМ, которые не пропускают высокочастотные колебания, вызываемые электромагнитными контурами системы регулирования возбуждения. Это дает возможность для изучения вынужденных или слабозатухающих свободных ЭМК создать простую математическую модель регулируемой СМ в виде эквивалентного уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + \beta_{ЭМ} \frac{d\delta}{dt} + \omega_{ЭМ}^2 \Delta \delta = 0. \quad (1)$$

где  $\beta$  - эквивалентный коэффициент затухания ЭМК;  $\omega_{ЭМ}$  - эквивалентная собственная частота электромеханических колебаний.

Коэффициенты, зависящие от всех параметров системы и представляющие эквивалентную собственную частоту и коэффициенты затухания ЭМК, определяют

показатели качества электромеханических переходных процессов.

С помощью такой математической модели для вынужденных и слабозатухающих свободных колебаний удастся получить аналитические выражения для периодического решения уравнения движения. Аналитическое выражение эквивалентных коэффициентов этого решения позволяют в общем случае проанализировать влияние на параметры ЭМК различных факторов. Они дают возможность сформировать требования к амплитудно-фазовым характеристикам АРВ, обеспечивающим максимальное демпфирование ЭМК.

При исследовании слабозатухающих свободных колебаний под действием периодических возмущающих сил, асинхронный ход или резко переменная нагрузка находятся периодические решения исходных уравнений.

Для малых колебаний находятся периодические решения линеаризованных дифференциальных уравнений, записанных в операторной форме частотными методами. Для больших колебаний нелинейные функции раскладываются в ряд Фурье в одночастотном приближении, записывается система уравнений для постоянных составляющих их первых гармоник. Система уравнений для первых гармоник приводится к эквивалентному уравнению второго порядка, коэффициенты которого являются функциями амплитуды колебаний.

Совместное решение уравнений для постоянных составляющих и первых гармоник позволяют сформулировать в наглядной форме условия существования и устойчивости, больших ЭМК и выявить качественные особенности больших вынужденных ЭМК - нелинейного электромеханического резонанса.

Параметры эквивалентного движения – эквивалентная собственная частота  $\omega_{эл}$  электромеханических колебаний и коэффициента затухания  $\beta_{эл}$  на собственной частоте позволяют оценить некоторые показатели качества электромеханических переходных процессов в

регулируемой ЭС, такие как степень устойчивости, относительный коэффициент затухания, декремент затухания. Зная эти показатели, можно не вычисляя переходной процесс, оценить качество его протекания после начального отклонения, при приложении возмущения в виде скачка или периодического возмущения.

Решение уравнения (1) имеет вид

$$\Delta\delta = A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t}, \quad (2)$$

где  $A_1, A_2$  определяются начальными условиями, а  $P_1$  и  $P_2$  - корни характеристического уравнения:

$$p^2 + p\beta_{\text{ЭК}} + \omega_{\text{ЭК}}^2 = 0.$$

Тогда решение характеристического уравнения имеет вид:

$$P_{1,2} = -\frac{1}{2}\beta_{\text{ЭК}} \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\beta_{\text{ЭК}}}{2}\right)^2 - \omega_{\text{ЭК}}^2\right]}.$$

Обычно для электромеханических колебаний ротора в электрической системе характер соотношения:

$$\omega_{\text{ЭК}} \gg \left(\frac{\beta_{\text{ЭК}}}{2}\right)^2,$$

в силу чего корни комплексно-сопряженные:

$$P_{1,2} = -\frac{\beta_{\text{ЭК}}}{2} \pm j\omega_{\text{ЭК}}.$$

Тогда общее решение уравнения записывается в виде:

$$\Delta\delta = A \exp[-0,5\beta_{\text{ЭУ}} t] \cos(\omega_{\text{ЭУ}} t + \varphi),$$

где  $A$  и  $\varphi$  определяются начальными условиями.

Сопоставим коэффициент затухания  $\beta_{\text{ЭК}}(\omega_{\text{ЭК}})$ .

ЭМК с показателями степени устойчивости или степени затухания, которые часто используется для оптимизации настройки АВР по условию лучшего демпфирования всех составляющих свободного переходного процесса. Степень устойчивости определяется минимальным расстоянием «левых» характеристического уравнения от мнимой плоскости корней.

Показатель  $\alpha$  для диапазона частот ЭМК связан с коэффициентами затухания ЭМК следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{2}\beta_{\text{ЭК}}(\omega_{\text{ЭК}}) \approx \frac{1}{2}\beta_{\text{ЭУ}}(\omega_{\text{ЭУ}}).$$

Для характеристики затухания часто вводят показатель, называемый логарифмическим коэффициентом затухания:

$$g = \frac{1}{2} T \beta_{\text{ЭУ}} = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right),$$

где  $\left(\frac{A_0}{A_1}\right)$  - отношение 2х следующих друг за другом

амплитуд затухающих колебаний;  $T$  - период колебаний.

Логарифмический декремент затухания показывает, во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за один период  $T$ . Так, если в данный момент времени  $t$  амплитуда

равна  $A_0 = A \exp\left(-\frac{1}{2}\beta_{\text{ЭК}} t\right)$ , то спустя период  $T$  она станет

равной  $A_1 = A \exp\left(-\frac{1}{2}\beta_{\text{ЭК}}(t+T)\right)$ .

$$\text{Отсюда} \quad \frac{A_1}{A_0} = \exp\left(-\frac{1}{2}\beta_{\text{ЭК}} T\right).$$

Или

$$g = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) = g = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) = \left(-\frac{1}{2}\beta_{\text{ЭК}} T\right).$$

Величина  $\frac{1}{g}$  определяет число периодов, после

которого амплитуда уменьшится в  $e$ -раз, т.е. примерно на  $1/3$  первоначальной величины. Например, если  $g=0,5$ , то через 2 периода амплитуда уменьшится примерно в  $1/3$  раз.

Условные оценки качества ЭМК по коэффициенту затухания отражают технические и эксплуатационные соображения, в частности возможность ложных срабатываний противоаварийной автоматики от асинхронных режимах при длительных синхронных качаниях, которые могут возникнуть в послеаварийных режимах. Например, после ресинхронизации в ЭС. Это случай слабого демпфирования ЭМК, когда, например, за 30 сек, амплитуда колебаний уменьшится в 1,5 раза, что соответствует значению коэффициента затухания  $\beta_{\text{ЭУ}} = 0,015$  сек.

Эксплуатационные соображения должны учитывать возможность неправильных действий оперативного персонала, который может произвести диспетчер или дежурный персонал станции по прошествии 5 сек после появления колебаний. Если за 5 сек, амплитуда уменьшится вдвое, то вероятность таких действий сильно уменьшится.

Это соответствует коэффициенту:

$$\beta_{\text{ЭУ}} = \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right) \frac{2}{T} = \ln 2 \frac{2}{5} = 0,028 \frac{1}{c}.$$

Если за 5 сек, амплитуда уменьшится в 5 раз, что соответствует  $\beta_{\text{ЭК}} = \frac{0,6}{c}$ , то возможность ложных срабатываний противоаварийной автоматики из-за неправильного действия персонала будет практически исключена, и такой показатель демпфирования можно считать удовлетворительным.

Приведенные показатели качества ЭМК получаются из линеаризованных дифференциальных уравнений и дают правильные оценки переходных процессов в пределах справедливости линеаризации нелинейности по первому приближению.

В общем случае величина возмущений, при которых исследование переходных процессов в нелинейной ЭС, по линеаризованным уравнениям не вносит недопустимый погрешности, зависит от вида нелинейностей и от исходного режима.

Наиболее существенной нелинейностью в ЭМК электрической системы при такой оценке являются тригонометрические нелинейные зависимости моментно-угловых характеристик  $M(\delta)$ .

В простейшем случае моментно-угловую характеристику можно представить в виде синусоидальной зависимости.

Справедливость линеаризации по первому приближению синусоидальной функции зависит от исходного режима ( $\delta_0$ ) и от величины отклонения ( $\Delta\delta$ ) угла в

процессе электромеханических колебаний.

Разложим синусоидальную функцию в ряд Тейлора:

$$\sin(\delta_0 + \Delta\delta) - \sin\delta_0 = \cos\delta_0 \Delta\delta - \frac{\Delta\delta^2}{2} \sin\delta_0 - \frac{\Delta\delta^3}{3} \cos\delta_0 - \dots$$

Оценим погрешность  $\varepsilon$  при отбрасывании членов, пропорциональных  $\Delta\delta$ , как отношение отбрасываемых двух членов и первому члену ряда:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\delta}{2} \operatorname{tg}\delta_0 + \frac{\Delta\delta^2}{6}.$$

Задавая допустимой погрешностью  $\varepsilon$  в определении амплитуды колебаний  $M(\delta)$ , построим зависимость  $\Delta\delta_{\max} = f(\delta_0) \Delta\delta = f(\delta_0)$ , которая может быть

использована для оценки показателей качества электромеханических переходных процессов после конечных возмущений.

Для численного анализа динамических свойств простейшей электрической системы использовали линии электропередачи «Талимарджан – Согдиана». Анализ динамических свойств проведем с учетом наличия АРВ СД на турбогенераторе ТБВ – 800 МВт. Динамические свойства регулируемой системы более разнообразны, чем нерегулируемой, и зависят как от начальных возмущений, так и от настроечных параметров АРВ. Это связано с тем, что регулируемая система обладает свойством автоколебательности и диссипативности. Дадим физическое толкование этим свойствам.

Для осуществления устойчивого периодического режима (автоколебаний) необходимо, чтобы система состояла из трех частей: из колебательной части, из некоторого источника энергии, управляемого колебательной схемой, воздействие которого на систему компенсирует потери и приводит к нарастающим колебаниям, и из ограничителя, переводящего эти нарастающие колебания в стационарное состояние. Регулируемая электрическая система содержит все это три части: колебательную – ротор синхронной машины, источник энергии–возбудитель и управления (АРВ–возбудитель), осуществляемого от параметров синхронного генератора и ограничения выходной величины (потолок возбуждения– $E_{qe}$ ) Автоматическое регулирование возбуждения вносит в колебательную систему диссипацию, величина и знак которой зависит от настроечных параметров АРВ. При некоторых настроечных параметрах АРВ отрицательное демпфирование, вносимое АРВ, компенсирует положительное естественное положительное демпфирование, обусловленное свободными переходными процессами в контурах ротора, и система оказывается на периодической границе статической устойчивости.

Статическую устойчивость регулируемой электрической системы часто характеризуют областью устойчивости в координатах настроечных параметров АРВ. При таком подходе не только получают ответ на вопрос, устойчива ли система, но и решает вопрос частичного синтеза, определяя совокупность настроечных параметров, обеспечивающих статическую устойчивость. Если область устойчивости отсутствует, то это значит, что в

рассматриваемом режиме при заданных параметрах системы и законе регулирования статическую устойчивость обеспечить нельзя. Если область устойчивости существует и она достаточно велика, то можно выбирать настроечные параметры с учетом дополнительных показателей качества переходных процессов.

Собственная частота и коэффициент затухания синхронных качаний ротора синхронной машины после возмущения характеризуют изменение таких режимных параметров как угол  $\delta$ , токи статора и ротора и потоки мощности, и поэтому являются важными обобщенными показателями качества электромеханических переходных процессов в электрической системе. Это говорит о том, что вблизи более высокочастотной периодической границы преобладают относительно высокочастотные ( $\omega \approx 20$ ,  $f \approx 3.2$  Гц.) колебания. Такая характерная для регулируемой системы картина расположения корней определяет то, что в статической устойчивости системе после малых возмущений возникают многочастотные колебания с сильно различающимися собственными частотами. Наиболее низкая из частот, определяемая в основном электромеханическими свойствами ротора, составляет обычно 0.2 – 1.5 Гц; остальные, определяемые в основном параметрами электромагнитных контуров системы возбуждения и АРВ, – 3 – 5 Гц и выше. Такие частоты колебаний практически «не пропускается» ротором: их амплитуды малы и быстро затухают. Это приводит к тому, что ротор колеблется практически с одной наиболее низкой, частотой, которую называют собственной частотой электромеханических колебаний.

Электромеханические колебания, проявляющиеся в изменениях мощности по линии электропередачи, взаимного угла между векторами эквивалентной ЭДС станции и напряжения шин приемной системы, практически одночастотны.

Дадим численные оценки собственной частоты электромеханических колебаний и коэффициента затухания: а) в простой нерегулируемой системе; б) в системе, снабженной АРВ – СД.

Параметры системы и параметры режима приведены в относительных единицах:  $x_d = x_q = 2,49$ ;  $T_{d0} = 9,17$  с;  $x'_d = 0,37$ ;  $T_J = 5,6$  с;  $x_l = 0,5$ ;  $T'_d = 2,67$  с;  $U_r = U_c = 1$ ;  $P_r = 1,6 P_l$ ;  $P_l = 1$ ;  $E_{q0} = 3$ ;  $\delta_0 = 86,2^\circ$ ;  $x_{d\Sigma} = x_d + x_l = 2,99$ ;  $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_l = 0,87$ .

1. Для определения собственной частоты и коэффициента затухания воспользуемся аналитическими выражениями, и учитывая на роторе только продольную обмотку возбуждения, следовательно:

$$E_q(p) = -\frac{x_q - x_q(p)}{x_q(p)} = 0.$$

Тогда выражения для определения  $\gamma^2$  и  $\beta$  примут следующий вид:

$$\gamma^2 = \omega_{cоб}^2 \left[ \cos\delta_0 + \frac{U}{E_{q0}} (\sin^2\delta_0) \operatorname{Re} E_d(j\gamma) \right];$$

$$\frac{D}{2} = \beta = \frac{\omega_0}{2T_J \gamma} \frac{U^2}{x_{d\Sigma}} (\sin^2\delta_0) \operatorname{Im} E_d(j\gamma),$$

где 
$$\omega_{cоб}^2 = \frac{E_{q0} U \omega_0}{x_{d\Sigma} T_J} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 314}{2,99 \cdot 5,6} = 56,26 (pad/c)^2;$$

$$E_d(p) = \frac{x_d \sum - x_d \sum (p)}{x_d \sum (p)} = \frac{x_d \sum + x_d \sum T_{d0} p}{x_d \sum + x_d \sum T_{d0} p};$$

$$\operatorname{Re} E_d(j\gamma) = \frac{x_d \sum (x_d - x_d') T_{d0} \gamma^2}{x_d \sum^2 + (x_d \sum T_{d0})^2 \gamma^2} = \frac{0,87(2,49 - 9,17^2 \gamma^2)}{2,99^2 + (0,87 \cdot 9,17)^2 \gamma^2} =$$

$$\frac{155,1 \gamma^2}{8,94 + 63,65 \gamma^2};$$

$$\operatorname{Im} E_d(j\gamma) = \frac{x_d \sum (x_d - x_d') T_{d0} \gamma}{x_d \sum^2 + (x_d \sum T_{d0})^2 \gamma^2} = \frac{58,13 \gamma}{8,94 + 63,65 \gamma^2}.$$

Подставляя параметры системы и режима в формулу собственной частоты колебаний

$$\gamma^2 = 56,26 \left[ \cos 86,2^\circ + \frac{1}{3,0} \sin^2 86,2^\circ \frac{155,1 \gamma^2}{8,94 + 63,65 \gamma^2} \right] =$$

$$= 3,73 + \frac{2895,7 \gamma^2}{8,94 + 63,65 \gamma^2},$$

приводя все к общему знаменателю и перенося все члены в левую часть, получаем биквадратное уравнение:

$$64,65 \gamma^4 - 3124 \gamma^2 - 33,33 = 0,$$

корни которого соответственно равны  $\gamma_1^2 = 49,09$  и  $\gamma_2^2 = -0,01$ . Первый корень даёт собственную частоту колебаний  $\gamma = 7$  рад/с. Отрицательный корень физического смысла не имеет. Подставляя значение  $\gamma_1^2$  в формулу для коэффициента затухания, находим:

$$\beta = \frac{314 \cdot 1^2}{2 \cdot 5,6 \cdot 2,99} \sin^2 86,2^\circ \frac{58,13}{8,94 + 63,65 \cdot 49,09} = 0,173 \text{ 1/с}.$$

Необходимо заметить, что для рассматриваемых систем обычно справедливо неравенство  $x_{d\sum} \ll x_{d\sum} T_{d0} \gamma$ , и поэтому выражения для  $\gamma$  и  $\beta$  можно упростить:

$$\gamma^2 = \frac{E_{q0} U \omega_0 \cos \delta_0}{x_d \sum T_J} + \frac{U^2 \omega_0 \sin^2 \delta_0 (x_d - x_d')}{x_d \sum T_J x_d' \sum} =$$

$$= \frac{3 \cdot 1 \cdot 314}{2,99 \cdot 5,6} \cos 86,2^\circ + \frac{1^2 \cdot 314 \sin^2 86,2^\circ (2,49 - 0,37)}{2,99 \cdot 5,6 \cdot 0,87} =$$

$$= 49,2 (\text{рад/с})^2;$$

$$\beta = \frac{\omega_0 U^2 \sin^2 \delta_0 (x_d - x_d')}{2 T_J x_d \sum^2 T_{d0} \gamma^2} = \frac{314 \cdot 1^2 \sin^2 86,2^\circ (2,49 - 0,37)}{2 \cdot 5,6 \cdot 0,87^2 \cdot 9,17 \cdot 49,2} =$$

$$= 0,173 \text{ 1/с}.$$

Таким образом, значение собственной частоты по упрощенной формуле составляет  $\gamma = 7,02$  рад/с и погрешность не превышает 0,5%; значения коэффициента затухания практически совпали.

2. Предположим, что эквивалентный турбогенератор снабжен АРВ - СД с регулированием по отклонению напряжения и первой, и второй производным абсолютного угла (или по отклонению и первой производной частоты вращения ротора):

$$\Delta E_{qe} = \frac{K_{0U} \Delta U + (K_{0f} p + K_{1f} p^2) \Delta \delta}{(T_e p + 1)(T_p p + 1)},$$

$$\text{где } T_e = 0,05 \text{с}; \quad T_p = 0,01 \text{с};$$

$$K_{0U} = 150 \frac{\text{ед.возб.}}{\text{ед.напр.}}; \quad K_{0f} = 5 \frac{\text{ед.возб.}}{\text{рад/с}^2};$$

$$K_{1f} = 1 \frac{\text{ед.возб.}}{\text{рад/с}^2}.$$

Разложив  $E_{\text{АРВ}}(p)$  на действительную и мнимую части, определим собственную частоту и коэффициент затухания:

$$A = \left[ K_{1f} - T_{d0} \frac{\partial E_q'}{\partial \delta} (T_e + T_p) \right] \gamma^2 + K_{0U} \frac{\partial U_\Gamma}{\partial \delta};$$

$$B = \left[ T_{d0} \frac{\partial E_q'}{\partial \delta} - K_{0f} - \gamma^2 T_{d0} \frac{\partial E_q'}{\partial \delta} T_e T_p \right] \gamma;$$

$$C = 1 + K_{0U} \frac{\partial U_\Gamma}{\partial E_q} - \gamma^2 (T_d' T_e + T_p T_d' + T_e T_p);$$

$$D = \gamma \left[ (T_d' + T_e + T_p) - T_d' T_e T_p \gamma^2 \right]$$

Найдем численные выражения для собственной частоты и коэффициента затухания. Для этого сначала вычислим производные:

$$\frac{\partial U_\Gamma}{\partial \delta} = - \frac{U_C \sin \delta_0}{U_\Gamma} E_{q0} \frac{x_a x_d}{x_d \sum^2} =$$

$$= - \frac{1 \cdot \sin 86,2^\circ}{1} 3 \frac{0,5 \cdot 2,49}{2,99^2} = -0,417;$$

$$\frac{\partial U_\Gamma}{\partial E_q} = \frac{x_a}{U_\Gamma x_d \sum} [U_C \cos \delta_0 x_d + E_q x_a] =$$

$$= \frac{0,5}{1 \cdot 2,99^2} [1 \cdot \cos 86,2^\circ \cdot 2,49 + 3 \cdot 0,5] = 0,093;$$

$$\frac{\partial E_q'}{\partial \delta} = - \frac{U_C \sin \delta_0}{x_d \sum} (x_d - x_d') =$$

$$= - \frac{1 \cdot 86,2^\circ}{2,99} (2,49 - 0,37) = -0,7075;$$

$$\frac{\partial M}{\partial \delta} = \frac{E_q U_C \cos \delta_0}{x_d \sum} = \frac{3 \cdot 1 \cdot \cos 86,2^\circ}{2,99} = 0,0665;$$

$$\frac{\partial M}{\partial E_q} = \frac{U_C \sin \delta_0}{x_d \sum} = \frac{1 \cdot \sin 86,2^\circ}{2,99} = 0,334.$$

Далее определим численные выражения коэффициентов А, В, С, D

$$A = [1 - 9,17(-0,7075)(0,05 + 0,01)] \gamma^2 + 150 \cdot (-0,417) =$$

$$= 1,389 \gamma^2 - 62,53;$$

$$B = [9,17(-0,7075) - 5 - \gamma^2 9,17(-0,7075) 0,05 \cdot 0,01] \gamma =$$

$$= (0,0032 \gamma^2 - 11,49) \gamma;$$

$$C = 1 + 150 \cdot 0,093 - \gamma^2 (2,67 \cdot 0,05 + 0,01 \cdot 2,67 +$$

$$+ 0,05 \cdot 0,01) = 13,97 - 0,161 \gamma^2;$$

$$D = \gamma [(2,67 + 0,05 + 0,01) - 2,67 \cdot 0,05 \cdot 0,01 \gamma^2] =$$

$$= \gamma (2,73 - 0,0013 \gamma^2).$$

При подстановке численных выражений коэффициентов А, В, С, D в уравнение для определения собственной частоты видно, что его невозможно решить в явном виде, необходимо воспользоваться методами итерационными или графоаналитическим.

Здесь применим графический метод, для чего строим частотные характеристики правой  $y_1 = f(\gamma^2)$  и левой частей  $y_2 = \gamma^2$  уравнения собственной частоты, в данном случае уравнения

$$\gamma^2 = 3,73 + 18,71 \frac{(62,53 - 1,389\gamma^2)(13,97 - 0,161\gamma^2) + (11,49 - 0,003\gamma^2)(2,73 - 0,001\gamma^2)\gamma^2}{(13,97 - 0,161\gamma^2)^2 + \gamma^2(2,73 - 0,0013\gamma^2)^2}$$

Точка пересечения функций  $y_1$  и  $y_2$  дает значение корня  $\gamma^2_0$ . Результаты такого построения позволили определить собственную частоту  $\gamma = 9,46$  рад/с.

Подставляя значения собственной частоты в формулу для определения  $\beta$ , находим коэффициент затухания:

$$\beta = \frac{314}{2 \cdot 9,17} 0,334 \frac{(1,389 \cdot 89,5 - 62,53)(2,73 - 0,0013 \cdot 89,5) - (0,0032 \cdot 89,5 - 11,49) \cdot 13,97 \cdot 0,16 \cdot 89,5}{(13,97 - 0,16 \cdot 89,5)^2 + 89,5(2,73 - 0,0013 \cdot 89,5)^2} = 2,4 \quad 1/c.$$

Таким образом, при введении АРВ- СД с правильно выбранной настройкой увеличивается коэффициент затухания по сравнению с нерегулируемой системой более чем на порядок и этот метод является эффективным методом повышения демпфирования электромеханических колебаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Литкенс И. В., Пуго В. И. Колебательные свойства электрических систем – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 216 с.: ил.
2. Крючков И. П., Старшинов В. А., Гусев Ю. П., Пираторов М. В. Переходные процессы в электроэнергетических системах., Издательство: Издательский дом МЭИ, 2008, 416с.
3. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электроэнергетических системах, Издательство: Омега – Л, 2013, 384с
4. Груздев И. А., Торопцев Е. Л, Устинов С. М. Определение настроек АРВ для совокупности режимов энергосистем //Электричество. 1986. № 4. С. 11 – 15.
5. Каримов А. А., Рубисов Г. В., Сигаев У. В. Расчет сложных электромеханических переходных процессов в турбоагрегатах. Труды ЛПИ № 427, 1988, с.110-115..
6. Лукашов Э. С., Каложный А. Х., Лизалек Н. Н, Длительные переходные процессы в энергетических системах. Новосибирск: Наука, 1985. – 197 с.

## THE ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL FLUCTUATIONS IN ADJUSTABLE ELECTRIC SYSTEM

S.D.Khaydarov<sup>1</sup>, A.G.Saliev<sup>2</sup>, Sh.Sh.Rustamova<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Tashkent State Technical University named after A.R.Beruni, Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** In work difficult electromechanical transients in simple electric system which it is characterised by electromechanical fluctuations of synchronous cars are considered. Despite a great number of degrees of freedom of the adjustable synchronous car electromechanical fluctuations in simple system are established they almost unifrequent, owing to the big mechanical inertia of a rotor and the big constant of time of a winding of excitation of synchronous cars, do not pass the high-frequency fluctuations caused by electromagnetic contours of system of regulation of excitation. For an estimation of quality of electromechanical fluctuations on frequency of free fluctuations and to attenuation factor are defined their numerical values necessary for отстройки by the relay it is sewn up and противоаварийной to automatics.

**Keywords:** electromechanical fluctuations, frequency of the free and compelled fluctuations, equivalent frequency of free fluctuations ЭМК, low-frequency fluctuations.

### REFERENCES

1. Litkens I.V., Pugo V.I. *Kolebatelnye svoystva elektricheskikh sistem* [Oscillatory properties of electric systems], Moscow, Energoatomizdat., 1988, 216 p.
2. Kryuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Yu.P., Piratorov M.V. *Perehodnye processy v elektroenergeticheskikh sistemah* [Transition processes in electrical power systems], Moscow, Izdatelskiy dom MEI., 2008, 416 p.
3. Kulikov Yu.A. *Perehodnye processy v elektroenergeticheskikh sistemah* [Transition processes in electrical power systems], Omega – L., 2013, 384 p.
4. Gruzdev I.A., Toropcev E.L, Ustinov S.M. Definition of the ARV settings for set of the modes of power supply system`s [Opredelenie nastroek ARV dlya sovokupnosti rezhimov energosistem], *Elektrichestvo [Electricity]*, 1986, no. 4, pp. 11-15.
5. Karimov A.A., Rubisov G.V., Sigaev U.V. Calculation of difficult electromechanical transition processes in turbine units [Raschet slozhnyh elektromehaniicheskikh perehodnyh processov v turboagregatah], *Trudy LPI № 427 [Works LPI No. 427]*, Leningrad, 1988, pp. 110-115.
6. Lukashov E.S., Kalyuzhnyy A.H., Lizalek N.N. *Dlitelnye perehodnye processy v energeticheskikh sistemah* [Long transition processes in power systems], Novosibirsk, Nauka, 1985, 197 p.

## МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТРИЦЫ СВЯЗЕЙ В КОНЕЧНОМ ПОЛЕ GF(3)

А.Н. Рысованый

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, г. Харьков, Украина

rysov@rambler.ru

**Аннотация.** Рассматривается метод получения псевдослучайной последовательности в конечном поле GF(3), основанный на использовании матрицы связей в качестве основного элемента генерации. Приведен математический аппарат описания функционирования регистра сдвига с нелинейными обратными связями и его функциональная схема. В работе показан пример формирования первого состояния регистра. Кроме того, приведен пример закономерности кольцевого расположения столбцов матриц связи. В результате чего предложена схема генерирования последовательности без применения обратных связей, как у классического регистра сдвигов. Это позволяет генерировать последовательности для любого выбранного полинома, который удовлетворяет условию получения максимального периода генерации.

**Ключевые слова:** псевдослучайная последовательность, регистр сдвига.

### Актуальность работы

В системах диагностирования цифровых объектов одно из значительных мест отводится генераторам псевдослучайных последовательностей (ПСП), от качества которых зависит глубина тестов. Например, при диагностировании шинных формирователей, контроллеров шин, микросхем памяти становится неэффективным псевдослучайный тест с линейного регистра сдвига с обратными связями, так как эти схемы имеют три состояния (0, 1 и R – высокий импеданс). Кроме того, для диагностирования линий передачи данных, по которым передаются двуполярные сигналы ( $V_i$ ,  $V$ ,  $V_0$ ), предпочтительнее использовать устройства, предназначенные именно для решения таких задач. В этих случаях третьи состояния не диагностируются. Регистры сдвига с нелинейными обратными связями являются основой кодеров. В работе [1, с. 61] сказано, что: “... в настоящее время мы располагаем весьма скудной информацией о построении нелинейных кодеров”. Переключается с этим высказыванием и работа [2, с. 3]: “... разрыв между практикой и математической теорией недвоичного помехоустойчивого кодирования не сокращается или сокращается недостаточно быстрыми темпами”. Кроме того, не снимается задача увеличения длины генерируемой последовательности при ограничении на применяемую максимальную степень полинома [3].

### Основные проблемы и решения

Основная проблема при диагностировании сложных цифровых устройств заключается в отсутствии средств, которые способны диагностировать третье выходное состояние микросхем. Такими устройствами могли бы служить сигнатурные анализаторы (СА), основой которых являются регистры сдвига с обратными связями. Но в этом случае связи между регистрами и между сумматорами по модулю должны быть выполнены

с учетом выбранного полинома из конечного поля тройки. Такие регистры принято называть нелинейными, т.е. такие, в цепях обратной связи которых происходят нелинейные преобразования. Но если для генераторов ПСП с нелинейными связями считается приемлемым применение регистра сдвига, то для многоканального СА [4] по временному критерию такое применение уже недопустимо. Однако для того, чтобы результаты были одинаковыми, и первые, и вторые должны использовать одну и ту же теорию – теорию линейных последовательных машин [5-7].

В работе рассматривается разработка математического аппарата функционирования регистров сдвига с нелинейными обратными связями в конечном поле GF(3) и метода получения ПСП на основе использования матрицы связей, применимого в дальнейшем для описания функционирования многоканальных нелинейных структур.

Для генерирования ПСП в поле GF(3) применяется регистр сдвига с нелинейными обратными связями, которые определяются в виде полинома:

$$P(x) = a_n x^n \oplus_3 a_{n-1} x^{n-1} \oplus_3 \dots \oplus_3 a_0,$$

где  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  – коэффициенты при аргументах;  $a_i |_{i=1-n-1} \in \{0, 1, 2\}$ ;  $a_0, a_n \in \{1, 2\}$ .

Правила сложения и умножения в конечном поле GF(3) = {0, 1, 2} имеют следующий вид (рис. 1):

| $\oplus_3$ | 0 | 1 | 2 | $\otimes_3$ | 0 | 1 | 2 |
|------------|---|---|---|-------------|---|---|---|
| 0          | 0 | 1 | 2 | 0           | 0 | 0 | 0 |
| 1          | 1 | 2 | 0 | 1           | 0 | 1 | 2 |
| 2          | 2 | 0 | 1 | 2           | 0 | 2 | 1 |

Рис. 1. Правила сложения и умножения в конечном поле GF(3)

Матрица связей [3] определяет связи между рядами регистра сдвига и изменяется в зависимости от выбранного образующего полинома  $P(x)$ . В общем случае матрица связей  $S$  имеет вид:

$$S = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{r-1} & a_r \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Например, для  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1$  матрица связей  $S$  имеет вид:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Функциональная схема классического нелинейного генератора ПСП с полиномом  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1$  приведена на рис. 2.

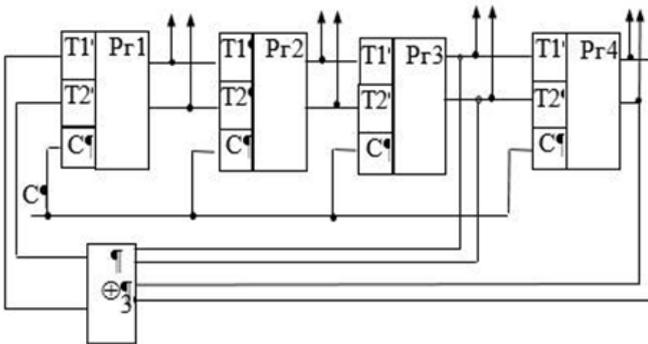


Рис. 2. Функциональная схема НСА с  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1$

При подаче на вход регистра с образующим полиномом  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1$  логической 1 и последующих сдвигах получится матрица состояний  $H$  (80 столбцов):

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 2 & \dots & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & \dots & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \dots & 2 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Свободный член  $a_0$  образующего характеристического полинома  $P(x) = a_r x^r \oplus_3 a_{r-1} x^{r-1} \oplus_3 \dots \oplus_3 a_1 x \oplus_3 a_0$  однозначно описывает первое состояние  $h_1$  матрицы состояний  $H$  [3] и равняется:  $h_1 = \|a_0 0 \dots 0\|$ . Например, для  $P_1(x) = 2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 1$  первое состояние  $h_1 = \|1000\|$ , а для  $P_2(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2$  первое состояние  $h_1 = \|2000\|$ .

Каждый столбец матрицы связей  $S$  представляет собой один из столбцов матрицы состояний  $H$  регистра ПСП.

Для каждого полинома с максимальным периодом генерации [7] есть своя закономерность кольцевого расположения столбцов матриц связи. Например, для  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1$  расположение элементов будет таким:

$$\begin{aligned} S^1 &= h_1 h_3 h_4 h_1; \\ S^2 &= h_3 h_4 h_5 h_2; \\ S^3 &= h_4 h_5 h_6 h_3; \end{aligned}$$

и так далее.

Следовательно, обобщенная формула расчетов степеней матрицы связей для  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1$  имеет вид:

$$S^i = h_{i+1} h_{i+2} h_{i+3} h_i.$$

Для полинома  $P(x) = x^4 \oplus_3 x \oplus_3 1$  усеченная матрица состояний  $H(1-16)$  имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Для этого полинома расположения элементов будет таким:

$$\begin{aligned} S^1 &= h_2 h_7 h_8 h_1; \\ S^2 &= h_3 h_8 h_1 h_2; \\ S^3 &= h_4 h_1 h_2 h_3; \end{aligned}$$

и так далее.

Следовательно, обобщенная формула расчетов степеней матрицы связей для  $P(x) = x^4 \oplus_3 x \oplus_3 1$  имеет вид:

$$S^i = h_{i+1} h_{i-2} h_{i-1} h_i.$$

Таким образом, для каждого полинома есть своя закономерность размещения столбцов проверочной матрицы  $H$  в матрице связей  $S^i$ , которые можно использовать для генерирования ПСП. Причем, для приведенных примеров все столбцы матрицы состояний рассчитываются из столбца, который располагается последним. То есть, эти столбцы получаются путем соответствующего сдвига последнего столбца в регистре с обратными связями.

Полученные обобщенные формулы позволяют найти все другие столбцы на основе известного одного путем его сдвига.

Способ, который предлагается [8], может быть реализован, например, с помощью устройства, структурная схема которого в общем виде приведена на рис. 3.

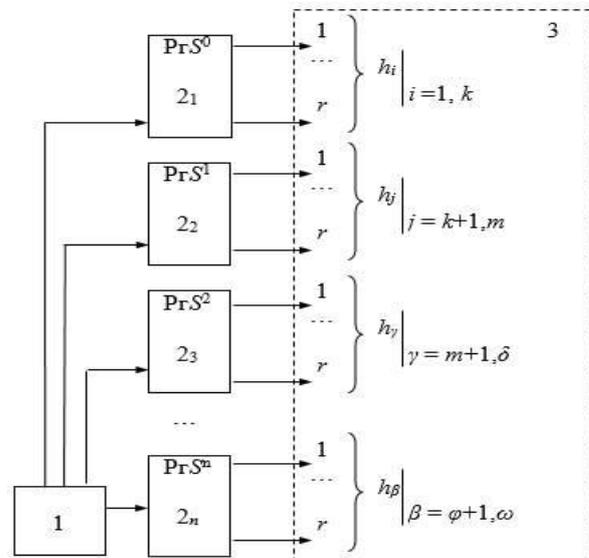


Рис. 3. Схема устройства генерирования ПСП

Устройство включает: блок 1 управление выдачей ПСП; группу из  $n$  блоков регистров  $2_1 - 2_n$  хранения матриц связей разных степеней и группу 3  $r$ -разрядных выходных состояний.

Устройство работает следующим образом. В регистрах блоков  $2_1 - 2_n$  занесены матрицы связей соответствующих степеней, каждый столбец которой является одним из состояний матрицы  $H$ . Блок управления 1 последовательно, за избранным для каждого полинома алгоритмом подает сигналы считывания. В результате чего  $r$ -разрядные состояния через блок 3 передаются на выход схемы. Каждый блок  $2_i$  выдает свои состояния, которые не должны быть повторены, чтобы не нарушить последовательность генерирования ПСП. Блок управления 1 обеспечивает выдачу соответствующих к избранному алгоритму данных. Причем, начинать выдавать  $r$ -разрядные данные можно из какого угодно состояния.

### Выводы

Предложен метод, представленный в виде полуженного выражения, позволяющий определить все столбцы матрицы состояний  $H$  без выполнения расчетов и применимый для определения ПСП с использованием примитивного не приведенного характеристического полинома. В предложенном методе отсутствуют обратные связи, как у классического регистра сдвига, и, поэтому, могут генерироваться ПСП для любого выбранного полинома, который удовлетворяет условию получения максимального периода генерации.

1. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибки: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 576 с.
2. Муттер В.М. Основы помехоустойчивой телепередачи информации. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
3. Рысованый А.Н. Выбор полиномов для нелинейных регистров сдвига с обратными связями по критерию формирования последовательности максимальной длины / А.Н. Рысованый, В.В. Гоготов // Системы управления, навигации и связи. – Киев: Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления, 2007. – Вып.1. – С. 77 – 79.
4. Ярмолик В.Н. Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ. – Мн.: Наука и техника. 1988. – 240 с.: ил.
5. Литиков И.П. Кольцевое тестирование цифровых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 160 с.: ил.
6. Горышко А.П. Синтез диагностируемых схем вычислительных устройств. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1987. – 288 с.
7. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ракушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ. – 2002. – 384 с.
8. Сорока Л.С., Рысованый А.Н., Мороз Б.И. Способ получения псевдослучайной последовательности на основе использования матрицы связей в конечном поле GF(3) // Патент Украины № u201109344. 2012. Бюл. № 5.

## THE METHOD OF RECEIPT OF PSEUDOCASUAL SEQUENCE IS EXAMINED IN THE EVENTUAL FIELD OF GF(3), BASED ON THE USE OF MATRIX OF CONNECTIONS AS A BASIC ELEMENT OF GENERATION

A.N. Rysovaniy

The National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), Kharkov, Ukraine

**Abstract.** Pseudocasual sequence receipt in the final field of GF(3) basing on the use of connections matrix as the main generation element is observed. The description mathematical apparatus of the shift register functioning with nonlinear feedbacks and its functional diagram is listed. The example of the first register state formation is set. Furthermore, an example of connection matrix column location regularity is set. As a result of which the diagram of sequence generating without feedback application is offered, like classical shift register has. This enables generating of sequence for any chosen polynomial which fulfils generation period maximizing condition.

**Keywords:** Pseudocasual sequence, shift register.

### REFERENCES

1. Blejhut R. *Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki* [Theory and practice of codes controlling errors], Moscow, Mir, 1986, 576 p.
2. Mutter V. M. *Osnovy pomekhoustoichivoi teleperedachi informatsii* [Fundamentals of error-correcting TV shows information], Leningrad, Energoatomizdat, 1990, 288 p.
3. Rysovanyj A. N., Gogotov V. V. Choice of polynomials for nonlinear shift registers with feedback according to the criterion of the maximum length sequence formation [Vybor polinomov dlya nelineinykh registrov sdviga s obratnymi svyazyami po kriteriyu formirovaniya posledovatel'nosti maksimal'noi dliny], *Sistemy upravleniya, navigatsii i svyazi* [Control systems, navigation and communication], Kyiv, Central Research Institute of Navigation and Control, 2007, Issue 1, pp. 77 – 79.
4. Yarmolik V. N. *Kontrol' i diagnostika tsifrovyykh uzlov EVM* [Control and diagnosis of EVM digital components], Minsk, Science and technology, 1988, 240 p.
5. Litikov I. P. *Kol'tsevoe testirovanie tsifrovyykh ustroystv* [Ring testing of digital devices], Moscow, Energoatomizdat, 1990, 160 p.
6. Goryashko A. P. *Sintez diagnostiruemykh skhem vychislitel'nykh ustroystv* [Synthesis of computing devices diagnosable schemes], Moscow, Science. Major editor phys.-math. Lit,

- 
- 1987, 288 p.
7. Vatolin D., Rakushnajk A., Smirnov M., Yukin V. *Metody szhatiya dannykh. Ustroistvo arkhivatorov, szhatie izobrazhenii i video* [Methods of data compression. Archiver device, compression of images and video], Moscow, DIALOG-MIFI, 2002, 384 p.
  8. Soroka L. S., Rysovanyj A. N., Moroz B. I. *Sposob polucheniya psevdosluchainoi posledovatel'nosti na osnove ispol'zovaniya matritsy svyazei v konechnom pole GF(3)* [The option of pseudocasual sequence receipt basing on the use of connections matrix in the eventual field of GF(3)], Patent of Ukraine № u201109344, 2012, Bull. № 5.

