

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

№ 4(14), 2016

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

AUTOMATION
OF TECHNOLOGIES AND
PRODUCTION



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№4 (14) декабрь 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 производствами, практическому применению современных методов управления. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований и испытаний. Приоритетным направлением журнала является освящение 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; обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления; автоматизированные технологии в образовании; математическое моделирование технологических систем и объектов управления; автоматизация контроля и испытаний; математические модели процессов в металлургии.

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 12.2016. Тираж 500 экз. Цена свободная.

Математическое моделирование технологических систем и объектов управления*Я.И. Солер, А.И. Шустов*

Оптимизация процесса плоского шлифования пластин Р9М4К8 высокопористыми нитридными кругами..... 4

Е.М. Борчик

Автоматизация расчета затрат ресурсов в процессе производства тканей..... 9

О.Н. Крахмалев, Г.Н. Крахмалев

Моделирование отклонений в шарнирах манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков..... 18

О.М. Пигнастый, В.Д. Ходусов

Модель производственного процесса обработки партии предметов труда..... 23

Обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления*К.В. Кротов*

Двухуровневая модель построения комплексных расписаний обработки партий данных в конвейерных системах при задании директивных сроков формирования комплектов..... 33

*Ю.В. Федосеева, И.Г. Зорина,**В.Д. Тутарова, А.В. Азерская*

Автоматизированная информационная система «Индивидуальный план преподавателя СПО»... 45

Автоматизированные системы управления*П.А. Никишечкин, И.А. Ковалев,**А.С. Григорьев, А.Н. Никич*

Построение кроссплатформенной системы для сбора и обработки диагностической информации о работе технологического оборудования на промышленных предприятиях 51

Автоматизация контроля и испытаний*А.В. Кожевников, В.Н. Волков*

Разработка метода анализа отклика динамической нейросетевой модели автоматизированного электропривода..... 56

Н.В. Сырейщикова, Д.А. Пиеничникова

Входной контроль металлоизделий, сырья, комплектующих с использованием статистических методов менеджмента качества..... 61

Математические модели процессов в металлургии*Е.А. Горбатова,**Е.А. Емельяненко, М.В. Зарецкий*

База знаний автоматизированной системы технологической подготовки производства для переработки рудного сырья..... 70

В.А. Лебедев, С.В. Новиков

Математическая модель процессов сварки и наплавки с управляемыми изменениями вылета электродной проволоки..... 75

Б.Б. Зобнин, И.А. Ажипа

Многоподходное моделирование очистки пылегазовых потоков..... 81

Mathematical simulation of control systems and objects*Ya.I. Soler, A.I. Shustov*

Optimization of flat grinding process of W9Mo4Co8 with highly porous boron nitride wheels..... 4

E.M. Borchik

Automation of calculation of cost of resources in the manufacturing process of fabrics..... 9

O.N. Krakhmalev, G.N. Krakhmalev

Modeling deviations in hinges manipulation systems industrial robots and multi-axis machine tools..... 18

O.M. Pihnastyi, V.D. Khodusov

Model manufacturing process of group the objects of labor..... 23

Data processing, automated control systems software*K.V. Krotov*

The two-level model of construction of complex schedules of processing data parties in conveyor systems which setting deadlines of sets forming..... 33

*Yu.V. Fedoseeva, I.G. Zorina,**V.D. Tutarova, A.V. Azerskaya*

Automated information system «Individual plan the of vocation education of educator»..... 45

Automatic control systems*P.A. Nikishechkin, I.A. Kovalev,**A.S. Grigoryev, A.N. Nikich*

Research and development a cross-platform system for the collection and processing of diagnostic information about working technological equipment for industrial enterprises 51

Automated Inspection and Testing*A.V. Kojevnikov, V.N. Volkov*

Development of the analysis of the dynamic neural network model of the automated electric drive..... 56

N.V. Syreishchikova, D.A. Pshenichnikova

The entrance control of hardware, raw materials, accessories with use of statistical methods of a quality management..... 61

Mathematical process models in metallurgy*E.A. Gorbatova,**E.A. Emelianenko, M.V. Zaretckii*

Knowledge base of computer-aided process planning for processing of ore raw materials 70

V.A. Lebedev, S.V. Novikov

Mathematical model of welding and surfacing with computerized wire stickout..... 75

B.B. Zobnin, I.A. Azhipa

Multiapproach modeling for cleaning streams of dust and gas..... 81

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, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Сведения об организации и электронный адрес:** TimesNewRoman, размер 12 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 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. Рябчиков¹, В.В. Гребеникова², Е.С. Рябчикова³
^{1,2,3} ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Control of iron ore sinter properties with reducibility index model

M.Y. Ryabchikov¹, V.V. Grebennikova², E.S. Ryabchikova³
^{1,2,3} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
¹mail@mail.ru

пустая строка

Аннотация. Аннотация. Аннотация.

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

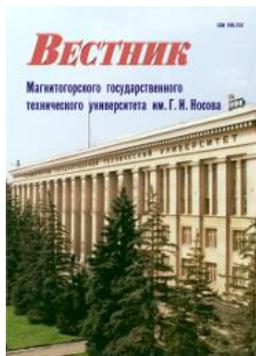
Abstract. Abstract. Abstract.

Keywords: keywords; keywords; keywords; keywords; keywords;

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.

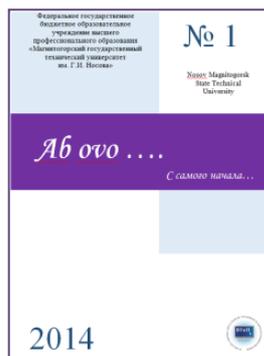
Другие рекомендуемые периодические издания



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 621.923.1

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЛАСТИН Р9М4К8 ВЫСОКОПОРИСТЫМИ НИТРИДБОРОВЫМИ КРУГАМИ

Я.И. Солер¹, А.И. Шустов²

^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

¹solera@istu.irk.ru

Аннотация. В данной работе приведены результаты оптимизации процесса плоского шлифования пластин Р9М4К8 высокопористыми кругами с зёрнами из кубического нитрида бора. На основе моделей множественного дисперсионного анализа с детерминированными факторами получены оптимальные технологические решения для разных стадий шлифования, которые позволили полностью выполнить требования по качеству пластин с одновременным увеличением производительности процесса до 6-ти раз.

Ключевые слова: оптимизация, шлифование, производительность, быстрорежущая сталь, качество поверхности.

Введение

Операции шлифования являются завершающими для большинства изделий машиностроения. На окончательной стадии изготовления быстрорежущих пластин (БП) их рабочие кромки подвергаются шлифованию, при этом их точность и качество регламентированы стандартом [1]. Однако на реальном производстве качество шлифованной поверхности зависит от квалификации рабочего. Уровни технологических факторов шлифования назначаются путем их постепенной интенсификации методом обработки пробной партии [2;3]. Широко применяются нормативы режимов резания, однако в этом случае получаемая после обработки топография поверхности зачастую не соответствует нормативной [4;5]. В результате снижается производительность производства и качество конечной продукции. Сказанное делает оптимизацию процесса шлифования БП актуальной проблемой. Все существующие методы оптимизации можно разделить на две группы: методы условной и безусловной оптимизации [6]. Поскольку процесс резания металлов зависит от множества взаимосвязанных факторов, для его оптимизации принимают метод условной оптимизации. Условная оптимизация сводится к поиску минимального и/или максимального значения целевой функции $f(x)$ n -мерного векторного аргумента x , область существования которой ограничивается. В данной работе на основе моделей многофакторного дисперсионного анализа (МДА) с детерминированными факторами была проведена оптимизация производительности процесса плоского шлифования и качества БП.

Методика проведения эксперимента

Шлифование БП проведено при следующих постоянных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3Е711В с вращением шпинделя по часовой стрелке; высокопористый круг (ВПК) с зёрнами из кубического

нитрида бора 1А1 СВN30 В126 100 L V К27-КФ40. Данный ВПК показал наилучшие РС из 11-ти исследованных по результатам моделирования в среде нечеткой логики с одновременным учетом мер положения и рассеяния шероховатостей и точности формы шлифованных БП [7]. Объект исследования – образцы из стали Р9М4К8 (66–68 HRC) с размерами $D \times H = 30 \times 40$ мм, шлифуемые по торцу; скорость круга $v_k = 28$ м/с; СОЖ – 5%-ная эмульсия Аквол – 6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин. Образцы шлифовались по схеме плоского шлифования периферией круга. При этом продольная подача $s_{пр}$ соответствует возвратно-поступательному движению стола станка, на котором устанавливались образцы. Поперечная подача s_n выполняется оператором вручную в плоскости шлифования перпендикулярно вектору $s_{пр}$ на двойной ход стола. Опускание круга на глубину t ведется периодически после завершения одного полного хода в осевом направлении в момент, когда стол с образцом перемещается в крайнее левое положение относительно оператора. Движение слева направо является рабочим, а обратное – выхаживающим с окончательным формированием топографии поверхности по схеме попутного шлифования (шпиндель имеет вращение по часовой стрелке). Переменные технологические параметры приведены в табл. 1.

Оптимизация процесса плоского шлифования БП Р9М4К8 проведена в программной среде *State-Ease Design-Expert* 8.0.4. Для ее реализации были построены модели МДА с детерминированными факторами. Выходные переменные процесса: параметры шероховатости R_a , R_q , R_z , R_{max} , S , S_m (ГОСТ 2789-73), измеренные на профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр» в двух взаимно ортогональных направлениях $i = \overline{1; 2}$ соответственно по векторам s_{pi} (R_{a1} , R_{z1} , R_{max1} и т.д.) и s_{pi} (R_{a2} , R_{z2} , R_{max2} и т.д.); отклонения от плоскостности EFE_{max} , EFE_a , EFE_q (ГОСТ 24642-88) и микротвердость HV .

Интервалы варьирования и уровни факторов в натуральном и кодированном виде

Фактор/Factor	Интервал варьирования/ Variation interval	Уровень/Level		
		нижний/down (-1)	основной/main (0)	верхний/upper (+1)
A-продольная подача $s_{пр}$, м/мин	5	5	10	15
B-поперечная подача $s_{п}$, мм/дв. ход	4	2	6	10
C-глубина резания t , мм	0,0075	0,005	0,0125	0,02
D-операционный припуск z , мм	0,1	0,1	0,2	0,3

Для поиска лучшего технологического решения использована функция желательности:

$$d = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

где $i=1 \dots n$ – оптимизируемые параметры процесса; d_i – дифференциальные функции желательности для каждого параметра i ; d – интегральная функция желательности всего технологического решения в диапазоне $[0,1]$. Значение функции $d=1$ свидетельствует о выполнении всех заданных требований.

Оценку производительности найденных оптимальных технологических решений в сравнении с нормативными режимами шлифования вели по основному (машинному) времени обработки t_0 , которое для плоского шлифования периферией круга равно [8]:

$$t_0 = 2l_p B (z/t + n_{\text{вых}})/s_{пр} s_{п}, \quad (2)$$

где $l_p = (l + l_{вр} + l_{пер})$ – длина рабочего хода; l – длина шлифуемой поверхности; $l_{вр}$ – длина врезания; $l_{пер}$ – длина перебега; z – операционный припуск; t – глубина резания; $s_{пр}$ – продольная подача; $s_{п}$ – поперечная подача на двойной ход; $n_{\text{вых}}$ – число выхаживающих ходов ($n_{\text{вых}} = 0$). Выражение (1) задает основные принципы оптимизации процесса: для минимизации t_0 необходимо увеличить $s_{пр}$, $s_{п}$, t и снизить z .

Результаты и обсуждение

Предварительно рассмотрим оптимизацию черного режима шлифования БП для повышения производительности процесса. С этой целью для параметров процесса были заданы следующие граничные условия, представленные в табл. 2. Для технологических факторов (входных параметров) продольной ($s_{пр}$), поперечной ($s_{п}$) подач и операционного припуска (z) задана целевая функция «*maximize*» (максимизация), а для глубины резания (t) – «*minimize*» (минимизация). Их веса были получены при значениях $n = [10; 1]$ – для $s_{пр}$, $s_{п}$, t и $n = [1; 10]$ – для z , что повысило надежность принятых решений. Для всех остальных (выходных) параметров качества целевой выбрана функция «*in range*» (в пределах). Для основных параметров топографии приняты следующие ограничения: $\hat{R}_{a1} \in [0,4; 0,68]$ мкм; $\hat{R}_{max1} \in [2,4; 3,6]$ мкм; $\hat{S}_{m1} \in [63; 100]$ мкм; $\overline{EFE}_{max} \in [8; 20]$ мкм (*TFE6*–8). Для основных параметров функция ранга R задана равной 5, для вспомогательных – $R=3$. Эффективность оптимизации оценивалась функциями желательности (1): интегральной (d) – по комплексной оптимизации топографии поверхности и дифференциальными (d_i) – по

результатам оптимизации каждого выходного параметра. Их варьирование до 1 отражает повышение эффективности оптимизации.

Данные табл.3 свидетельствуют о том, что принятые ограничения соответствуют нормативным уровням технологических факторов и достигаемому качеству поверхности для чистового шлифования быстрорежущих сталей.

Программой средой *Design-Expert* было найдено 32 технологических решения, самое оптимальное из которых оценено интегральной функцией желательности $d=0,580$. Оно имеет следующие уровни технологических факторов: $s_{пр} = 15$ м/мин; $s_{п} = 9,67$ мм/дв.ход; $t = 0,01$ мм; $z = 0,11$ мм. Данное решение позволило получить следующие выходные параметры процесса: \hat{R}_{a1} 0,55 (0,63*) мкм; \hat{R}_{z1} 1,91 (2,0*) мкм; \hat{R}_{q1} 0,68 (0,80*) мкм; \hat{R}_{max1} 3,29 (4,0*) мкм; \hat{S}_1 11,45 (12,5*) мкм; \hat{S}_{m1} 100 (125*) мкм; \hat{R}_{a2} 0,057 (0,063*) мкм; \hat{R}_{z2} 0,22 (0,25*) мкм; \hat{R}_{q2} 0,073 (0,080*) мкм; \hat{R}_{max2} 0,39 (0,40) мкм; \hat{S}_2 6,44 (8,0*) мкм; \hat{S}_{m2} 62,47 (63*) мкм; \overline{EFE}_{max} 13,56 мкм (*TFE7*); \overline{EFE}_a 8,24 мкм (*TFE6*); \overline{EFE}_q 8,96 мкм (*TFE6*); \overline{HV} 8752,24 МПа. В скобках указаны категориальные величины (КВ) (ГОСТ 2789-73) для параметров шероховатости и степени точности *TFE* отклонений от плоскостности (ГОСТ 24643-81). На рисунке представлены интегральная и дифференциальная функции желательности данного решения. Из рисунка видно, что оптимизация позволила полностью выполнить требования по качеству поверхности, о чем свидетельствуют дифференциальные функции желательности всех выходных параметров, равные $d_i=1$. Значение интегральной функции технологического решения $d=0,581$ обусловлено величинами дифференциальных желательностей технологических параметров ($s_{пр}$, $s_{п}$, t , z), не равными 1.

Основное время шлифования по (2) составило:

$$t_0 = \frac{40 \times 30 \times 1,27 \times 140}{32 \times 10^3 \times 19} = 0,35 \text{ мин} - \text{ по нормативам}$$

для черного шлифования (табл.3),

$$t_0 = \frac{40 \times 30 \times 0,86 \times 11}{15 \times 10^3 \times 9,67} = 0,078 \text{ мин} - \text{ для оптимального}$$

решения.

Представленные результаты свидетельствуют, что оптимизация позволила сократить машинное время в 4,48 раза. При этом предсказано снижение высотных параметров шероховатости на 1–3 категориальные величины по сравнению с нормативным режимом резания.

Таблица 2

Входные и выходные параметры оптимизации процесса шлифования быстрорежущих пластин на черновой стадии обработки

Параметр	Целевая функция	y_{min}	y_{max}	n	R	Параметр	Целевая функция	y_{min}	y_{max}	n	R
s_{np}	<i>aximize</i>	5	15	[10;1]	5	\bar{R}_{a2}	<i>in range</i>	0,04	0,07	[1]	3
$s_{п}$	<i>aximize</i>	2	10	[10;1]	5	\bar{R}_{z2}	<i>in range</i>	0,18	0,28	[1]	3
z	<i>aximize</i>	0,005	0,2	[10;1]	5	\bar{R}_{q2}	<i>in range</i>	0,06	0,09	[1]	3
t	<i>inimize</i>	0,1	0,3	[1;10]	5	\bar{R}_{max2}	<i>in range</i>	0,35	0,53	[1]	3
\bar{R}_{a1}	<i>in range</i>	0,4	0,60	[1]	5	\hat{S}_2	<i>in range</i>	6	7,03	[1]	3
\bar{R}_{z1}	<i>in range</i>	1,5	2,23	[1]	3	\hat{S}_{m2}	<i>in range</i>	60	100	[1]	3
\bar{R}_{q1}	<i>in range</i>	0,55	0,82	[1]	3	\bar{EFE}_{max}	<i>in range</i>	8	20	[1]	5
\bar{R}_{max1}	<i>in range</i>	2,4	3,6	[1]	5	\bar{EFE}_a	<i>in range</i>	6	20	[1]	3
\hat{S}_1	<i>in range</i>	10	12,3	[1]	3	\bar{EFE}_q	<i>in range</i>	6	20	[1]	3
\hat{S}_{m1}	<i>in range</i>	63	100	[1]	5	\bar{HV}	<i>in range</i>	7200	13415	[1]	5

Примечание: y_{min} , y_{max} – минимальные и максимальные прогнозируемые значения параметров в их пространстве U ; n , R – функции веса и рангов оптимизируемых параметров.

Таблица 3

Параметры качества быстрорежущих пластин, достигаемые нормативными режимами шлифования

Режим шлифования	Уровни технологических факторов по [8]	Достигаемые параметры качества по [9;10], мкм		
		R_a	R_{max}	EFE_{max}
Черновой	$s_{np}=32$ м/мин; $s_{п}=19$ мм/дв.ход; $z=0,70$ мм; $t=0,005$ мм	2,5–1,2	20,0–10,0	25–10(<i>TFE8–6</i>)
Чистовой	$s_{np}=32$ м/мин; $s_{п}=12,5$ мм/дв.ход; $z=0,70$ мм; $t=0,004$ мм	0,63–0,2	5–1,6	16–6(<i>TFE7–5</i>)

Примечание: Значения R_{max} получены из расчетной зависимости $R_{max}=6,7 R_a$ [11] с округлением до ближайшей категориальной величины (КВ) по ГОСТ 2789-73; Степень точности *TFE* по ГОСТ 24643-81.

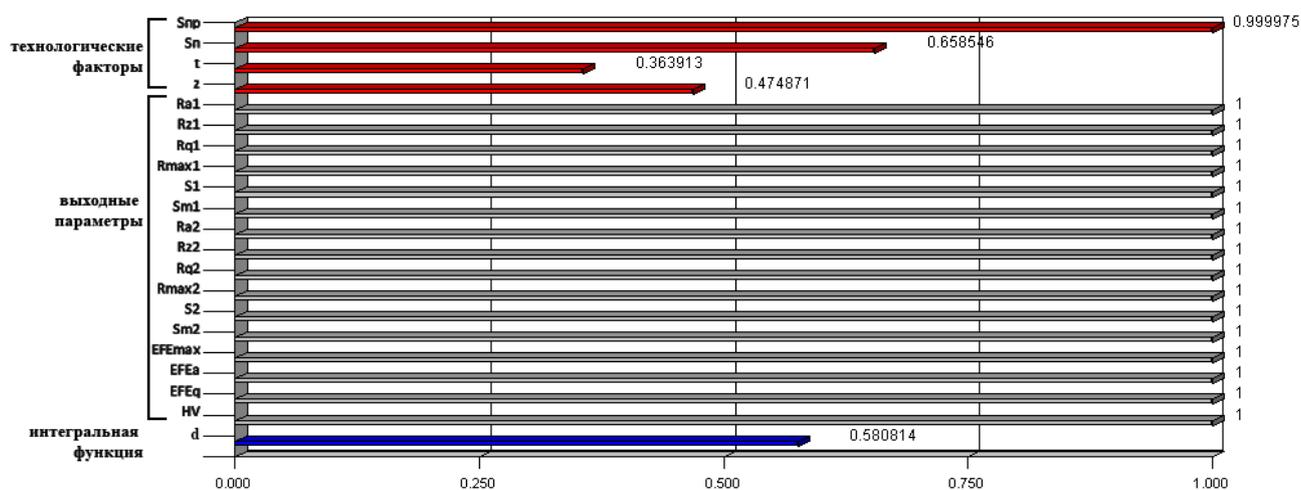


Рис.1. Интегральная (d) и дифференциальные (d_i) функции желательности технологических ($s_{np}-z$) и выходных параметров ($R_{a1}-HV$) процесса чернового шлифования БП

Аналогичным образом была проведена оптимизация для чистового режима шлифования с ограничениями: $\hat{R}_{a1} \in [0,2; 0,4]$ мкм; $\hat{R}_{max1} \in [1,3; 3,2]$ мкм; $\hat{S}_{m1} \in [45; 80]$ мкм; $\overline{EFE}_{max} \in [6; 16]$ мкм (*TFE7*). Полученные уровни режима резания $s_{пр} = 13,78$ м/мин; $s_{п} = 4,82$ мм/дв.ход; $t = 0,02$ мм; $z = 0,1$ мм позволяют получить топографию поверхности с выходными параметрами: \hat{R}_{a1} 0,49 (0,50*) мкм; \hat{R}_{z1} 1,47 (2,0*) мкм; \hat{R}_{q1} 0,49 (0,50*) мкм; \hat{R}_{max1} 2,44 (2,5*) мкм; \hat{S}_1 10,35 (12,5*) мкм; \hat{S}_{m1} 79,99 (80*) мкм; \hat{R}_{a2} 0,05 (0,05*) мкм; \hat{R}_{z2} 0,19 (0,20*) мкм; \hat{R}_{q2} 0,06 (0,063*) мкм; \hat{R}_{max2} 0,33 (0,40) мкм; \hat{S}_2 6,3 (8,0*) мкм; \hat{S}_{m2} 62,5 (63*) мкм; \overline{EFE}_{max} 13,63 мкм (*TFE7*); \overline{EFE}_a 8,10 мкм (*TFE6*); \overline{EFE}_q 8,85 мкм (*TFE6*); \overline{HV} 8792,98 МПа.

Основное время для лучшего варианта шлифования составило $t_o=0,077$, а для чистового шлифования по нормативам (табл.3) – 0,45 мин, т.е. производительность шлифования возросла в 5,86 раза. Интегральная функция желательности для этого решения составила 0,048, т.е. оказалась меньше, чем для чернового шлифования. Сказанное объясняется более жесткими ограничениями, принятыми для чистового шлифования. Дополнительно предсказано уменьшение высотных параметров шероховатости на 1–3 КВ с сохранением макрогеометрии и микротвердости поверхности БП в сравнении с оптимальным решением для чернового шлифования.

Выводы

1. Полученные результаты оптимизации процесса шлифования БП Р9М4К8 высокопористыми нитридными кругами могут быть использованы при робастном проектировании операций для сокращения сроков технологической подготовки инструментального производства.
2. Установлено, что оптимизация процесса шлифования позволила обеспечить требования по качеству поверхности БП, превышающие нормативные, и сократить основное время на разных стадиях шлифования до 6-ти раз.

1. ГОСТ 2379-77. Пластины из быстрорежущей стали к резцам. Форма и размеры. Взамен ГОСТ 2379-67. Введ. 01.07.78. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 22 с.
2. Ардашев, Д.В. Континуальное проектирование операций шлифования / Д.В. Ардашев, В.И. Гузев // СТИН. – 2016. – №8. – С. 33–36.
3. Pereverzev P.P. Akintseva A.V. Modeling of metal removal during an internal grinding in view of kinematics cutting features, *Russian Engineering Research*, 2016, no 5, pp. 888–893.
4. Зубарев, Ю.М. Плоское шлифование. Оборудование, оснастка, технологии / Ю.М. Зубарев, В.Г. Юрьев, В.В. Звоновских // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2014. – № 11. – С. 2–24.
5. Медведев, Д.Д. Точность обработки в мелкосерийном производстве / Д.Д. Медведев. – М.: Машиностроение, 1973. – 120 с.
6. Mukherjee I., Ray P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes // *Computers & Industrial Engineering*. – 2006. – V.50. – № 1–2. – P. 15–34.
7. Солер, Я.И. Выбор высокопористых нитридных кругов по топографии пластин Р9М4К8 при маятниковом шлифовании с применением нечеткой логики / Я.И. Солер, А.И. Шустов, М.Т. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – №7 (676). – 2016. – С. 82–93.
8. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев и др. – Челябинск: Изд-во АТОКСО. – 384 с.
9. Филимонов, Л.Н. Плоское шлифование / Под ред. Муцяно. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1985. – 109 с.
10. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. 5-е изд., исправл. М.: Машиностроение, 2003. – 912 с.
11. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

OPTIMIZATION OF FLAT GRINDING PROCESS OF W9MO4CO8 WITH HIGHLY POROUS BORON NITRIDE WHEELS

Ya.I. Soler¹, A.I. Shustov²

^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper shows results of optimization of flat grinding process of high-speed steel plates W9Mo4Co8 under highly porous wheel with cubic nitride boron grains. Optimal technology solutions in base of multiple analysis of variances models with determinate factors allow to carry out full of surface quality requirements and increase of productivity of grinding process for 6 times.

Keywords: optimization, grinding, productivity, high-speed steel, surface quality

REFERENCES

1. GOST 2379-77. HSS tool tips. Shapes and dimensions. Instead of GOST 2379-67. Introduced 01.07.78. – Moscow, Standartinform Publ., 1985. – 22 p.
2. Ardashev D.V. Guzev V.I. Continual design of grinding operations. [Kontinual'noe proektirovanie operacij shlifovaniya], STIN [*Machines and Tools*], 2016, no 8, pp. 33–36.

-
3. Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling of metal removal during an internal grinding in view of kinematics cutting features, *Russian Engineering Research*, 2016, no 5, pp. 888–893.
 4. Zubarev YU.M., YUr'ev V.G., Zvonovskih V.V. Flat grinding. Equipment. Tool set. Technologies [Ploskoe shlifovanie. Oborudovanie, osnastka, tekhnologii], *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. Prilozhenie [Handbook. Engineering magazine]*, 2014, no 11, pp. 2-24.
 5. Medvedev D.D. *Tochnost' obrabotki v melkoserijnom proizvodstve* [Accuracy of machining in small-scale manufacture], Moscow, Mashinostroenie, 1973. 120 p.
 6. Mukherjee I., Ray P. K. A review of optimization techniques in metal cutting processes, *Computers & Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no 1–2, – pp. 15–34.
 7. Soler YA.I., SHustov A.I., Nguen M.T. Choise of highly porous wheel by topography of HSS W9Mo4Co8 flats during pendular grinding with use fuzzy logic [Vybor vysokoporistykh nitridborovykh krugov po topografii plastin R9M4K8 pri mayatnikovom shlifovanii s primeneniem nechetkoj logiki], *Izvestie vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2016, no 7, pp. 82-93.
 8. IArdashev D.V. and etc. *Rezhimy rezaniya na raboty, vypolnyaemye na shlifoval'nykh i dovodochnykh stankax s ruchnym upravleniem i poluavtomatax: spravochnik [Cutting conditions on the work carried out on grinding and finishing machines with manual and semi-automatic: a handbook]*, Chelyabinsk, ATOKSO, 384p.
 9. Filimonov L.N. *Ploskoe shlifovanie [Flat grinding]*, Saint-Petersburg, Mashinostroenie, 1985. 109 p.
 10. Dalsky A.M. and etc. *Spravochnik tehnologiya-mashinostroitelya [Handbook of process engineer of mechanical engineering]*, Moscow, Mashinostroenie, 2003. 912 p.
 11. Suslov A.G., Bez"yazychnyj V.F., Panfilov Yu.V. and etc. *Inzheneriya poverxnosti detalej [Part surface engineering]*, Moscow, Mashinostroenie, 2008. 320 p.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ЗАТРАТ РЕСУРСОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ТКАНЕЙ

Борчик Е.М.

ОАО «Моготекс», Могилев, Беларусь

katrinb15@gmail.com

Аннотация. В статье представлена имитационная модель производства тканей предприятия лёгкой промышленности, построенная в системе имитации Powersim, для автоматизации расчета затрат ресурсов при оптимальном сочетании технологических режимов. Задача определения оптимального сочетания технологических режимов в производстве определенного вида ткани по критерию минимизации стоимости ресурсов и временных затрат решена с использованием потокового программирования, как задача определения кратчайшего пути или минимального расхода ресурсов. Получены сочетания технологических режимов с минимальными и максимальными стоимостями затрат, как наилучший и наихудший результат использования имеющегося оборудования. Разработан алгоритм интеграции имитационной модели в корпоративную информационную систему предприятия посредством применения комплекса программных и информационных средств, включающих MSExcel и PowerSim.

Ключевые слова: потоковая модель, имитационная модель, информационная система, ресурсы.

Введение

Ткань, изготовленная на ткацком производстве с помощью специального оборудования и прошедшая стадию браковки, называется суровой тканью. До поступления к потребителю суровые ткани подвергаются предварительной обработке, крашению или печатанию, различным видам заключительной отделки. Суровая ткань, прошедшая все стадии отделки в отделочном производстве (отварка, отбелка, покраска, нанесение рисунка, виды заключительных отделок) и браковки, называется готовой тканью. Процессы отделки ткани, или технологические жизненные циклы ткани состоят из последовательности технологических операций, или стадий технологического процесса. Каждая операция предполагает обработку ткани на определённом технологическом оборудовании и регламентируется соответствующим технологическим режимом (ТР). На стадиях производственного процесса в соответствии с технологической документацией допускается выбор одного из возможных видов оборудования. Оборудование отделки ткани включает такие части как: ванны для замочки, отварочные ванны, промывные коробки и другие части, для каждой из которых согласно технологическим режимам устанавливаются соответствующие настройки. Каждый ТР включает в себя: температурные, скоростные и другие настройки для частей оборудования, или оборудования в целом; применяемые химматериалы, их концентрации; периодичность замены химрастворов и другое.

Одной из задач рационального выбора ресурсов в технологическом процессе производства готовой ткани является задача расчета (уточнения) стоимости затрат химикатов и красителей, в общем случае имеющих стохастический характер, на производство готовой ткани в разрезе себестоимости отдельных технологических режимов. Порезимный расчёт затрат позволяет решить задачу моделирования оптимального технологического процесса производства ткани; задачу определения

оптимального сочетания технологических режимов для процесса производству определенного вида готовой ткани. Для устранения неоднозначности выбора технологических режимов (ТР) на каждом из этапов процесса производства (ПП) поставлена задача многокритериальной оптимизации ПП (в разрезе стоимости ресурсов и/или временных затрат для выпуска заданного количества тканей) [1, 2].

1. Математическая модель производственного процесса

Себестоимости отдельных технологических режимов складываются из стоимостей используемых ресурсов (химикаты, красители, энергоресурсы и другие ресурсы).

Общая стоимость расхода энергоресурсов, необходимых на обработку 1000 м.п. по заданному технологическому режиму на определённом оборудовании рассчитывается на предприятии по следующим, приведённым ниже, формулам [3].

Для каждого типа технологического оборудования рассчитывается нормированное задание N_z – количество ткани выбранного артикула (в м.п.), которое должно обрабатываться на данном оборудовании по заданному технологическому режиму за 1 час. Вид одной из формул для расчёта N_z :

$$N_z = \text{ROUND}(kpv \cdot v_{ob} \cdot 60) \text{ (м.п./ч)}, \quad (1)$$

где $kpv \in [0,1]$ – коэффициент для соответствующего типа оборудования.

Плановая норма расхода времени T_{Nz_1000} , необходимого на обработку 1000 погонных метров (п.м.) выбранного артикула ткани на определённом оборудовании по заданному технологическому режиму зависит от нормированного задания N_z :

$$T_{Nz_1000} = 1000/N_z \text{ (ч)}. \quad (2)$$

С учётом плановых норм расхода ресурсов за 1 час работы оборудования (N_{RG} – газа, м. куб/ч; N_{RP} – пара, т/ч; N_{RE} – электроэнергии, кВт/ч), коэффициента энтальпии $Intal$ и цен на энергоресурсы (Cen_G , Cen_P , Cen_E – газа, пара, электроэнергии, соответственно) рассчитываются: плановые нормы расхода необходимых для обработки на оборудовании 1000 м.п. ткани ресурсов (N_{RG_1000} , N_{RP_1000} , N_{RE_1000} – газа, пара, электроэнергии, соответственно), стоимости расхода отдельно взятых ресурсов (St_G , St_P , St_E – газа, пара, электроэнергии, соответственно) и общая стоимость энергоресурсов St_Energo :

$$St_G = Cen_G \cdot N_{RG_1000} \text{ (руб.)}, \quad (3)$$

$$N_{RG_1000} = N_{RG} \cdot T_{Nz_1000} \text{ (м. куб)}, \quad (4)$$

$$St_P = Cen_P \cdot N_{RP_1000} \text{ (руб.)}, \quad (5)$$

$$N_{RP_1000} = \frac{Intal \cdot N_{RP} \cdot T_{Nz_1000}}{1000} \text{ (гигакалл)}, \quad (6)$$

$$St_E = Cen_E \cdot N_{RE_1000} \text{ (руб.)}, \quad (7)$$

$$N_{RE_1000} = N_{RE} \cdot T_{Nz_1000} \text{ (кВт)}, \quad (8)$$

$$St_Energo = St_G + St_P + St_E \text{ (руб.)}. \quad (9)$$

Общая стоимость расхода химикатов, необходимых на обработку 1000 м.п. по заданному технологическому режиму на определённом оборудовании рассчитывается на предприятии по следующим формулам:

$$St_Xim = \sum_j \sum_i Norm_{x_{ij}} \cdot Cen_{x_i} \text{ (руб.)}, \quad (10)$$

$$Norm_{x_{ij}} = C_{ij} / 100 \cdot (VesTk \cdot Percent_j) + C_{ij} \cdot V_{vann_j} \cdot num_{Sl_j} / (N_{z_1000} \cdot Time_{sl_j}) \text{ (кг/1т. м.п.)}, \quad (11)$$

где $Norm_{x_{ij}}$ – плановая норма расхода i -го химиката, используемого в j -й ванне оборудования (кг/1т. м.п.); Cen_{x_i} – цена 1-го кг i -го химиката; C_{ij} – концентрация i -го химиката в j -й ванне (гр./л); $VesTk$ – вес 1 м.п. суровой ткани (кг); $Percent_j$ – процент отжима ткани после прохождения j -й ванны (%); V_{vann_j} – объём j -й ванны оборудования (л); num_{Sl_j} – количество сливов химраствора из j -й ванны в течение периода $Time_{sl_j}$ (ч); N_{z} – нормированное задание (м.п./ч).

Если принять переменную A за количество химиката номер 1, уносимое тканью из раствора, тогда:

$$A = (VesTk \cdot Percent \cdot 10) \text{ (кг)},$$

B – расход на 1000 м.п. химиката №1 с концентрацией C_1 , получим:

$$B = C_1 \cdot A / 1000 \text{ (кг/1т. м.п.)},$$

D – количество ткани, производимое за неделю, тогда:

$$D = N_{z_1000} \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \text{ (м)},$$

где N_{z_1000} – нормированное задание (м/ч), D_1 – восьмичасовая рабочая смена, D_2 – 3 смены в день, D_3 – 5 дней в неделю.

Z – норма расхода на слив:

$$Z = \frac{C_1 \cdot V_{vann} \cdot num_{Sl}}{D \cdot 1000},$$

где, V_{vann} – сливаемый объём, num_{Sl} – количество сливов в неделю, получим:

$$Norm_{X_{ij}} = B + Z \text{ (кг/1т. м.п.)}.$$

Собрав все заданные формулы, получим результирующую формулу (11) для расчета нормы расхода химикатов на 1000 м.п.

Для каждого технологического режима указывается допустимый диапазон изменения расчётной скорости v_{ob} , м/мин:

$$v_{ob} \in [S_{MIN}, S_{MAX}]. \quad (12)$$

Предприятие на основании формулы (3) определяет для дальнейших расчётов некоторое усреднённое значение v_{ob} :

$$v_{ob} = 0,5 \cdot (S_{MIN} + S_{MAX}) + 1. \quad (13)$$

Согласно технологической документации, концентрации химматериалов C_{ij} допускают изменение в диапазоне:

$$C_{ij} \in [\bar{C}_{ij} - \Delta C_{ij}; \bar{C}_{ij} + \Delta C_{ij}], \quad (14)$$

где \bar{C}_{ij} – некоторое среднее значение концентрации, ΔC_{ij} – величина отклонения концентрации от среднего значения.

Суммарная стоимость St_{1000} расхода химикатов и энергоресурсов на обработку 1000 м.п. выбранной ткани по заданному технологическому режиму на определённом оборудовании рассчитывается по формуле:

$$St_{1000} = St_Energo + St_Xim \text{ (руб.)}. \quad (15)$$

Задача определения оптимального сочетания технологических режимов для процесса производства определённого вида готовой ткани в разрезе стоимости ресурсов и временных затрат, необходимых для выпуска 1000 м.п., может быть решена с использованием динамического программирования, как задача определения кратчайшего пути, или минимального расхода ресурсов [4, 2]. Решение задачи достигается согласно методу динамического программирования по принципу оптимальности Беллмана с введением лексикографического упорядочения критериев оптимизации (в разрезе стоимости ресурсов и/или временных затрат для выпуска заданного количества продукции).

Процессы производства тканей представляются в виде взвешенных, ориентированных, ациклических графов (рис. 1), вершинами которых являются технологические режимы; нагрузки на дуги графов интерпретируются как временные затраты, либо стоимости затрат ресурсов на выпуск 1000 м.п. ткани на соответствующем оборудовании.

Сложность заключается в том, что в производственном процессе крашения тканей набивным способом (ПП КТНС) – в настоящее время не существует, либо они требуют уточнения, методик расчёта плановых норм расхода химикатов и красителей.

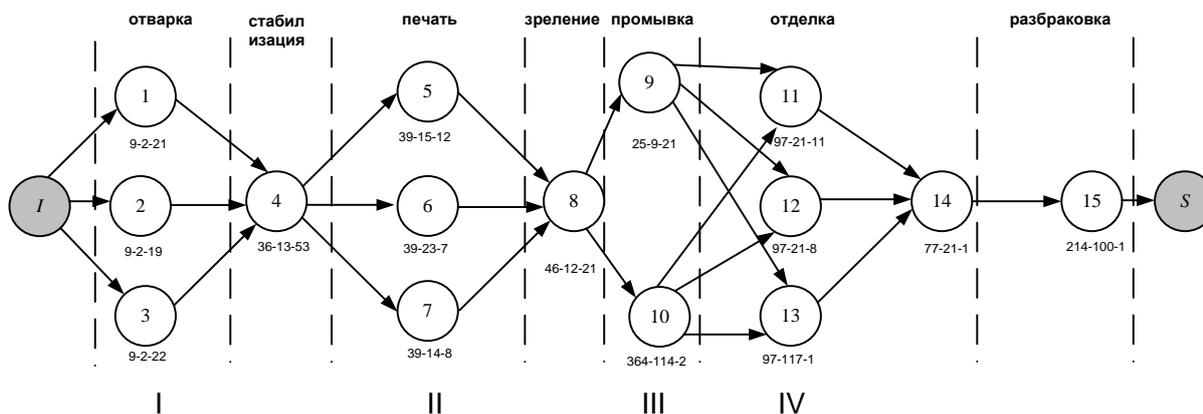


Рис.1. Процесс производства выбранного артикула готовой ткани

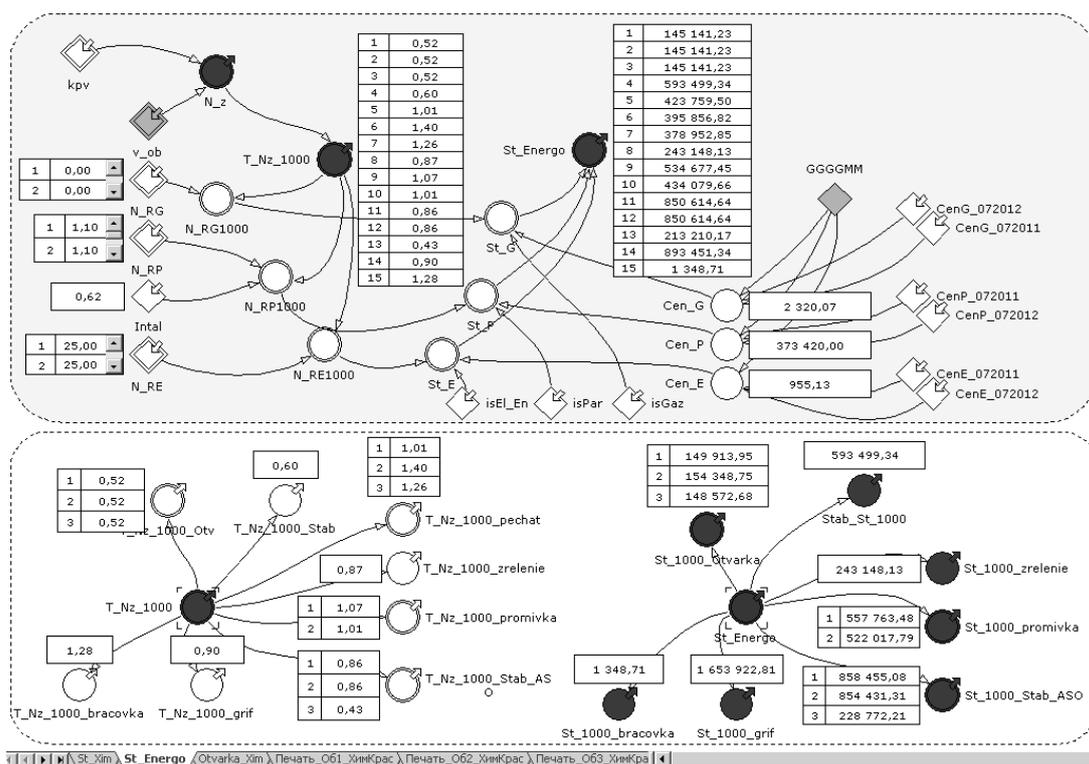


Рис.2. Вкладка расчёта плановых норм расхода времени, энергоресурсов и их стоимостей

2. Имитационная модель производственного процесса

Для выбора оптимальных ТР в системе имитации PowerSim [5] построена имитационная модель (ИМ) расчета плановых норм расхода времени и ресурсов на выпуск 1000 м.п. тканей в разрезе отдельных технологических режимов. Каждая стадия процесса производства готовых тканей представлена на отдельном листе построенной ИМ. Определение оптимального сочетания ТР для исследуемой проводки производится на специально созданном листе итогов модели.

На рис. 2 представлена вкладка имитационной модели, предназначенная для расчёта плановых норм расхода времени, энергоресурсов и их стоимостей в производственном процессе крашения тканей набивным способом.

На рис. 3 представлена модель расчета затрат на один из режимов отварки ткани. Ниже приведено описание констант, переменных, откликов.

Константы:

VesTk – вес ткани:

type VesTk = Real; const VesTk = 0,127.

Percent_1 – процент отжима ткани:

type Percent_1 = Real; const Percent_1 = 65.

Time_sl_1 – время от заливки до слива химраствора, ч:

type Time_sl_1 = Real; const Time_sl_1 =

8*3*5=120.

num_sl_1 – количество сливов химраствора в течение периода Time_sl_1:

type num_sl_1 = Real; const num_sl_1 = 1.

V1, V2 – объёмы 1-й, 2-й ванн с химраствором, соответственно:

type V1 = Real; const V1 = 700;

type V2 = Real; const V2 = 20000.

C_1 – вектор концентраций химикатов:

type C_1 = Real; dim C_1 = 1..2; const C_1 = {2; 1}.

fixC_1 – управляющий параметр фиксации среднего значения концентрации химикатов данного ТР.

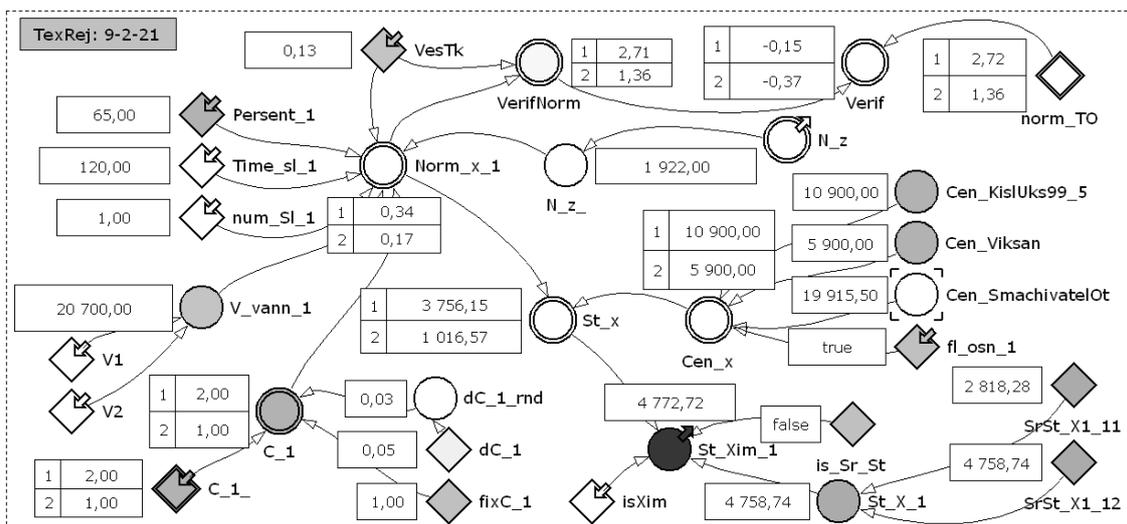


Рис.3. Технологический режим отварки ткани

dC_1 – максимальное отклонение от среднего значения концентрации химикатов.

$isXim$ – управляющий параметр учёта химикатов TP:

type $isXim$ = Integer; **const** $isXim$ = 1.

fl_osn_1 – признак выбора основного химиката для 1-го TP отварки при истинном значении, иначе – выбор химиката-аналога, при ложном:

type fl_osn_1 = Logical; **const** fl_osn_1 = TRUE.

$norm_TO$ – плановые нормы расхода химикатов, рассчитанные технологическим отделом (для верификации имитационно модели).

$SrSt_X1_11$, $SrSt_X1_12$ – средние (уточнённые) стоимости химикатов 1-го TP отварки, 2011 г, 2012 г, соответственно.

is_Sr_St – управляющий параметр учёта средних (уточнённые) стоимостей химикатов TP.

Переменные кадра или "теневые переменные"

(являются изображением или псевдонимом для "первоначальной" переменной [5]; полезны для соединения переменных, размещенных в различных частях модели): $Cen_SmachivatelOt$, $Cen_KislUks99_5$, Cen_Viksan – цены химикатов «Смачиватель OT», «Кислота уксусная 99,5%», «Виксан».

type $Cen_SmachivatelOt$ = Real;
aux $Cen_SmachivatelOt$ = IF(GGGGMM=201107;
 $CenSmachivatelOt_1 * CoursSmachivatelOt[1]$;
 $CenSmachivatelOt_2 * CoursSmachivatelOt[2]$).

Вычисляемые переменные:

Объём ванн с химраствором:

type V_vann_1 = Real; **aux** V_vann_1 = $V1 + V2$.

Нормированное задание (плановые нормы расхода времени на выполнение операций технологических режимов):

type N_z = Real; **dim** N_z = 1..15; **aux** N_z = ROUND($kpv * v_ob * 60$).

Нормированное задание на 1-й TP (рассматриваемый в данный момент TP):

type N_z_1 = Real; **aux** N_z_1 = $N_z[1]$.

Отклик концентрации химикатов:

type dC_1_rnd = Real; **aux** dC_1_rnd = RANDOM(-1 * dC_1 ; dC_1);

type C_1 = Real; **aux** C_1 = IF ($fixC_1 = 1$; C_1 ;
 $C_1 + dC_1_rnd$).

Определение плановой нормы расхода химикатов TP:

type $Norm_x_1$ = Real;
aux $Norm_x_1$ = $((VesTk * Percent_1) / 100 +$
 $V_vann_1 * num_sl_1 / (N_z * Time_sl_1)) * C_1$.

Определение цен на химикаты TP в зависимости от рассматриваемого периода:

type $Cen_KislUks99_5$ = Real;
aux $Cen_KislUks99_5$ = IF(GGGGMM=201107;
 $Cen_KislUks99_5_1 * Cours_KislUks99_5[1]$;
 $Cen_KislUks99_5_2 * Cours_KislUks99_5[2]$);

type Cen_Viksan = Real;
aux Cen_Viksan = IF(GGGGMM=201107;
 $Cen_Viksan_1 * Cours_Viksan[1]$;
 $Cen_Viksan_2 * Cours_Viksan[2]$);

type Cen_x = Real **aux** Cen_x = { $Cen_KislUks99_5$;
IF (fl_osn_1 ; Cen_Viksan ; $Cen_SmachivatelOt$)}.

Определение стоимостей отдельных израсходованных химикатов TP в результате обработки заданного количества ткани:

type St_x = Real; **aux** St_x = $Cen_x * Norm_x_1$.

St_X_1 – средняя (уточнённая) стоимость расхода химикатов 1-го TP отварки. Определение уточнённой стоимости в зависимости от рассматриваемого временно-го периода:

type St_X_1 = Real;
 St_X_1 = IF(GGGGMM=201107; $SrSt_X1_11$; $SrSt_X1_12$).

St_Xim_1 – общая стоимость израсходованных химикатов TP операции отварки заданного количества ткани (*отклик*).

type St_Xim_1 = Real;
aux St_Xim_1 = IF(is_Sr_St =TRUE;
 St_X_1 ; ARRISUM(St_x)) * $isXim$.

Стоимости химикатов TP процесса производства готовой ткани, в общем случае имеют стохастический характер, уточняемый методом Монте-Карло. При этом стохастический характер отклику St_Xim_1 придаёт отклик концентрации химикатов C_1 (Real, Dim= 1..2) участвующий в расчёте отклика St_Xim_1 и зависящий от параметров C_1 , dC_1 , $fixC_1$ (где C_1 – средние значения концентраций химикатов, dC_1 – модуль

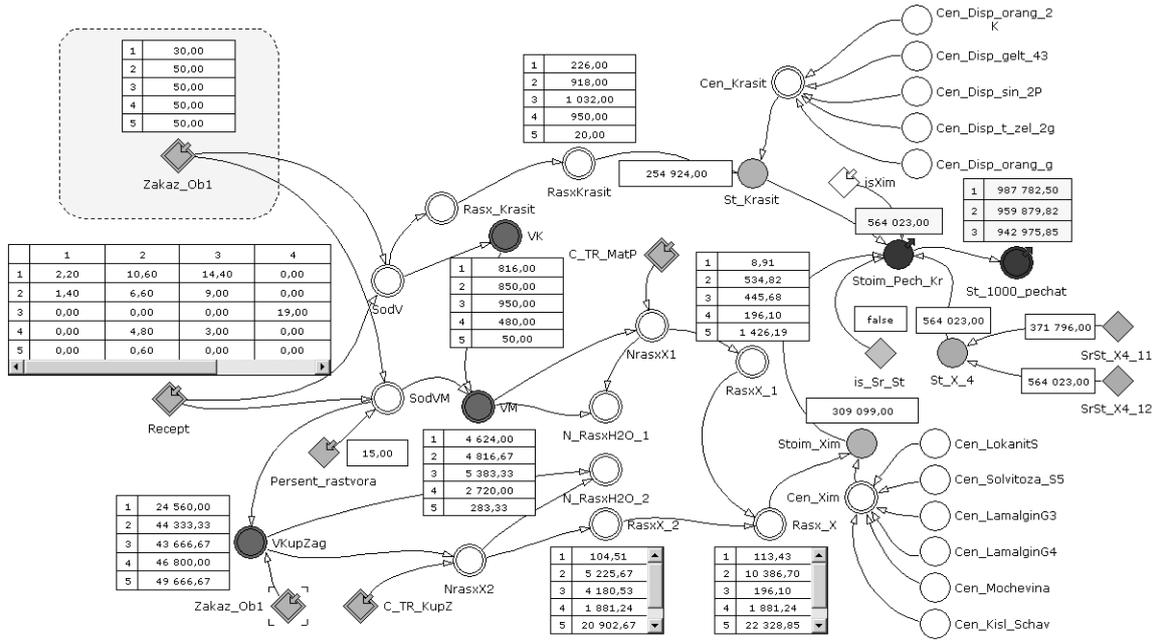


Рис.4. Технологический режим печати на ткани

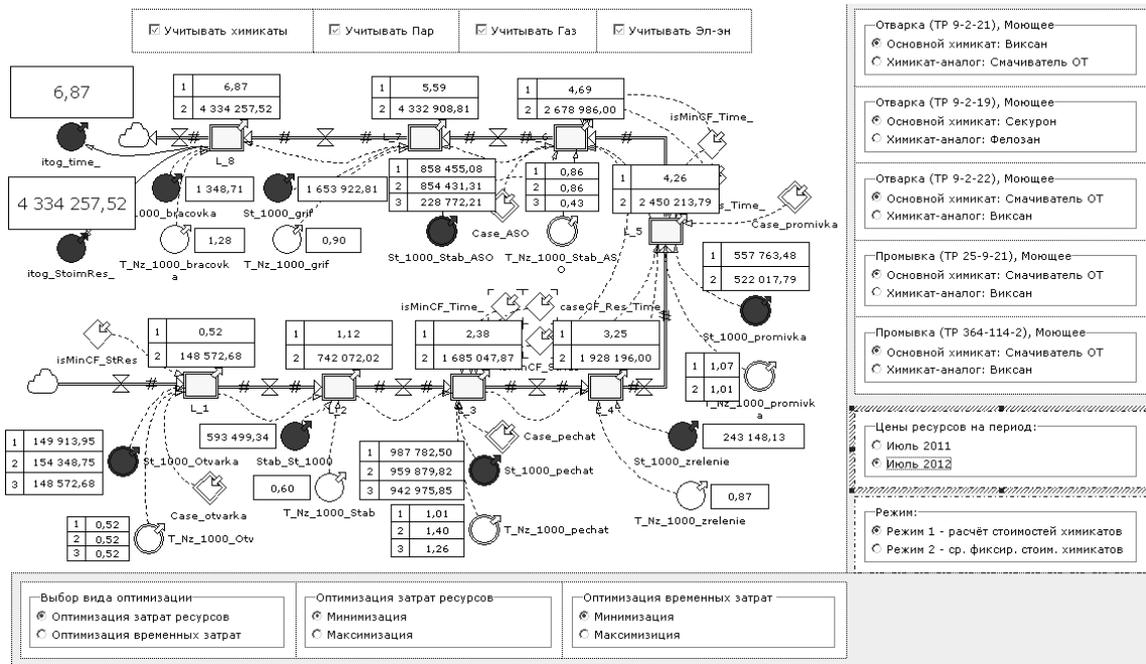


Рис.5. Лист итогов имитационной модели

допустимого отклонения от среднего значения концентрации химикатов, $fixC_{1i} \in \{0, 1\}$ – управляющий параметр фиксации заданных средних значений концентраций химикатов (при $fixC_{1i} = 1$ фиксируется среднее значение концентрации):

$$dC_{1_rnd} = \text{RANDOM}(-1 * dC_{1i}, dC_{1i}) \quad (16)$$

$$C_{1i} = \text{IF}(fixC_{1i} = 1, C_{1i}, C_{1i} + dC_{1_rnd}) \quad (17)$$

Алгоритмы ТР печати имеют детерминированный характер расчёта общих стоимости химматериалов.

Параметр *Zakaz_Ob1* (см. рис. 4) – заказ печатной краски (кг) для каждого из шаблонов рисунка для

оборудования ТР печати, являются параметрами модели, доопределяемыми на основании анализа статистических данных, собираемых непосредственно на объекте исследования.

На рис. 5 представлен лист итогов исследования имитационной модели.

Круглые переменные, выделенные цветом, имена которых начинаются с «S», отражают стоимости расхода ресурсов по режимам. Круглые переменные, не выделенные цветом, имена которых начинаются с «T», отражают расход времени по режимам. Прямоугольные переменные уровней L_1, \dots, L_8 отражают суммарные результаты на каждой стадии по времени и стоимости в соответствии с выбором критерия оптимизации.

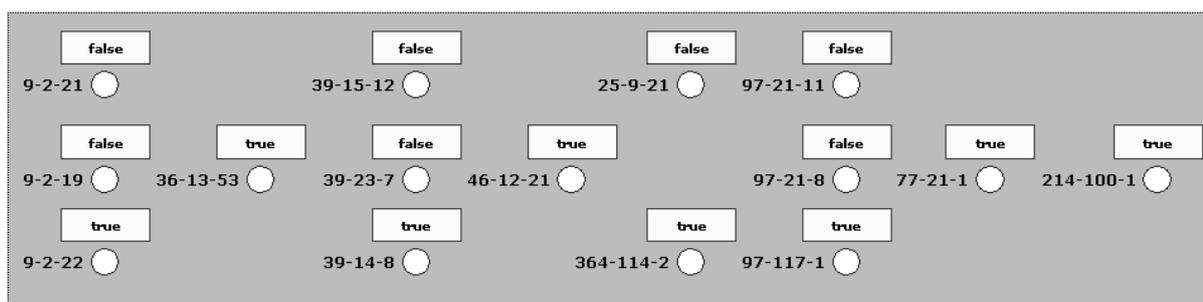


Рис.6. Оптимальное сочетание ТР для процесса производства готовой ткани

Круглые переменные, выделенные цветом, имена которых начинаются с «itog» (рисунок 5), отражают итоговые результаты оптимизации по времени и стоимости. Определение оптимального сочетания ТР производственного процесса (ПП) производится согласно принципу оптимизации Беллмана.

В верхней и нижней областях листа итогов, области справа находятся константы, которые используются в качестве управляющих параметров имитационной модели.

Описание уровней:

- Level_1 - стоимость ресурсов первой стадии ПП,
- Level_2 - суммарная стоимость ресурсов первых двух стадий ПП,
- Level_3 - суммарная стоимость ресурсов первых трёх стадий ПП,
- Level_4 - суммарная стоимость ресурсов первых четырёх стадий ПП,
- Level_5 - суммарная стоимость ресурсов первых пяти стадий ПП,
- Level_6 - суммарная стоимость ресурсов первых шести стадий ПП,
- Level_7 - суммарная стоимость ресурсов первых семи стадий ПП,
- Level_8 - суммарная стоимость ресурсов всех (восьми) стадий ПП.

На рис. 6 представлена вкладка ИМ, представляющая собой последовательность переменных-предикатов, указывающих оптимальное сочетание технологических режимов для исследуемого процесса производства.

3. Процедура уточнения нагрузок на дуги графа ТП

Процедура уточнения нагрузок на дуги графа ТП методом Монте-Карло с использованием специально разработанных моделей их имитации:

Шаг 1. Инициализация значений входных параметров ИМ: параметров технологических режимов; управляющих параметров ИМ. Установка стохастического режима имитации плановых норм расхода ресурсов ТР и обычного режима работы ИМ с полным расчётом по заданным алгоритмам стоимостей затрат ресурсов ($is_Sr_St = False$).

Шаг 2. Запуск эксперимента.

Шаг 3. Выгрузка в КИС предприятия: общих стоимостей S_{ij} потоков рассматриваемых ресурсов в

соответствии со значениями управляющих параметров ИМ (например, потоков химикатов, энергоресурсов, общего расхода ресурсов).

Шаг 4. Повтор шагов 2,3 не менее 30 раз (согласно методу Монте-Карло).

Шаг 5. Статистическая обработка накопленных результатов моделирования; определение оптимальных значений S_{ij}^* общих стоимостей потоков рассматриваемых ресурсов.

Шаг 6. В случае если на Шаге 5 оптимальные значения S_{ij}^* не определены, рекомендуется отбраковка данных в выборках накопленных значений S_{ij} и последующий возврат к шагам 2, 3, 5.

Шаг 7. Инициализация значений параметров ИМ вида S_{ij}^* с учётом результатов работы шага 5 указанной процедуры. Установка режима оптимизации ТП с учётом уточнённых общих стоимостей ресурсов S_{ij}^* : $is_Sr_St = True$.

Шаг 8. Запуск на выполнение эксперимента ИМ; построение последовательности оптимальных состояний ТП на этапах производства готовой продукции; построение последовательности оптимальных управлений ТП производства готовой продукции предприятия.

Шаг 9. Выгрузка результатов работы ИМ в КИС предприятия.

Замечание. Статистическая обработка накопленных результатов моделирования (**Шаг 5**) данных включает: определение и оценку вида распределения совокупности [6, 7, 8] (построение статистической модели распределения выборочных данных с использованием семейств универсальных распределений, особенность которых – возможность аппроксимации лишь одномодальных и U-образных распределений [8]). В том случае, если распределение симметрично и унимодально, для характеристики центральной тенденции S_{ij}^* применяется математическое ожидание; если не симметрично, но унимодально – структурные средние (мода, медиана). Если распределение многомодально, значение S_{ij}^* не определено, переход к **Шагу 6** процедуры.

4. Интеграция имитационной модели в корпоративную информационную систему предприятия

Разработанная имитационная модель интегрируется в корпоративную информационную систему (КИС) предприятия посредством применения комплекса программных и информационных средств (рис. 7) включающих [2]: MS Excel, систему имитации PowerSim, программно-технологический комплекс имитации (ПТКИ) сложных систем BelSim [9], имеющий средства статистической обработки данных, пакет STATISTICA.

Предлагается следующий алгоритм работы построенного комплекса (рисунок 6):

Шаг 1. Выгрузка необходимых данных из КИС предприятия в MS Excel.

Шаг 2. Инициализация переменных ИМ в PowerSim; запуск эксперимента.

Шаг 3. Выгрузка результатов моделирования из PowerSim в MS Excel.

Шаги 4, 6. Передача данных из MS Excel для анализа (отбраковка данных с использованием методов кластерного анализа, оценка вида распределения совокупности данных с использованием универсальных моделей распределений) в программно-технологический комплекс имитации сложных систем (ПТКИ) BelSim и в пакет STATISTICA.

Шаги 5, 7. Выгрузка результатов анализа данных в MS Excel.

Шаг 8. Сохранение полученных результатов в СУБД КИС предприятия.

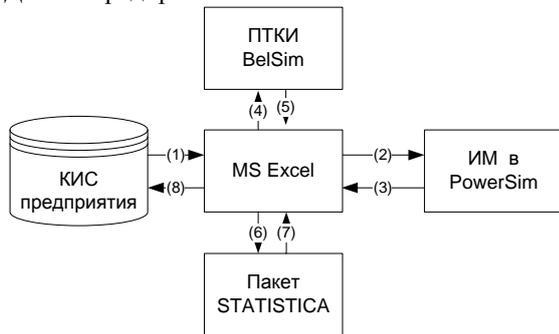


Рис.7. Интеграция имитационной модели в КИС предприятия

Некоторые шаги предложенного алгоритма могут пропускаться. Например, возможен упрощённый вариант работы комплекса, без использования анализа данных в ПТКИ BelSim и STATISTICA, включающий шаги (1)-(2)-(3)-(8).

Заключение

Разработана имитационная модель (ИМ) процесса производства (ПП) тканей, отличающаяся реализацией метода оптимизации ПП (с учётом введённых в рассмотрение лексикографически упорядоченных критериев оптимизации ПП и управляющих параметров ИМ) и уточнением нагрузок на дуги графа ПП, в общем случае имеющих стохастический характер, посредством применения метода Монте-Карло и статистического анализа (построение и анализ статистических моделей распределения многомодальных выборок нагрузок на

дуги графа), что позволяет программно реализовать метод оптимизации распределения ресурсов.

Итоги моделирования.

Случай 1) Применяемое в производстве сочетание ТР для ПП (<0-1-4-6-8-9-11-14-15-16>). Итоги по времени, общей стоимости ресурсов: $T = 7,50$ час; $S = 502$ руб.

Случай 2) Ниже приведены итоги оптимизации (время, общая стоимость ресурсов) и маршруты, согласно критерию оптимизации $S_{Xim} \rightarrow \min$, где S_{Xim} – стоимость химикатов ПП.

Маршруты:

<0-3-4-5-8-9-12-14-15> ,

<0-3-4-6-8-9-12-14-15> ,

<0-3-4-7-8-9-12-14-15> .

Итоговое оптимальное время для маршрутов: $T^* = 7,11$, $T^* = 7,51$, $T^* = 7,36$, соответственно; итоговая оптимальная стоимость ресурсов $S^* = 504$ руб., $S^* = 501$ руб., $S^* = 500$ руб., соответственно.

Таким образом, определяется экономический эффект оптимизации (при производстве 1000 м.п. рассматриваемой группы тканей) за счёт изменения стоимости ресурсов (соответственно увеличение на 2 руб., уменьшение на 1 руб. и 2 руб.) и уменьшения времени обработки ткани в среднем на 5 %, 0 %, 2 % (что соответствует $\Delta T = -0,39$ час) в ценах базового расчётного года.

Годовой экономический эффект при производстве 110242 м.п. для рассматриваемой группы тканей в ценах базового расчётного года составил порядка - 0 руб., 59 руб., 245руб., соответственно.

Случай 3) Ниже приведены оптимизации итоги (время, общая стоимость ресурсов) и маршруты, согласно критерию оптимизации $S_{EnRes} \rightarrow \min$, где S_{Xim} – стоимость энергоресурсов ПП.

Маршруты

<0-1-4-7-8-10-13-14-15> ,

<0-2-4-7-8-10-13-14-15> ,

<0-3-4-7-8-10-13-14-15> .

Итоговое оптимальное время для каждого из маршрутов: $T^* = 6,87$ час; итоговая оптимальная стоимость ресурсов $S^* = 434$ руб., $S^* = 433$ руб., $S^* = 434$ руб., соответственно.

Таким образом, экономический эффект оптимизации (при производстве 1000 м.п. рассматриваемой группы тканей) за счёт уменьшения стоимости расхода энергоресурсов в среднем на 14 % (что соответствует 68 руб.) и уменьшения времени в среднем на 8 % (что соответствует $\Delta T = -0,63$ час) в ценах базового расчётного года.

Годовой экономический эффект при производстве 110242 м.п. для рассматриваемой группы тканей в ценах базового расчётного года составил порядка 7473 руб., 7537 руб., 7522 руб., соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борчик, Е. М. Определение оптимального технологического процесса производства готовой ткани / Е. М. Борчик, А. И. Степанов, А. В. Доронкин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.], Могилев, 17–18 ноября 2011 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 208.
2. Аверченков В.И. Многокритериальное управление технологическим процессом с использованием принципа оптимальности Беллмана / В.И. Аверченков, А.И. Якимов, Е.М. Борчик // Известия Волгоградского государственного технического университета – 2014. – № 25(152). – С. 95–101.
3. Доронкин, А. В. Моделирование производственного процесса крашения готовых тканей набивным способом / А. В. Доронкин, Д. В. Трынкин; науч. рук.: А. И. Якимов // 48-я студенческая научно-техническая конференция Белорусско-Российского университета: материалы конф., редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]; 23-24 мая 2012 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 73.
4. Йенсен, П. Потокное программирование: пер. с англ. / П. Йенсен, Д. Барнес. – М.: Радио и связь, 1984. – 392 с.: ил.
5. Сидоренко, В. Н. Системно-динамическое моделирование в среде Powersim : справ. по интерфейсу и функциям / В. Н. Сидоренко. – М.: МАКС пресс, 2001. – 159 с.
6. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е.Гмурман. – М. : Высш. шк., 2003. – 478 с.
7. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
8. Кендалл, М. Теория распределений: пер. с англ. / М. Кендалл, А. Стюарт. – М.: Наука, 1966. – 588 с.
9. Якимов, А. И. Технология имитационного моделирования систем управления промышленных предприятий: монография / А. И. Якимов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 304 с.

AUTOMATION OF CALCULATION OF COST OF RESOURCES IN THE MANUFACTURING PROCESS OF FABRICS

Е.М. Borchik

JSC «Mogotex», Mogilev, Republic of Belarus

Abstract: The article presents a simulation model for the manufacturing process of fabric, built in imitation Powersim system, to automate the calculation of the cost of resources at the optimum combination of technological modes. The problem of determining the optimal combination of technological modes in the manufacturing process of a certain type of fabric under the criterion of minimizing the cost of resources and the time spent solved using streaming programming as a problem determining the shortest path or minimum resource consumption. Obtained a combination of technological modes with a minimum and maximum value of the cost of resources, as the best and the worst result of the use of existing equipment. The algorithm simulation model integration into a corporate enterprise information system through the use of complex software and information tools, including MSeXcel and PowerSim.

Keywords: threading model, simulation model, information system, resources.

REFERENCES

1. Borchik, E. M. *Opređenje optimal'nogo tekhnologičeskogo protsessa proizvodstva gotovoy tkani* [Determination of the optimal technological process of production of the finished fabric] / EM Borchik, AI Stepanov, AV Doronkin // New materials, equipment and technologies in the industry: Proceedings of the international scientific and engineering. Conf. young. scientists; the Editorial.: Igor Sazonov (Sec Ed.). [et al.], Mogilev, 17-18 November, 2011 - Mogilev: Belarus. Ros. University Press, 2011. - 208 pp.
2. Averchenkov, V. I. *Mnogokriterial'noe upravlenie tekhnologičeskim protsessom s ispol'zovaniem printsipa optimal'nosti Bellmana* [Multicriteria process control using the principle of Bellman] / VI optimality Averchenkov, AI Yakimov, EM Borchik // Proceedings of Volgograd State Technical University - 2014. - № 25 (152). - P. 95-101.
3. Doronkin, A. V. *Modelirovanie proizvodstvennogo protsessa krasheniya gotovykh tkaney nabivnym sposobom* [Modeling of the production process coloring finished fabric printed way] / A.V. Doronkin, D.V. Trynkin; scientific. Hand.: AI Yakimov // 48th Student Scientific and Technical Conference of the Belarusian-Russian University: Materials Conf, the Editorial.: Igor Sazonov (Sec Ed.). [et al.]. May 23-24, 2012 - Mogilev: Belarus. Ros. University Press, 2012. - P. 73.
4. Jensen, P. *Potokovoe programmirovaniye: per. s angl.* [The streaming programming: transl. from English.] / P. Jensen, D. Barnes. - M.: Radio and Communications, 1984. - 392 p.
5. Sidorenko, V.N. *Sistemno-dinamicheskoe modelirovanie v srede Powersim: sprav. po interfeysu i funktsiyam* [The system-dynamic modeling modeling in the Powersim: ref. the interface and functions] / V.N. Sidorenko. M.: MAKS Press, 2001. 159 p.

-
6. Gmurman, V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Probability theory and mathematical statistics: manual for high schools] / V. E. Gmurman. – M.: High School, 2003. – 478 p.
 7. Bolshev, L. N. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Tables of mathematical statistics] / L. N. Bolshev, N. V. Smirnov. – M.: Science, 1983. – 416 p.
 8. Kendall, M. *Teoriya raspredeleniy: per. s angl* [Distribution theory: translation from English] / M. Kendall, J. Stewart. – M.: Science, 1966. – 588 p.
 9. Yakimov, A. I. *Tekhnologiya imitatsionnogo modelirovaniya sistem upravleniya promyshlennykh predpriyatiy: monografiya* [The simulation technology industrial control systems: monograph] / A. I. Yakimov. – Mogilev: Belarus.-Rus. Univ., 2010. – 304 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ В ШАРНИРАХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКОВ

О.Н. Крахмалев¹, Г.Н. Крахмалев²

^{1,2} ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск, Россия

¹olegkr64@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена методика моделирования линейных отклонений в шарнирах промышленных роботов и многокоординатных станков. Методика основана на использовании уравнений движения. Уравнения описывают кинематические структуры с шарнирами, имеющими четыре степени свободы, и имеют матричный вид. Использование предложенных уравнений позволяет повысить эффективность вычислений, так как уменьшает количество операций с тождественно равными нулю элементами. Применение методики моделирования рассмотрено на примере манипуляционной системы, содержащей одно звено, соединённое с неподвижным основанием шарниром. Шарнир имеет две степени свободы. Одна степень свободы основная – вращательная, другая степень свободы дополнительная – поступательная.

Ключевые слова: промышленные роботы; многокоординатные станки; манипуляционные системы; отклонения в шарнирах; моделирование движения.

Введение

При разработке систем управления движением промышленных роботов и многокоординатных станков возникает потребность в методиках моделирования, позволяющих эффективно учитывать влияние разного рода отклонений, возникающих в шарнирах исполнительных механизмов. Исполнительные механизмы промышленных роботов и многокоординатных станков представляют собой многозвенные пространственные структуры. Как правило, звенья последовательно соединяются друг с другом шарнирами, имеющими одну степень свободы, образуя разомкнутую кинематическую цепь. Такие кинематические структуры принято называть манипуляционными системами [1].

Отклонения в шарнирах манипуляционных систем могут быть вызваны различными причинами. Отклонения, возникающие из-за неточности изготовления деталей и их последующей сборки, относят к первичным геометрическим отклонениям. При эксплуатации механизмов первичные геометрические отклонения усугубляются и дополняются из-за износа и повреждения деталей, а также изменения температуры. Такого рода отклонения могут быть определены метрологическим путём и скомпенсированы специальными методами коррекции [2, 3].

Отклонения в шарнирах манипуляционных роботов и многокоординатных станков, возникающие в процессе выполнения ими движения, представляют собой, как правило, малые упругие деформации, приводящие к смещению центров шарниров относительно их недеформированных положений. Наличие зазоров в шарнирах также приводит к возникновению отклонений. Будем считать, что жёсткость звеньев и шарниров на кручение существенно выше жёсткости на их растяжение и сжатие. Исходя из этого допущения, угловые отклонения, являющиеся следствием изменения формы звеньев и шарниров, могут быть исключены из рассмотрения при построении расчётной динамической модели манипуляционных систем.

Динамическая модель

Моделирование динамики манипуляционных систем с учетом линейных отклонений возникающих в шарнирах возможно на основе математической модели [3]:

$$\begin{aligned} & [M_i^{qq}]\{\ddot{q}\} + [M_i^{qx}]\{\ddot{x}\} + [M_i^{qy}]\{\ddot{y}\} + [M_i^{qz}]\{\ddot{z}\} + \\ & + \{\dot{q}\}^T [C_i^{qqq}]\{\dot{q}\} + 2(\{\dot{q}\}^T [C_i^{qqx}]\{\dot{x}\} + \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & + \{\dot{q}\}^T [C_i^{qqy}]\{\dot{y}\} + \{\dot{q}\}^T [C_i^{qqz}]\{\dot{z}\}) = Q_i^q, \\ & [M_i^{xq}]\{\ddot{q}\} + [M_i^{xx}]\{\ddot{x}\} + [M_i^{xy}]\{\ddot{y}\} + [M_i^{xz}]\{\ddot{z}\} + \\ & + \{\dot{q}\}^T [C_i^{xqq}]\{\dot{q}\} + 2(\{\dot{q}\}^T [C_i^{xqx}]\{\dot{x}\} + \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & + \{\dot{q}\}^T [C_i^{xqy}]\{\dot{y}\} + \{\dot{q}\}^T [C_i^{xqz}]\{\dot{z}\}) = Q_i^x \\ & [M_i^{yq}]\{\ddot{q}\} + [M_i^{yx}]\{\ddot{x}\} + [M_i^{yy}]\{\ddot{y}\} + [M_i^{yz}]\{\ddot{z}\} + \\ & + \{\dot{q}\}^T [C_i^{yqq}]\{\dot{q}\} + 2(\{\dot{q}\}^T [C_i^{yqx}]\{\dot{x}\} + \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & + \{\dot{q}\}^T [C_i^{yqy}]\{\dot{y}\} + \{\dot{q}\}^T [C_i^{yqz}]\{\dot{z}\}) = Q_i^y \\ & [M_i^{zq}]\{\ddot{q}\} + [M_i^{zx}]\{\ddot{x}\} + [M_i^{zy}]\{\ddot{y}\} + [M_i^{zz}]\{\ddot{z}\} + \\ & + \{\dot{q}\}^T [C_i^{zqq}]\{\dot{q}\} + 2(\{\dot{q}\}^T [C_i^{zqx}]\{\dot{x}\} + \end{aligned} \quad (4)$$

$$+ \{\dot{q}\}^T [C_i^{zqy}]\{\dot{y}\} + \{\dot{q}\}^T [C_i^{zqz}]\{\dot{z}\}) = Q_i^z.$$

В уравнениях (1–4) матрицы и векторы, имеющие размерность, определяемую степенью свободы системы (n), обозначаются соответственно в квадратных и фигурных скобках. Векторы $\{\dot{q}\}, \{\ddot{q}\}$ ($n \times 1$) содержат соответственно скорости и ускорения основных обобщённых координат q_i , $i=(1, \dots, n)$, определяемых функциональным назначением шарниров. Основные обобщённые координаты могут быть вращательными или

поступательными.

Векторы $\{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\}, \{\dot{y}\}, \{\ddot{y}\}, \{\dot{z}\}, \{\ddot{z}\}$ ($n \times 1$) содержат скорости и ускорения дополнительных обобщённых координат (x_i, y_i, z_i) , отражающих возможные смещения центра i -го шарнира относительно опорного для него звена. Опорным считается звено соединяющее шарнир по кинематической цепи с неподвижным основанием.

$$[M_i^{vw}] = \sum_{k=1}^n \left[\text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial w_1} \right) \quad \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial w_2} \right) \quad \dots \quad \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial w_n} \right) \right]; \quad (5)$$

$$[C_i^{vqw}] = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_1 \partial w_1} \right) & \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_1 \partial w_2} \right) & \dots & \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_1 \partial w_n} \right) \\ \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_2 \partial w_1} \right) & \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_2 \partial w_2} \right) & \dots & \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_2 \partial w_n} \right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_n \partial w_1} \right) & \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_n \partial w_2} \right) & \dots & \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial v_i} H_k \frac{\partial^2 A_{0,k}^T}{\partial q_n \partial w_n} \right) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Так, например, в обозначении матриц $[M_i^{vw}]$ ($1 \times n$) для матрицы $[M_i^{qq}]$ оба символа v и w соответствуют q , для матрицы $[M_i^{qx}]$ символ v соответствует q , а символ w соответствует x , для матрицы $[M_i^{yz}]$ соответственно $v - y$, а $w - z$ и т.д. В обозначении матриц $[C_i^{vqw}]$ ($n \times n$) для матрицы $[C_i^{qqq}]$ оба символа v и w соответствуют q , для матрицы $[C_i^{xqy}]$ символ v соответствует x , а символ w соответствует y , для матрицы $[C_i^{yqz}]$ соответственно $v - y$, а $w - z$ и т.д.

При вычислении элементов рассмотренных матриц используются матрицы преобразования однородных координат $A_{0,k}$ (4×4), позволяющие преобразовать локальные координаты произвольной точки k -го звена в абсолютные. H_k матрицы (4×4) инерции звеньев, $i=(1, \dots, n)$ [1].

Методика моделирования

Применение методики моделирования линейных отклонений (смещений) в шарнирах манипуляционных роботов и многокоординатных станков, основанной на предложенной динамической модели, рассмотрим на примере манипуляционной системы содержащей одно звено, соединённое с неподвижным основанием вращательным шарниром (рис. 1). Исследуемая манипуляционная система имеет две степени свободы, одна основная вращательная – q_1 , соответствующая функциональной подвижности шарнира, вторая дополнительная линейная – x_1 , обусловленная упругой податливостью шарнира по оси X_0 . Звено представляет собой стержень длиной l_1 и массой m_1 . Активными силами, действующими на звено, являются вращающий момент D_1 , разви-

Дополнительные обобщённые координаты в данной модели являются поступательными. В правой части уравнений представлены обобщенные силы по соответствующим им обобщенным координатам.

Матричные коэффициенты представленных уравнений могут быть рассмотрены в развёрнутом виде. Символы v и w использованы для условного обозначения индексов соответствующих обобщённым координатам x, y, z и q :

ваемый приводом, вес звена $G_1 = m_1 g$ ($g = 9.81 \text{ м/с}^2$) и сила упругости $P_1 = -a_1 x_1$, возникающая в шарнире при его деформации в направлении оси X_0 . Соответственно $a_1 -$ жесткость шарнира по данному направлению.

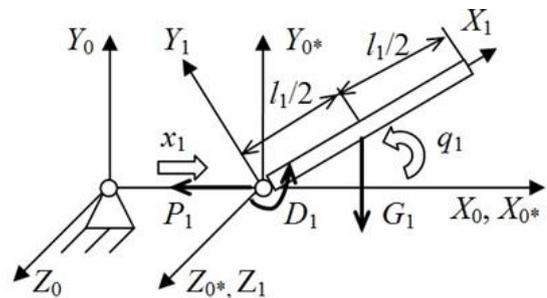


Рис. 1. Пример моделирования линейного отклонения по оси X_0

Уравнения движения соответствующие уравнениям (1) и (2) для рассматриваемой манипуляционной системы будут иметь вид:

$$[M_1^{qq}] \ddot{q}_1 + [M_1^{qx}] \ddot{x}_1 + [C_1^{qqq}] \dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 [C_1^{qqx}] \dot{x}_1 = Q_1^q, \quad (7)$$

$$[M_1^{xq}] \ddot{q}_1 + [M_1^{xx}] \ddot{x}_1 + [C_1^{xqq}] \dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 [C_1^{xqx}] \dot{x}_1 = Q_1^x \quad (8)$$

Матричные коэффициенты в полученных уравнениях в соответствии с (5) и (6) сводятся к скалярному виду:

$$[M_1^{qq}] = \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial q_1} H_1 \frac{\partial A_{0,1}^T}{\partial q_1} \right), [M_1^{qx}] = \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial q_1} H_1 \frac{\partial A_{0,1}^T}{\partial x_1} \right),$$

$$[M_1^{xq}] = \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial x_1} H_1 \frac{\partial A_{0,1}^T}{\partial q_1} \right), [M_1^{xx}] = \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial x_1} H_1 \frac{\partial A_{0,1}^T}{\partial x_1} \right),$$

$$\begin{aligned} [C_1^{qqq}] &= \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial q_1} H_1 \frac{\partial^2 A_{0,1}^T}{\partial q_1^2} \right), \\ [C_1^{qqx}] &= \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial q_1} H_1 \frac{\partial^2 A_{0,1}^T}{\partial q_1 \partial x_1} \right), \\ [C_1^{xqq}] &= \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial q_1} H_1 \frac{\partial^2 A_{0,1}^T}{\partial q_1^2} \right), \\ [C_1^{xqx}] &= \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,1}}{\partial x_1} H_1 \frac{\partial^2 A_{0,1}^T}{\partial q_1 \partial x_1} \right). \end{aligned}$$

Матрицы преобразования однородных координат и их частные производные:

$$\begin{aligned} A_{0,0^*} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_{0^*,1} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ A_{0,1} &= A_{0,0^*} A_{0^*,1} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & x_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \frac{\partial A_{0,1}}{\partial x_1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial A_{0,1}}{\partial q_1} = \begin{bmatrix} -\sin q_1 & -\cos q_1 & 0 & 0 \\ \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \frac{\partial^2 A_{0,1}}{\partial q_1^2} &= \begin{bmatrix} -\cos q_1 & \sin q_1 & 0 & 0 \\ -\sin q_1 & -\cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial^2 A_{0,1}}{\partial q_1 \partial x_1} = 0. \end{aligned}$$

Матрица инерции звена относительно системы координат $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$, в соответствии с правилом преобразования матриц инерции [3], будет иметь вид:

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{m_1 l_1^2}{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ l_1/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m_1 l_1^2}{3} & 0 & 0 & \frac{m_1 l_1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{m_1 l_1}{2} & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix}$$

Используя полученные матрицы в выражениях для соответствующих матричных коэффициентов получим:

$$\begin{aligned} [M_1^{qq}] &= \frac{m_1 l_1^2}{3}, \quad [M_1^{qx}] = -\frac{m_1 l_1}{2} \sin q_1, \quad [M_1^{xq}] = -\frac{m_1 l_1}{2} \sin q_1, \\ [M_1^{xx}] &= m_1, \quad [C_1^{qqq}] = 0, \quad [C_1^{qqx}] = 0, \quad [C_1^{xqx}] = 0, \\ [C_1^{xqq}] &= -\frac{m_1 l_1}{2} \cos q_1. \end{aligned}$$

Подставив полученные выражения для матричных коэффициентов в уравнения (7–8) и определив соответствующие обобщенные силы в соответствии с методикой, описанной в работе [3], составим систему дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{m_1 l_1^2}{3} \ddot{q}_1 - \frac{m_1 l_1 \sin q_1}{2} \ddot{x}_1 = D_1 - \frac{1}{2} l_1 m_1 g \sin q_1, \\ -\frac{m_1 l_1 \sin q_1}{2} \ddot{q}_1 + m_1 \ddot{x}_1 - \frac{m_1 l_1 \cos q_1}{2} \dot{q}_1^2 = -a_1 x_1. \end{cases} \quad (9)$$

Составленная на основе уравнений (1–4) система уравнений движения исследуемой манипуляционной системы, рассматриваемой как твёрдое тело, совершающее одновременно поступательное и вращательное движения (рис. 1), может быть получена также и другими известными методами теоретической механики. Для проверки адекватности модели используем, например, метод, основанный на уравнении Лагранжа второго рода.

Адекватность модели

Рассмотрим расчётную схему, составленную для твёрдого тела, совершающего одновременно поступательное и вращательное движения (рис. 2).

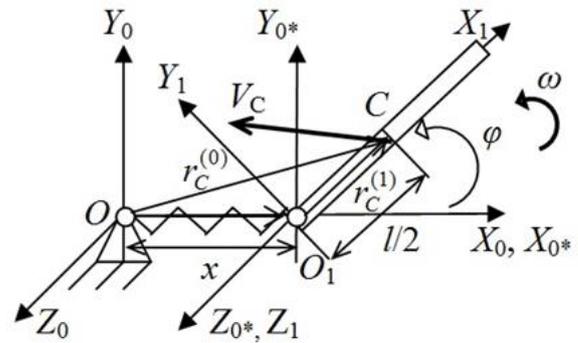


Рис.2. Расчётная схема, составленная для твёрдого тела, совершающего одновременно поступательное и вращательное движения

Тело представляет собой стержень длиной l и массой m . С телом свяжем две системы координат $S_{0^*}(X_{0^*}, Y_{0^*}, Z_{0^*})$ и $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$ с общим началом в точке O_1 . Система координат S_{0^*} движется относительно неподвижной системы координат S_0 поступательно вдоль оси X_0 . Обе системы координат совпадают, когда координата точки O_1 $x = 0$. Система координат S_1 совершает вместе с телом вращательное движение вокруг оси Z_1 , совпадающей с осью Z_{0^*} .

Кинетическая энергия тела при плоском движении может быть представлена выражением:

$$E = \frac{m V_C^2}{2} + \frac{J_C \omega^2}{2}, \quad (10)$$

где V_C – скорость центра тяжести тела в неподвижной системе координат S_0 , J_C – момент инерции тела относительно оси параллельной Z_1 и проходящей через точку C – центр тяжести тела, ω – угловая скорость вращения тела.

Радиус-вектор точки C в системе координат S_0 может быть выражен через координаты точки C в системе координат S_1 .

$$r_C^{(0)} = A_{0,1} r_C^{(1)}, \quad r_C^{(1)} = [l/2 \ 0 \ 0 \ 1]^T. \quad (11)$$

В развёрнутом виде выражение (11) имеет вид:

$$r_c^{(0)} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & x \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{l}{2} \\ \frac{l}{2} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l}{2} \cos \varphi + x \\ \frac{l}{2} \sin \varphi \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Скорость центра тяжести тела V_C будет иметь вид:

$$V_C = \frac{dr_c^{(0)}}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{l}{2} \dot{\varphi} \sin \varphi + \dot{x} \\ \frac{l}{2} \dot{\varphi} \cos \varphi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

На основе (13) можно определить квадрат скорости:

$$V_C^2 = \dot{x}^2 - l\dot{\varphi} \sin \varphi + \frac{l^2 \dot{\varphi}^2}{4}. \quad (14)$$

Момент инерции тела и угловую скорость представим выражениями:

$$J_C = \frac{ml^2}{12}, \quad \omega = \dot{\varphi}. \quad (15)$$

Подставим (14) и (15) в (10), получим:

$$E = \frac{m}{2} \dot{x}^2 - \frac{m}{2} l\dot{\varphi} \sin \varphi + \frac{m}{2} l^2 \dot{\varphi}^2. \quad (16)$$

Выражение для кинетической энергии тела (16) подставим в уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{s}_i} \right) - \frac{\partial E}{\partial s_i} = Q_i \quad (i=1,2), \quad (17)$$

где $s_1=x$, $s_2=\varphi$, $Q_1=Q^x$, $Q_2=Q^\varphi$.

Получим систему уравнений движения:

$$\begin{cases} m\ddot{x} - \frac{m}{2} l\ddot{\varphi} \sin \varphi - \frac{m}{2} l\dot{\varphi}^2 \cos \varphi = Q^x, \\ \frac{ml^2}{3} \ddot{\varphi} - \frac{m}{2} l\ddot{x} \sin \varphi = Q^\varphi. \end{cases} \quad (18)$$

Обобщённые силы, составляющие правую часть уравнений движения, определим из выражения элементарной работы внешних сил, приложенных к телу (см. рис. 2), с учётом замены: $P_1=-ax$ – сила упругости, $G_1=mg$ ($g=9.81$ м/с²) – сила тяжести (вес), $D_1=M$ – момент внешних сил.

$$\delta W = Q^x \delta x + Q^\varphi \delta \varphi = -ax \delta x + M \delta \varphi - \frac{lmg \cos \varphi}{2} \delta \varphi,$$

следовательно,

$$Q^x = -ax, \quad Q^\varphi = M - \frac{l}{2} mg \cos \varphi. \quad (19)$$

Нетрудно видеть, что система уравнений (18) и (19) совпадает с полученной ранее системой уравнений движения манипуляционной системы (9), содержащей одно звено, соединённое с неподвижным основанием вращательным шарниром.

Заключение

Рассмотрена методика моделирования линейных отклонений в шарнирах манипуляционных систем промышленных роботов и многокоординатных станков. Методика основана на уравнениях движения составленных для кинематических структур манипуляционных систем построенных на основе шарниров, реализующих до 4 степеней свободы. Уравнения имеют матричную структуру, позволяющую повысить вычислительную эффективность алгоритма, реализующего данную методику. Применение методики моделирования рассмотрено на примере манипуляционной системы, содержащей одно звено, соединённое с неподвижным основанием шарниром, реализующим две степени свободы основную – вращательную и дополнительную – поступательную.

Методика формирования матриц (5–6) детально отражена в монографии [3]. Там же представлен анализ данных матриц, рассмотрены дополнительные случаи обращения в ноль их элементов. Учёт этих дополнительных случаев в вычислительном алгоритме позволяет ещё больше повысить его эффективность.

Вопросы моделирования манипуляционных систем, близкие к рассмотренным в данной статье, освещены в работах [5–8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Корендясев, А.И. Теоретические основы робототехники: в 2 кн. /А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И.Тывес. –М.: Наука, 2006. – Кн.1.–383 с.
2. Серков, Н.А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 304 с.
3. Крахмалев, О.Н. Точность управляемого движения промышленных роботов и многокоординатных станков: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ, 2015. – 236 с.
4. Крахмалев, О.Н. Моделирование обобщенных сил, действующих на звенья манипуляционных систем / О.Н. Крахмалев, А.П. Болдырев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. –№1. –С.115–121.
5. Погорелов, Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел / Погорелов Д.Ю. – Брянск: БГТУ, 1997. – 153 с.
6. Вукобратович, М. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами/ М. Вукобратович, Д. Стокич, Н. Кирчански – М.: Мир, 1989. – 376 с.
7. Черноусько, Ф.Л. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
8. Krakhmalev, O. N. Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges / O. N. Krakhmalev, L. I. Bleyshmidt // Allerton Press, Inc., New York, USA: Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43. –No. 1.– pp. 22–28.

MODELING DEVIATIONS IN HINGES MANIPULATION SYSTEMS INDUSTRIAL ROBOTS AND MULTI-AXIS MACHINE TOOLS

O.N. Krakhmalev¹, G.N. Krakhmalev²

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract. The method of simulation of linear deviation in the joints of industrial robots and multi-axis machine tools. The technique is based on the use of equations of motion. Kinematic equations describe the structure with hinges of having four degrees of freedom. Equations have a matrix structure. The structure of the equations can improve the computational efficiency of the algorithm. The algorithm for calculating the excluded items are identically equal to zero. Application method considered for simulation example manipulation system comprising a single link. The link is connected to a fixed hinge base. The hinge has two degrees of freedom. One degree of freedom is the main - rotational. Other additional degree of freedom - translational.

Keywords: industrial robots; multi-axis machine tools; handling systems; deviation in hinges; motion simulation.

REFERENCES

1. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. Teoreticheskie osnovy robototekhniki: v 2 kn. [Theoretical Foundations of Robotics, in 2 books], Moscow, Nauka, 2006, book 2, 383 p.
2. Serkov N.A. Tochnost' mnogokoordinatnykh mashin s ChPU: Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy. [Precision multi-axis CNC machines: Theoretical and experimental bases] Moscow, LENAND, 2015, 304 p.
3. Krakhmalev O.N. Tochnost' upravlyаемого dvizheniya promyshlennykh robotov i mno-gokoordinatnykh stankov: monografiya. [Precision controlled motion of industrial robots and multi-axis machines: monograph], Bryansk, BGTU, 2015, 236 p.
4. Krakhmalev O.N., Boldyrev A.P. Modelirovanie obobshchennykh sil, deystvuyushchikh na zven'ya manipulyatsionnykh system. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. [Herald Bryansk State Technical University], 2011, no. 1, pp. 115–121.
5. Pogorelov D.Yu. Vvedenie v modelirovanie dinamiki sistem tel. [Introduction to the modeling of the dynamics of multibody systems], Bryansk, BGTU, 1997, 153 p.
6. Vukobratovich M., Stokich N., Kirchanski N. Ne-adaptivnoe i adaptivnoe upravlenie manipulyatsionnymi robotami. [Non-adaptive and adaptive control of manipulator robots], Moscow, Mir, 1989, 376 p.
7. Chernous'ko F.L., Bolotnik N.N., Gradetskiy V.G. Manipulyatsionnye roboty: dinamika, upravlenie, optimizatsiya. [Manipulation Robots: dynamics, control, optimization], Moscow, Nauka, 1989, 368 p.
8. Krakhmalev, O. N. Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, Allerton Press, Inc., New York, USA, 2014, Vol. 43, no. 1, pp. 22–28.

МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПАРТИИ ПРЕДМЕТОВ ТРУДА

О.М.Пигнастый¹, В.Д.Ходусов²

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г.Харьков

²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г.Харьков

¹rom7@bk.ru

Аннотация. В статье обсуждается построение модели производственной поточной линии с учетом ограничений на технологическую траекторию движения предметов труда. Рассмотрено влияние на траекторию движения предмета труда производственного фактора, связанного с ограничением максимальной емкости межоперационных накопителей. Проанализировано ограничение, связанное с последовательным порядком обработки предметов труда. Построено уравнение для нормативной технологической траектории с учетом названных ограничений на траекторию движения предметов труда, которое может быть использовано для замыкания балансовых уравнений PDE-моделей производственных поточных линий.

Ключевые слова: уравнение Эйлера, производственная линия, массовое производство, незавершенное производство, формализм Лагранжа, технологическая траектория, поточная линия, PDE-модель.

Введение

Регулярные изменения номенклатуры выпускаемой продукции обуславливает потребность предприятий в проектировании эффективных систем управления производством, основанных на современных экономико-математических моделях описания производственных явлений [1–4]. Современные условия функционирования промышленного предприятия в условиях неопределенности требует применение новых, высокоэффективных способов и методов управления хозяйственной деятельностью [1–6]. Важное место среди моделей производственных поточных линий занимают потоковые модели [7–12]. Особым классом среди потоковых моделей выделены модели поточных производственных линий с использованием уравнений в частных производных (PDE-моделей) [6]. Одним из способов, который дает возможность замкнуть систему балансовых уравнений PDE-модели, является подход, использующий усредненное уравнение движения предметов труда по технологическому маршруту. Движение предмета труда по технологическому маршруту осуществляется при наличии различных технологических ограничений. В качестве одного из типов ограничений выступает ограничение на емкость межоперационных накопителей. Предмет труда, прошедший технологическую обработку, перемещается в

межоперационный накопитель (рис.1). Переполнение межоперационного накопителя приводит к остановке производственного процесса [13-16]. Межоперационный накопитель выступает буфером, который сглаживает неритмичность и асинхронность в производительности технологического оборудования [17-21]. Другим ограничением на траекторию движения предмета труда является то, что обработка предмета труда не может быть начата, пока не закончена обработка предмета труда, следовавшего по технологическому маршруту перед ним [22,23]. Ожидая в очереди на технологическую обработку, предмет труда находится в межоперационном накопителе. Это приводит к тому, что технологические траектории предметов труда не пересекаются. Технологическая траектория предмета труда выступает ограничением для траектории предмета труда, следующего за ним.

Целью исследования является построение моделей поточных производственных линий с учетом ограничений, накладываемых производственной системой на траектории движения предметов труда.

Актуальность работы заключается в построении формализованного описания производственной системы в форме Лагранжа и непосредственно в выводе уравнения движения предметов труда по нормативной технологической траектории с учетом ограничений, вызванных взаимодействием предметов труда между



Рис.1. Структура поточной технологической линии

собой и с технологическим оборудованием. Уравнение движение предметов труда используется для замыкания балансовых уравнений PDE-моделей. Точность его построения в значительной степени оказывает влияние на точность PDE-модели производственной поточной линии [20,21,24]. Этим обстоятельством обусловлена актуальность исследования, проведенного в данной работе.

Постановка задачи

На поточной линии (рис.1) требуется изготовить партию однотипных деталей в количестве N штук. Поточная линия включает m технологических позиций, на каждой из которой выполняется m -ая технологическая операция ($m = 1..M$). Каждая позиция, начиная со второй, содержит накопитель, обрабатывающий модуль и средства перемещения деталей между позициями (рис.1). Для описания работы поточной линии используем обозначения $\Delta S_{m, \psi}$ (руб.) - стоимость ресурсов, перенесенных обрабатывающим модулем в результате выполнения операции; $\Delta \tau_m$ (час) – эффективное время обработки предмета труда на m -ой операции [1]. Общая стоимость ресурсов, перенесенных обрабатывающими модулями на предмет труда после выполнения m -ой операции, вычисляется как сумма затрат по технологическим операциям:

$$S_{m, \psi} = \sum_{k=1}^m \Delta S_{k, \psi} \text{ (руб.)}$$

Нормативный темп обработки предметов труда на m -ом модуле $[\chi]_{1m, \psi} = 1 / \Delta \tau_m$, (шт./час). Для свободной поточной линии характеристикой отдельного участка является темп совместной обработки $[\chi]_{1m, \psi}$, который представляет собой темп выхода предметов труда с m -ого модуля поточной линии $[\chi]_{1m, \psi} = \min \{ [\chi]_{1k, \psi}, k = 1, m \}$, (шт./час). Полагаем, что технологические режимы обработки предмета труда заданы и постоянны в течение периода производственного цикла обработки партии

изделий. Состояние предмета труда будем характеризовать координатами фазового технологического пространства (S, μ) [6].

Значения параметров состояния и местонахождения j -ого предмета труда в момент времени t будем определять через стоимости $S_j(t)$ (руб.) перенесенных на него технологических ресурсов и интенсивность переноса технологических ресурсов $\mu_j(t)$ (руб./час). Закон переноса ресурсов при выполнении операции определяется особенностями технологического режима обработки [25]. На рис.2 представлен график функции $\Delta S_{\psi}(t)$, характеризующей перенос ресурсов на предмет труда в результате выполнения операции для разных видов процесса обработки. Левый график (рис.2,а) определяется тем, что за время $N_m \cdot \Delta \tau_m$ пребывания N_m предметов труда в накопителе перед m -ым технологическим модулем на них не переносится стоимость ресурсов. К таким операциям следует отнести операции механической обработки, сборочные операции.

Второй вид операций определяется тем, что за время нахождения предметов труда в накопителе на них переносится стоимость ресурсов (правый график, рис. 2,б).

Рассмотрим движения предмета труда по технологическому маршруту, объединяющие операции, при выполнении которых перенос ресурсов происходит непосредственно во время обработки предмета труда. Будем полагать, что в случае, когда деталь находится в накопителе, увеличение ее стоимости не происходит. После окончания технологической обработки предмета труда на m -ом технологическом модуле его стоимость возрастает на величину $\Delta S_{m, \psi}$. Длительность перемещения предмета труда из накопителя на технологическую позицию много меньше длительности выполнения операции. Траектория движения предмета труда по

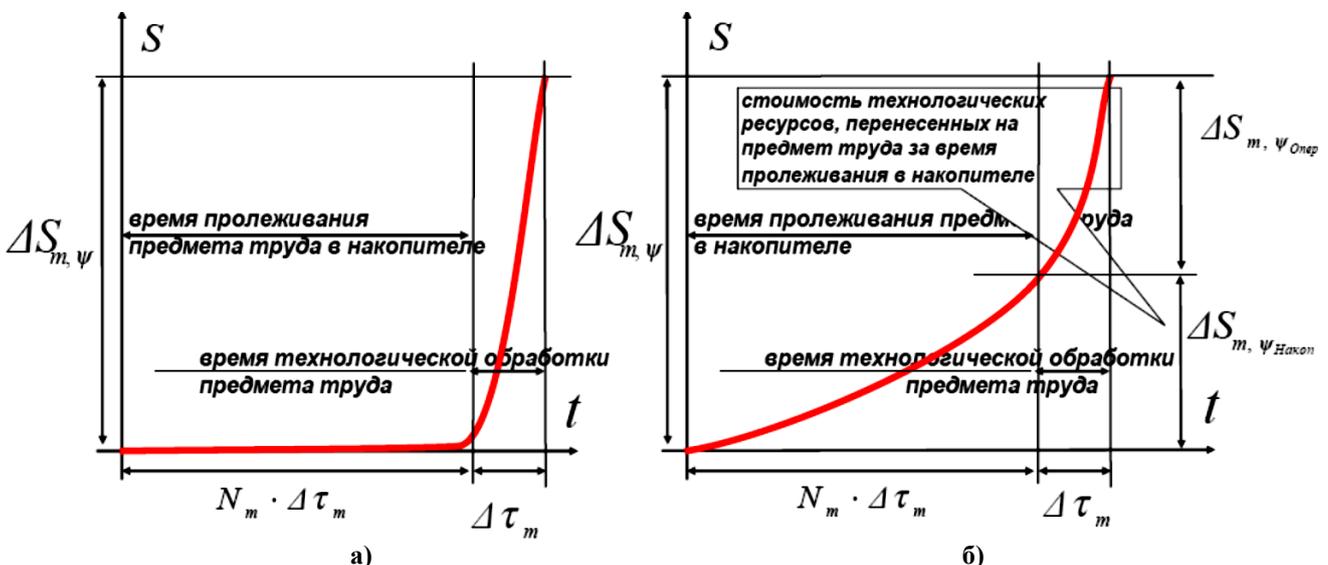


Рис.2. Перенос технологических ресурсов на предмет труда

технологическому маршруту для свободной (незанятой) поточной линии определяется уравнением Эйлера:

$$\frac{d\mu}{dt} = \mu_{\psi}(S) \frac{\partial \mu_{\psi}(S)}{\partial S}, \quad \frac{dS}{dt} = \mu. \quad (1)$$

Уравнение (1) допускает решение в аналитическом виде для некоторых функций $\mu_{\psi}(S)$. Для функции вида $\mu_{\psi}(S) = \sqrt{2 \cdot S}$ уравнение траектории движения предмета труда определяется квадратичной функцией $S(t) = \frac{1}{2} \cdot t^2$, для функции вида $\mu_{\psi}(S) = 1$ -линейной функцией $S(t) = t$. Рассмотрим движение партии из 5-ти деталей по маршруту из 8-ми операций, каждая из которых характеризуется значениями $\Delta S_{m,\psi}$ и $\Delta \tau_m$ (табл.1). Предполагается, что время обработки для m -ой операции детерминировано.

Обработка партии предметов труда на свободной поточной линии

Технологическая траектория первого предмета труда, движущегося по свободной поточной линии с нормативным темпом $[\chi]_{m,\psi} = 1 / \Delta \tau_m$ (шт./час) (рис.3), удовлетворяет уравнению (1), представлена на рис.4. При построении технологической траектории функция $\mu_{m,\psi} = \mu_{m,\psi}(S_{m,\psi})$ (табл.1) аппроксимирована непрерывной гладкой функцией $\mu_{\psi}(S)$. Характерные точки технологической траектории первого предмета труда

для свободной поточной линии определены целочисленными координатами $(S_{m,\psi}, \tau_m)$: $A_1(0,0)$; $B_1(1,2)$; $C_1(6,3)$; $D_1(7,6)$; $G_1(15,8)$; $E_1(16,17)$; $K_1(30,24)$; $H_1(32,28)$; $Q_1(41,30)$ (рис.4, рис.5). Буквы, за исключением $A_1(0,0)$, соответствуют координатам окончания m -ой операции. Индекс внизу указывает о том, к какому предмету труда принадлежит траектория. Если после окончания $(m-1)$ -ой операции предмет труда пролежит в накопителе перед m -ой операцией, то характерную точку начала обработки предмета труда на m -ой операции будем обозначать прописными буквами. Отрезок, соединяющий точки $C_5(6,11)$ и $C_5(6,15)$, является участком траектории, на котором 5-й предмет труда находится в ожидании обработки (рис.6). Аналогичным является участок технологической траектории, соединяющий точки $G_5(15,18)$ и $g_5(15,44)$ (рис.6).

Если движение первого предмета труда по свободной поточной линии описывается уравнением (1), то движение второго и последующих предметов труда ограничено состоянием обработки предыдущих. Первое ограничение заключается в том, что приступить к обработке j -ого предмета труда на m -ой операции возможно только после окончания обработки $(j-1)$ -ого предмета труда. В произвольный момент времени t_1 для двух точек $S_{j-1}(t_1)$ и $S_j(t_1)$ траекторий, следующих друг за другом предметов труда (рис.5) справедливо соотношение

$$S_{j-1}(t) = S_j(t) + S_{12}(S_j). \quad (2)$$

Таблица 1

Параметры технологических операций

Номер операции	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	7-я	8-я
$\Delta S_{m,\psi}$, руб.	1	5	1	8	1	14	2	9
$\Delta \tau_m$, час	2	1	3	2	9	7	4	2
$S_{m,\psi} = \sum_{k=1}^m \Delta S_{k,\psi}$, руб.	1	6	7	15	16	30	32	41
$\tau_m = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_k$, руб.	2	3	6	8	17	24	28	30
$[\chi]_{m,\psi} = 1 / \Delta \tau_m$, (шт./час)	0,5	1	0,33	0,5	0,11	0,14	0,25	0,5
$[\chi]_{m,\psi} = \min \{ [\chi]_{k,\psi}, k = 1, m \}$, (шт./час)	0,5	0,5	0,33	0,33	0,11	0,11	0,11	0,11
$\mu_{m,\psi} = \Delta S_{m,\psi} / \Delta \tau_m$, (руб./час)	0,5	5	0,33	4	0,11	2	0,5	4,5
Емкость входного накопителя, $N_{m,\psi \text{ Max}}$, шт.	10	3	5	7	8	8	8	8

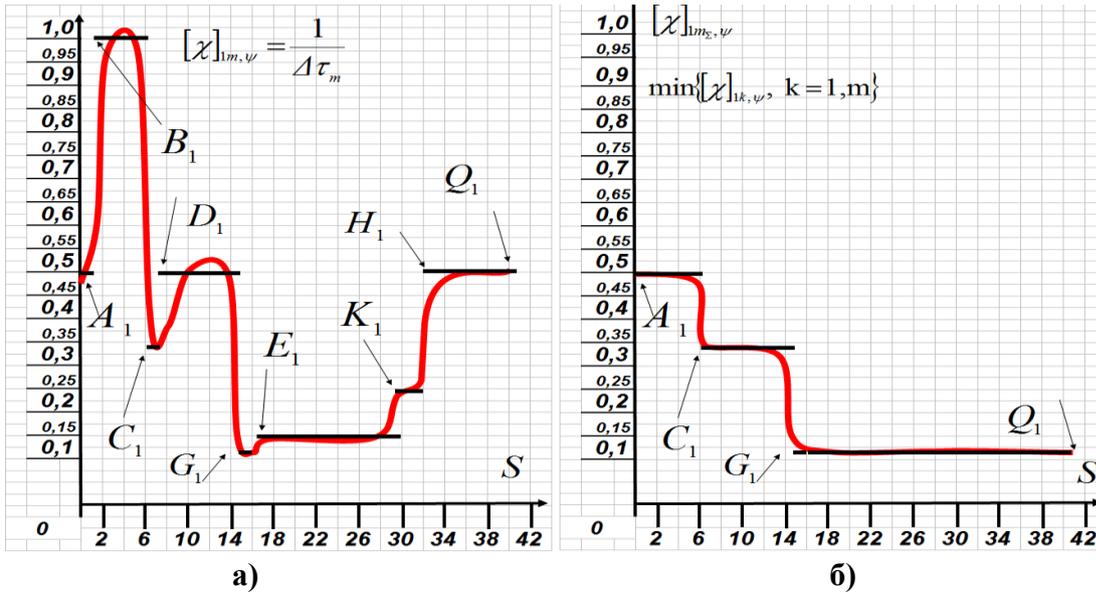


Рис.3. Темп обработки партии: а–нормативный; б–совместной

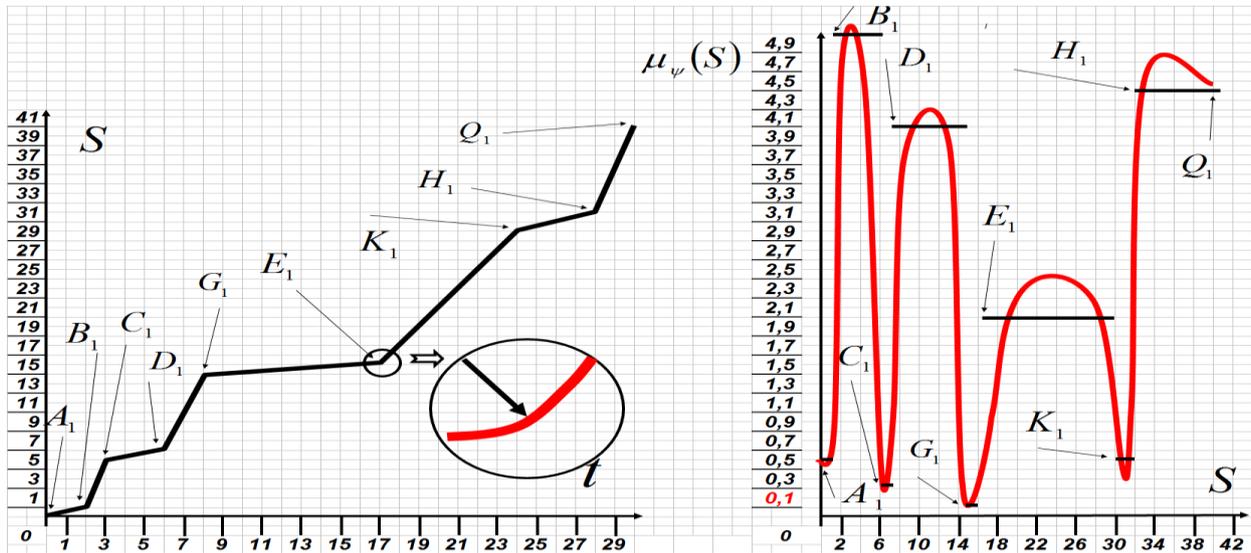


Рис.4. Технологическая траектория первого предмета труда

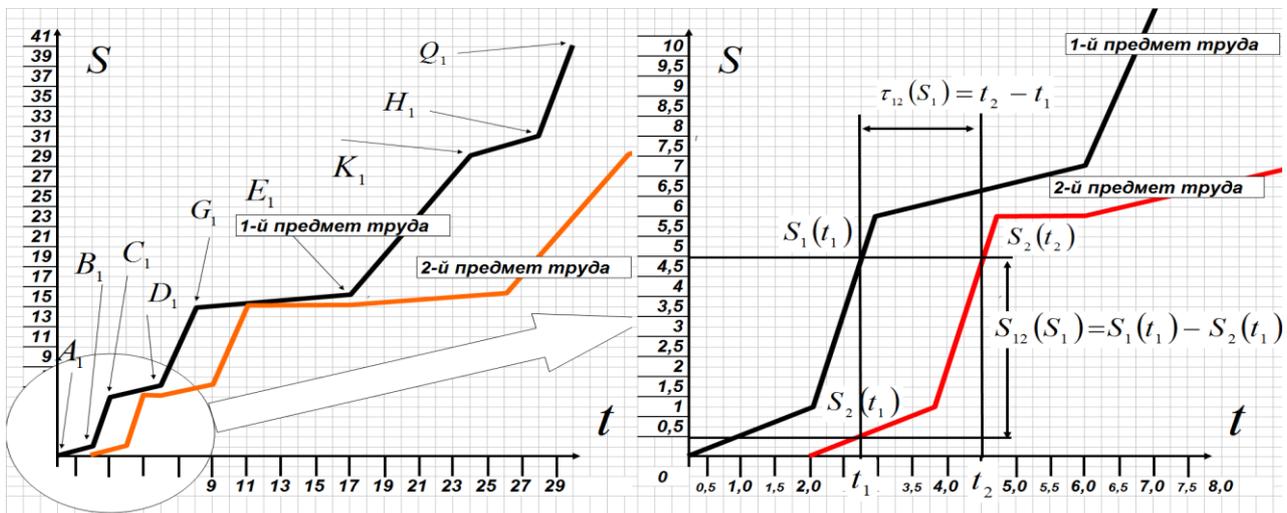


Рис.5. Ограничение на траектории, накладываемые условиями обработки

Аналогично, при $S_{j-1}(t_1)=S_j(t_2)$ для двух точек $S_{j-1}(t_1)$ и $S_j(t_2)$ траекторий, следующих друг за другом предметов труда:

$$t_j = t_{j-1} + t_{12}(S_{j-1}), S_{j-1}(t_1) = S_j(t_2) \quad (3)$$

Первое ограничение можно записать в виде неравенства

$$S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) \geq S_j(t). \quad (4)$$

Функция $\Delta\tau_m(S_m)$ представлена непрерывной функцией, так что для точки $S = S_m$

$$\tau_{\psi 12}(S_m) = \Delta\tau_m(S_m). \quad (5)$$

Согласно (2)–(4) траектории $(j-1)$ -ого и j -ого предмета труда не могут пересекаться. Второе ограничение заключается в том, что обработка j -ого предмета труда на m -ой операции должна быть закончена позднее, чем начата обработка $(j-N_{m,\psi \text{ Max}})$ -ого предмета труда на $(m+1)$ -ой операции с емкостью входного накопителя $N_{(m+1),\psi \text{ Max}}$. При начале обработки $(j-N_{m,\psi \text{ Max}})$ -ого предмета труда на $(m+1)$ -ой операции во входном накопителе емкостью $N_{(m+1),\psi \text{ Max}}$ освобождается место j -ого предмета труда, находящегося в обработке на m -ой операции. Ограничение, связанное с конечной емкостью накопителя, записано в виде неравенства

$$S_{j-N_{m,\psi \text{ Max}}}(t) \geq S_j(t). \quad (6)$$

Полагаем, что j -ый предмет труда в ожидании окончания обработки $(j-N_{m,\psi \text{ Max}})$ -ого предмета труда на $(m+1)$ -ой операции находится в m -ом модуле.

Траектория движения j -ого предмета труда в фазовом технологическом пространстве удовлетворяет уравнениям

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \mu_j} = \frac{\partial L}{\partial S_j}, \quad \frac{dS_j}{dt} = \mu_j, \quad (j=1..N) \quad (7)$$

$$S_j(t_{0j}) = 0, \quad \mu_j(t_{0j}) = \mu_{0j}, \quad (8)$$

с ограничениями, накладываемыми на технологические траектории, связанными с последовательностью обработки предметов труда и емкостью накопителей:

$$S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) \geq S_j(t), \quad S_{j-N_{m,\psi \text{ Max}}}(t) \geq S_j(t). \quad (9)$$

Функцию Лагранжа L определим как

$$L = J(S_j, \mu_j) + \lambda_1 \cdot \{S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) - S_j(t)\} + \lambda_2 \cdot \{S_{j-N_{m,\psi \text{ Max}}}(t) - S_j(t)\}, \quad (10)$$

где $J(S_j, \mu_j) = \mu_j^2 + \mu_{\psi}^2(S_j)$, t_{0j} - время начала обработки j -ого предмета труда.

Предполагаем, что перенос ресурсов на отдельной операции происходит только на один предмет труда. Одновременно невозможно обработать на m -ой операции два предмета труда, последовательно идущих друг за другом. Уравнения движения j -ого предмета труда в фазовом пространстве с учетом (5)–(10) принимают вид:

$$\frac{d\mu_j}{dt} = \mu_{\psi}(S_j) \frac{\partial \mu_{\psi}(S_j)}{\partial S} + \lambda_1 \cdot \left\{ \mu_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) \cdot \frac{d(t - \tau_{\psi 12}(S_j))}{dS_j} - 1 \right\} - \lambda_2, \quad \frac{dS_j}{dt} = \mu_j, \quad (11)$$

$$S_j(t_{0j}) = 0, \quad \mu_j(t_{0j}) = \mu_{0j}, \quad (j=1..N) \quad (12)$$

$$S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) \geq S_j(t), \quad \lambda_1 \geq 0, \quad \lambda_1 \cdot \{S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) - S_j(t)\} = 0, \quad (13)$$

$$S_{j-N_{m,\psi \text{ Max}}}(t) \geq S_j(t),$$

$$\lambda_2 \geq 0, \quad \lambda_2 \cdot \{S_{j-N_{m,\psi \text{ Max}}}(t) - S_j(t)\} = 0, \quad (14)$$

$$\lambda_1 \equiv 0 \text{ при } j-1 \leq 0 \text{ и}$$

$$\lambda_2 \equiv 0 \text{ при } j-N_{m,\psi \text{ Max}} \leq 0. \quad (15)$$

Из условий Куна-Таккера вытекают условия дополнительной нежесткости, состоящие в том, что множитель Лагранжа λ_k равен нулю, если ограничение выполняется как строгое неравенство, и соответствующий множитель Лагранжа положителен, если ограничение выполняется как равенство. Решение системы уравнений (11)–(15) для партии из пяти предметов труда, движущейся по свободной поточной линии с параметрами оборудования (табл. 1) и начальными условиями

$$S_j(\Delta\tau_1 \cdot (j-1)) = 0,$$

$$\mu_j(\Delta\tau_1 \cdot (j-1)) = \mu_{\psi}(0), \quad (j=1..5) \quad (16)$$

представлено на рис.6. Траектория движения j -ого предмета труда на участке $[A_j...g_j]$ определена наличием ограничения (4) $S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) \geq S_j(t)$, что приводит к ожиданию предметов труда перед третьей и пятой операцией (рис.8). После пятой операции движение предметов труда происходит без ограничения. Уравнение, описывающее движение предметов труда после пятой операции имеет вид:

$$\frac{d\mu_j}{dt} = \mu_{\psi}(S_j) \frac{\partial \mu_{\psi}(S_j)}{\partial S}, \quad \frac{dS_j}{dt} = \mu_j. \quad (17)$$

$$S_j(\tau_5 + \Delta\tau_5 \cdot (j-1)) = S_1(\tau_5) = S_{5,\psi}, \quad (j=1..5) \quad (18)$$

Условия (16),(18) определены темпом совместной обработки $[\chi]_{l_{m,\psi}}$ партии предметов труда на участке

после пятой операции $[\chi]_{lm,\psi} > [\chi]_{lm_2,\psi}$, $m > 5$ (рис.3), который определяет временные интервалы выхода предметов труда с пятой и последующих операций (рис.6). Если положить для данной партии предметов труда начальные условия

$$\begin{aligned} S_j(\Delta\tau_5 \cdot (j-1)) &= 0, \\ \mu_j(\Delta\tau_5 \cdot (j-1)) &= \mu_\psi(0), \quad (j=1..5) \end{aligned} \quad (19)$$

определенные темпом совместной обработки партии $[\chi]_{lm_2,\psi}$, то ограничения (13),(14) превращаются в строгое равенство с множителями Лагранжа $\lambda_k=0$. При этом система уравнений (17),(18), описывающих движение предметов труда по маршруту свободной поточной технологической линии, примет вид

$$\frac{d\mu_j}{dt} = \mu_\psi(S_j) \frac{\partial \mu_\psi(S_j)}{\partial S}, \quad \frac{dS_j}{dt} = \mu_j, \quad (20)$$

Решение системы уравнений (19), (20) представлено на рис.7. Технологические траектории предметов труда сдвинуты вдоль оси времени на величину $\Delta\tau_5$, соответствующей времени обработки предмета труда на 5-й технологической операции. При исходных данных (19) решение системы уравнений (20) соответствует случаю обработка j -ого предмета труда на 5-ой технологической операции без ожидания во входном накопителе.

Следует заметить, что время производственного цикла для случая с начальными условиями (19) и (16), (12) осталось неизменным. Таким образом, начальные условия вида

$$\begin{aligned} S_j \left(\frac{1}{[\chi]_{lm_2,\psi}} \cdot (j-1) \right) &= 0, \\ \mu_j \left(\frac{1}{[\chi]_{lm_2,\psi}} \cdot (j-1) \right) &= \mu_\psi(0), \quad (j=1..N) \end{aligned} \quad (21)$$

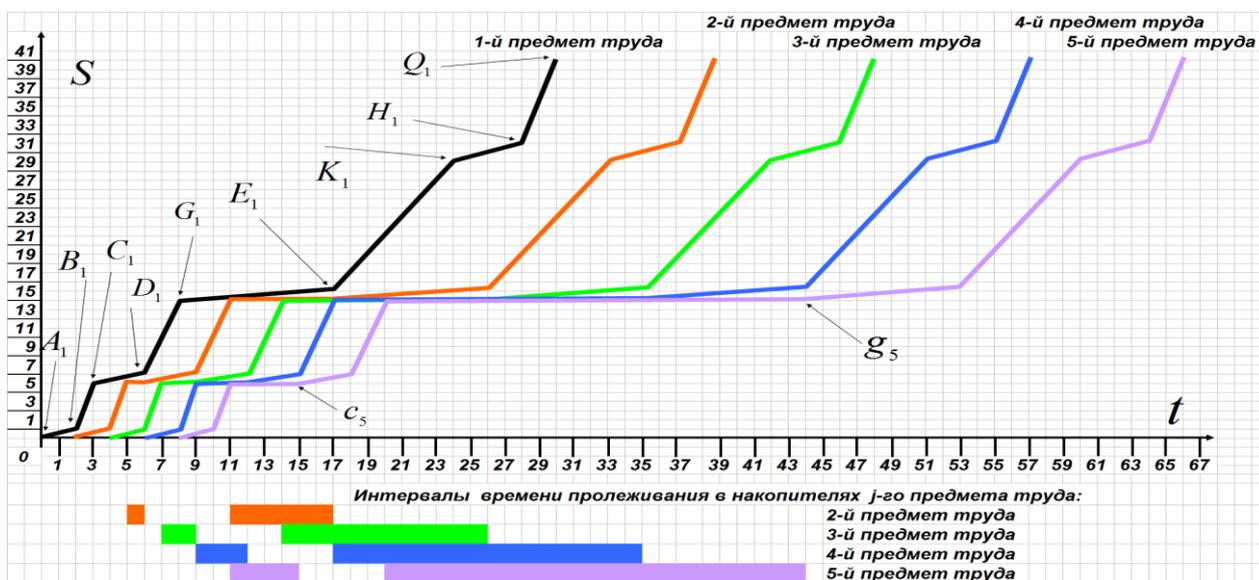


Рис.6. Траектории партии предметов труда с ожидания в накопителе

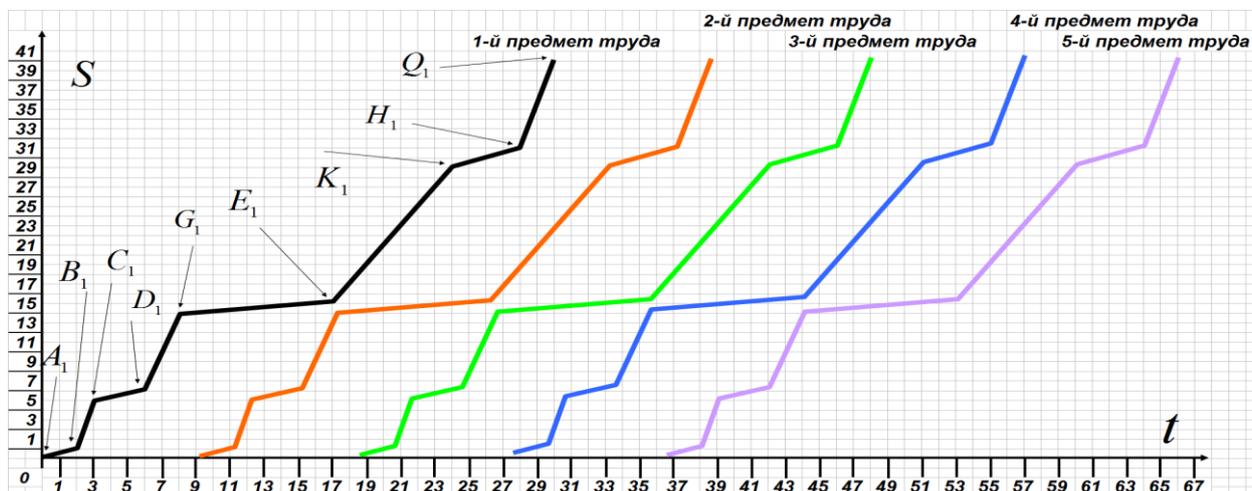


Рис.7. Траектории партии предметов труда без ожидания в накопителе

не влияют на время производственного цикла изготовления партии деталей.

С увеличением времени между запуском в технологическую обработку предметов труда на первой технологической операции до $([\chi]_{\text{лм}_z, \psi})^{-1}$ количество предметов труда в накопителях не возрастает. При $\Delta\tau_1 \rightarrow ([\chi]_{\text{лм}_z, \psi})^{-1}$ обработка партии предметов труда может быть осуществлена без входных накопителей (рис.7). Запуск предметов труда на первой технологической операции определяется условием (21).

Обработка партии предметов труда на занятой поточной линии

Исследуем движение той же партии деталей (из 5-ти предметов труда) по технологическому маршруту поточной линией, занятой обработкой предыдущей партии изделий. Технологический маршрут состоит из 8-ми операций, каждая из которых характеризуется значениями $\Delta S_{m, \psi}$ и $\Delta\tau_m$ (табл.1). На поточной линии обрабатывается партия из 10-ти предметов труда. Маршрут движения предмета труда состоит из 6-ми операций, каждая из которых характеризуется значениями $\Delta S_{m, \psi}$ и $\Delta\tau_m$ (табл.2). Перед обработкой партии 5-ти предметов труда поточная линия занята обработкой партии из 10-ти предметов труда. Траектории движения последних предметов труда предыдущей партии являются ограничением для траекторий движения предметов труда партии, поступающей на обработку. Уравнения, движение j-ого предмета труда из поступившей на обработку партии имеют вид:

$$\frac{d\mu_j}{dt} = \mu_{\psi}(S_j) \frac{\partial \mu_{\psi}(S_j)}{\partial S} + \lambda_1 \cdot \left\{ \mu_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) \cdot \frac{d(t - \tau_{\psi 12}(S_j))}{dS_j} - 1 \right\} - \lambda_2$$

$$\frac{dS_j}{dt} = \mu_j, S_j(t_{\text{н}j}) = 0, \mu_j(t_{\text{н}j}) = \mu_{\text{н}j}, (j = 1..N),$$

$$S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) \geq S_j(t), \lambda_1 \geq 0,$$

$$\lambda_1 \cdot \{S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j)) - S_j(t)\} = 0,$$

$$S_{j-N_{m, \psi \text{ Max}}}(t) \geq S_j(t), \lambda_2 \geq 0$$

$$\lambda_2 \cdot \{S_{j-N_{m, \psi \text{ Max}}}(t) - S_j(t)\} = 0.$$

В рассматриваемом случае при определении траекторий движения предметов труда поступившей в обработку партии, индекс для $S_{j-1}(t - \tau_{\psi 12}(S_j))$ и $S_{j-N_{m, \psi \text{ Max}}}(t)$ может быть меньше или равен нулю. Это означает, что траектория движения предмета труда поступившей партии ограничена траекторией движения предметов труда предыдущей партии (рис.8).

Заключение

Построено предметно-технологическое описание производственного процесса, основанное на законах сохранения, характеризующих процесс переноса технологических ресурсов на предмет труда, и пространственно - временной структуре технологического

Таблица 2

Параметры технологических операций

Номер операции	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я
$\Delta S_{m, \psi}$, руб.	3	6	2	8	14	3
$\Delta\tau_m$, час	5	3	6	6	1	8
$S_{m, \psi} = \sum_{k=1}^m \Delta S_{k, \psi}$, руб	3	9	11	19	33	36
$\tau_m = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_k$, час	3	8	14	20	21	29
$[\chi]_{\text{лм}_z, \psi} = 1/\Delta\tau_m$, шт / час	0,2	0,33	0,17	0,17	1	0,12
$[\chi]_{\text{лм}_z, \psi} = \min \{[\chi]_{\text{лк}_z, \psi}, k = 1, m\}$, шт / час	0,2	0,2	0,17	0,17	0,17	0,12
$\mu_{m, \psi} = \Delta S_{m, \psi} / \Delta\tau_m$, $\frac{\text{грн}}{\text{час}}$	0,6	2	0,33	1,33	14	0,38
Емкость входного накопителя, $N_{m, \psi \text{ Max}}$, шт	5	2	3	4	4	4

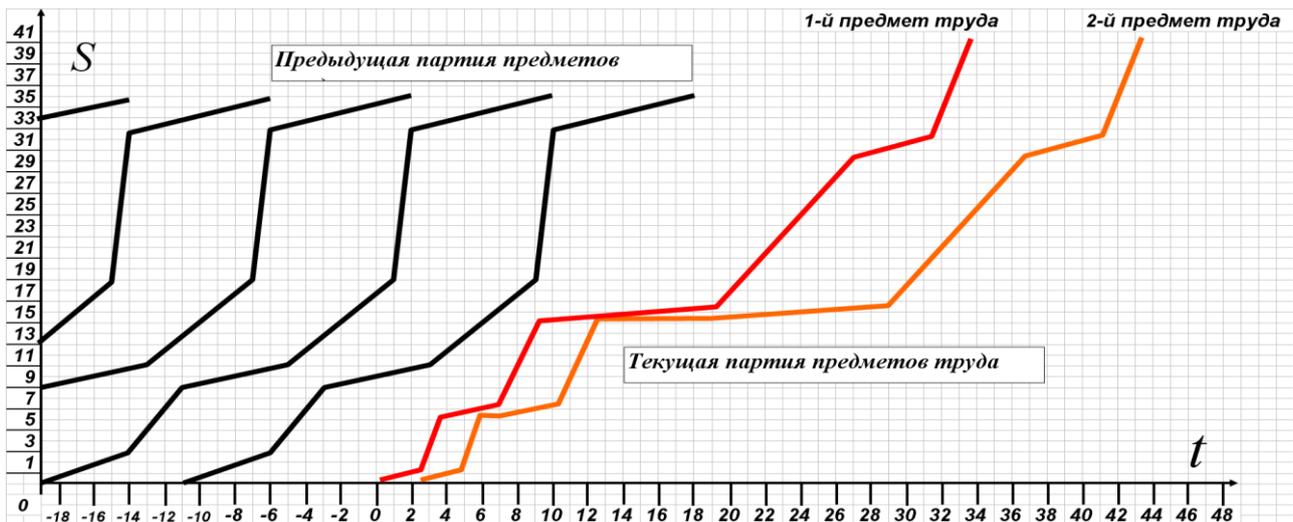


Рис.8. Начальные траектории предметов труда для занятой линии

процесса. Показано, что параметры управляемого производственного процесса являются величинами, поведение которых в общем случае обусловлено процессами переноса технологических ресурсов на предмет труда. Состояние параметров производственного процесса определяется состоянием параметров большого количества предметов труда, находящихся в разной стадии обработки на операциях вдоль технологического маршрута. Для вывода нестационарных уравнений состояния параметров поточной линии, функционирующей в переходных режимах, получено уравнение движения предметов труда.

Выводы

Рассмотрена модель обработки партии изделий на свободной поточной линии. Проанализированы ограничения, которые накладывает на технологические траектории предметов труда технология производства. Получена система уравнений Лагранжа для описания изменения свойств партии предметов труда в фазовом пространстве с учетом ограничений. Определена область значений для начальных условий параметров предметов труда, допускающая аналитическое решение системы уравнений Лагранжа. Показано, что при соблюдении условий непрерывной обработке предметов труда на одной или нескольких технологических операций для промежутка времени, значительно превышающего эффективное время обработки, начальные условия не оказывают влияние на темп выпуска продукции.

Как развитие задачи об обработке партии изделий на свободной поточной линии, рассмотрена задача обработки предметов труда на поточной линии, занятой обработкой предыдущей партии. Получена система уравнений Лагранжа для описания движения партии предметов труда в фазовом пространстве с учетом наложенных ограничений. Аналогично, как и для задачи об обработке партии изделий на свободной поточной линии, показано, что для промежутка времени, значительно превышающего эффективное время обработки, начальные условия не оказывают влияние на темп выпуска продукции при условии непрерывной работы технологических модулей для каждой технологической операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенко Ю. Г. Моделирование технологической гибкости производственно-экономических систем / Ю.Г.Лысенко, Н.В.Румянцев. – Донецк: ДНУ, 2007. – 238 с.
2. Митрофанов С. П. Технологическая подготовка гибких производственных систем / С. П. Митрофанов, Д. Д. Куликов.– Л.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
3. Копп В. Я. Моделирование автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 700 с.
4. Лотов А. В. Введение в экономико-математическое моделирование/ А. В. Лотов. – М.: Наука. Главная редакция физ-мат. литературы, 1984.– 392 с.
5. Scholz-Reiter B. Modelling and Control of Production Systems Based on Nonlinear Dynamics Theory / B. Scholz // Annals of the CIRP. – New York: Reiter. – 2002. –№1. – P. 375 – 378.
6. Пигнастый О. М. Статистическая теория производственных систем / О. М Пигнастый. – Харків: ХНУ, 2007. – 388 с.
7. Hopp W.J. Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management. / W. J. Hopp, M.L. Spearman. – Boston: Irwin. McGraw-Hill, 2001. – P. 698.
8. Бусленко Н. П. Математическое моделирование производственных процессов / Н. П. Бусленко. – М.:Наука, 1964. – 363 с.
9. Katzorke K. Chaos and complexity in simple models of production dynamics / K.Katzorke, A.Pikovskiy // Discrete Dynamics in Nature and Society. –№5.–2000.– P.179– 187. 445
- 10.Riano G. Transient behavior of stochastic networks: Application to production planning withload-dependent lead times / G.Riano // – Atlanta, 2003. – 556 p.
- 11.Schmitz J. P. Chaos in Discrete Production Systems. / J. P.Schmitz, J.E.Rooda // – Journal of Manufacturing Systems. – 2002. –V.21. –№3. – P. 236 – 246.

12. Пигнастый О. М. Расчет производственного цикла с применением статистической теории производственно-технических систем / О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // *Доповіді Національної академії наук України*. – Киев: Видавничий дім "Академперіодика". – 2009. – №12. – С. 38 – 44.
13. Дудорин В. И. Математические методы в планировании машиностроительного производства / В. И. Дудорин. – М.: Машгиз, 1963. – 215 с.
14. Данилевский В. В. Технология машиностроения / В. В. Данилевский. – М.: Высшая. школа, 1984. – 416 с.
15. Бессонов В. А. Темповые производственные зависимости с ограниченным эффективным множеством / В. А. Бессонов, И. П. Иванюков // *ДАН СССР*. – 1989. – Том 309, №5. – С. 1033 – 1036.
16. Бигель Дж. Управление производством / Дж. Бигель. – М.: Мир, 1973. – 420 с.
17. Бир С. Кибернетика и управление производством / С. Бир. – М.: Изд-во Физ.-мат. литературы, 1963. – 276 с.
18. Бабук В. В. Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении / В. В. Бабук, В. А. Шкред. – Минск: Выш. шк., 1987. – 255 с.
19. Балашевич В. А. Математические методы в управлении производством / В. А. Балашевич. – Минск: Выш. шк., 1976. – 334 с.
20. Pihnastyi O.M. Distinctive numbers of production systems functioning description / O.M.Pignasty // *Problems of Atomic science and technology*. - Kharkov: KIPT. - 2007. - №3 - P. 322-325.
21. Lefeber E. Modeling, Validation and Control of Manufacturing Systems / E.Lefeber, R.A.Berg, J.E. Rooda // – *Proceeding of the 2004 American Control Conference*. –Massachusetts. – 2004. – P. 4583 – 4588.
22. Пигнастый О. М. О построении целевой функции производственной системы / О. М. Пигнастый // *Доповіді Національної академії наук України*. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика". – 2007. – №5. – С. 50 – 55.
23. Демуцкий В. П. Целевая функция производственной системы с массовым выпуском продукции. /В.П.Демуцкий, О.М.Пигнастый, В.Д.Ходусов // *Вісник Харківського національного університету*. – Харків: ХНУ. – 2006. – N746. – С. 95 – 103.
24. Демуцкий В. П. Стохастическое описание экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый // *Доповіді Національної академії наук України*. – Київ: Видавничий дім "Академперіодика". – 2005. – N7. – С. 66 – 71.
25. Раскин Л.Г. Прогнозирование технического состояния систем управления / Ю.Т.Костенко, Л.Г.Раскин. Х.: Основа, 1999, 303 с.

MODEL MANUFACTURING PROCESS OF GROUP THE OBJECTS OF LABOR

O.M.Pihnastyi¹, V.D.Khodusov²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

²V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv

Abstract. The article discusses the construction of a model of industrial production line with the constraints on the technological trajectory of objects of labor. Showed the influence on the trajectory of the object of labor, which is related to the limited maximum capacity operating storage. Analyzed constraint that is associated with the serial order of processing of objects of labor. Built equation for the trajectory of the regulatory process, taking into account constraints on the trajectory of the objects of labor, which can be used for closing the balance equations PDE-models of industrial production lines.

Keywords: Euler's equation, the production line, mass production, work in progress, the Lagrange formalism, technological trajectory, production line, PDE model

REFERENCES

1. Lysenko Yu.G. *Modelirovanie tekhnologicheskoy gibkosti proizvodstvenno-ekonomicheskikh sistem* / Yu.G.Lysenko, N.V.Rumyantsev. – Donetsk: DNU, 2007. – 238 s.
2. Mitrofanov S. P. *Tekhnologicheskaya podgotovka gibkikh proizvodstvennykh sistem* / S. P. Mitrofanov, D. D. Kulikov. – L.: Mashinostroenie, 1987. – 352 s.
3. Kopp V. Ya. *Modelirovanie avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem* / V.Ya. Kopp. – Sevastopol' : SevNTU, 2012. – 700 s.
4. Lotov A. V. *Vvedenie v ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie* / A. V. Lotov. – M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiz-mat. literatury, 1984.– 392 s.
5. Scholz-Reiter B. *Modelling and Control of Production Systems Based on Nonlinear Dynamics Theory* / B. Scholz // *Annals of the CIRP*. – New York: Reiter. – 2002. – №1. – P. 375 – 378.
6. Pihnastyi O. M. *Statisticheskaya teoriya proizvodstvennykh sistem* / O.M Pihnastyi. – Kharkiv: KhNU, 2007. – 388 s.
7. Hopp W.J. *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*. / W. J. Hopp, M.L. Spearman. – Boston: Irwin. McGraw-Hill, 2001. – P. 698.
8. Buslenko N. P. *Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennykh protsessov* / N. P. Buslenko. – M.: Nauka, 1964. – 363 s.
9. Katzorke K. *Chaos and complexity in simple models of production dynamics* / K.Katzorke, A.Pikovskiy // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. – №5.–2000.– P.179– 187. 445

10. Riano G. *Transient behavior of stochastic networks: Application to production planning with load-dependent lead times* / G.Riano // – Atlanta, 2003. – 556 p.
11. Schmitz J. P. Chaos in Discrete Production Systems. / J. P.Schmitz, J.E.Rooda // – *Journal of Manufacturing Systems*. – 2002. – V.21. – №3. – P. 236 – 246.
12. Pihnastyi O. M. Raschet proizvodstvennogo tsikla s primeneniem statisticheskoy teorii proizvodstvenno-tekhnicheskikh sistem / O. M. Pihnastyi, V. D. Khodusov // *Dopovidi Natsional'noi akademii nauk Ukraini*. – Kiev: Vidavnicхий dim "Akademperiodika". – 2009. – №12. – S. 38 – 44.
13. Dudorin V. I. *Matematicheskie metody v planirovanii mashinostroitel'nogo proizvodstva* / V. I. Dudorin. – M.: Mashgiz, 1963. – 215 s.
14. Danilevskiy V. V. *Tekhnologiya mashinostroeniya* / V. V. Danilevskiy. – M.: Vysshaya. shkola, 1984. – 416 s.
15. Bessonov V. A. Tempovye proizvodstvennyye zavisimosti s ogranichennym effektivnym mnozhestvom / V. A. Bessonov, I. P. Ivanilov // *DAN SSSR*. – 1989. – Tom 309, №5. – S. 1033 – 1036.
16. Bigel' Dzh. *Upravlenie proizvodstvom* / Dzh. Bigel'. – M.: Mir, 1973. – 420 s.
17. Bir S. Kibernetika i upravlenie proizvodstvom / S. Bir. – M.: Izd-vo Fiz.-mat. literatury, 1963. – 276 s.
18. Babuk V.V. *Proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki v mashinostroenii* / V. V. Babuk, V. A. Shkred. – Minsk: Vysh. shk., 1987. – 255 s.
19. Balashevich V. A. *Matematicheskie metody v upravlenii proizvodstvom* / V. A. Balashevich. – Minsk: Vysh. shk., 1976. – 334 s.
20. Pihnastyi O.M. Distinctive numbers of production systems functioning description / O.M.Pihnastyi // *Problems of Atomic science and technology*. - Kharkov: KIPT. - 2007. - №3 - P. 322-325.
21. Lefeber E. Modeling, Validation and Control of Manufacturing Systems / E.Lefeber, R.A.Berg, J.E. Rooda // – *Proceeding of the 2004 American Control Conference*. –Massachusetts. – 2004. – P. 4583 – 4588.
22. Pihnastyi O.M. O postroenii tselevoy funktsii proizvodstvennoy sistemy / O. M. Pihnastyi // *Dopovidi Natsional'noi akademii nauk Ukraini*. – Kiiv: Vidavnicхий dim "Akademperiodika". – 2007. – №5. – S. 50 – 55.
23. Demutskiy V. P. Tselevaya funktsiya proizvodstvennoy sistemy s massovym vypuskom produktsii. /V.P.Demutskiy, O.M. Pihnastyi, V.D.Khodusov // *Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo universitetu*. – Kharkiv: KhNU. – 2006. – N746. – S. 95 – 103.
24. Demutskiy V. P. Stokhasticheskoe opisanie ekonomiko-proizvodstvennykh sistem s massovym vypuskom produktsii / V. P. Demutskiy, V. S. Pihnastyi, O. M. Pihnastyi // *Dopovidi Natsional'noi akademii nauk Ukraini*. – Kiiv: Vidavnicхий dim "Akademperiodika". – 2005. – N7. – С. 66 – 71.
25. Raskin L.G. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya sistem upravleniya* / Yu.T.Kostenko, L.G.Raskin. Kh.: Osnova, 1999, 303 s.

УДК 004: 94

**ДВУХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ РАСПИСАНИЙ
ОБРАБОТКИ ПАРТИЙ ДАННЫХ В КОНВЕЙЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ЗАДАНИИ
ДИРЕКТИВНЫХ СРОКОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКТОВ**

К.В.Кротов¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия

¹ krotov_k1@mail.ru

Аннотация. Рассматривается задача обоснования двухуровневой модели иерархической игры для построения комплексных расписаний обработки партий данных различных типов в конвейерной системе при формировании комплектов из результатов обработки и задании директивных сроков выпуска комплектов. Для решения задачи вводится в рассмотрение математическая модель вычислительного процесса обработки партий данных в конвейерной системе, на основе которой обосновывается вид критериев эффективности решений по составам партий и расписаниям их обработки на уровнях иерархической системы. Вводится в рассмотрение способ вычисления моментов времени окончания формирования комплектов каждого типа, используемый при определении значений критерия эффективности решений по составам партий.

Ключевые слова: Иерархическая игра, расписания, директивные сроки, партии данных, комплекты.

Актуальность работы

При реализации современных информационных технологий возникает необходимость обработки больших массивов разнотипных данных. Примером такой информационной технологии является мониторинг земной поверхности с использованием спутниковых данных (данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)). Одной из задач мониторинга земной поверхности является идентификация различных видов чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера, определение условий их распространения (развития) во времени. В частности, первостепенной задачей является определение условий распространения ЧС и прогнозирование развития ЧС с учетом этих условий. В зависимости от типа ЧС (лесные пожары, разливы нефтепродуктов на земной и водной поверхностях) различаются виды определяемых с использованием спутников параметров, характеризующих условия распространения. При этом параметры разных видов, соответствующие условиям распространения и используемые при прогнозировании ЧС, определяются на основе данных, поступающих от разных спутников (выполняется комплексирование спутниковых данных при определении условий распространения ЧС). Оперативность мониторинга и прогнозирования развития ЧС обеспечивается оперативной обработкой спутниковых данных. Для повышения производительности мониторинга обработка данных выполняется конвейерной вычислительной системой [1]. При условии, что в буфере приема накапливаются данные от разных спутников, конвейерная система реализует обработку данных различных типов, соответствующих условиям распространения ЧС. Также на обработку поступает не единственный спутниковый снимок

определенного типа, а их набор. Таким образом, в буфере хранения данных системы мониторинга ЧС одновременно находятся несколько наборов данных разных типов (несколько наборов снимков от различных спутников). Из результатов обработки в конвейерной системе разнотипных спутниковых данных формируются комплекты различных составов. Каждый комплект представляет собой набор параметров, полученных в результате обработки спутниковых данных разных типов, соответствующих условиям распространения определенной ЧС (например, в определенном регионе). Т.е. комплект – это набор параметров, являющихся результатами обработки спутниковых данных разных типов, представляющая собой условия, необходимые для прогнозирования развития определенной ЧС. При этом моменты времени формирования комплектов из результатов обработки (наборов параметров, характеризующих условия распространения ЧС) являются заданными. Т.е. к некоторым задаваемым моментам времени должны быть сформированы определенные комплекты установленного состава.

В том случае, если в конвейерной системе выполняется обработка наборов спутниковых данных различных типов, тогда возникает задача управления вычислительным процессом обработки этих данных. Управление вычислительным процессом обработки данных должно быть реализовано таким образом, чтобы обеспечить выполнение требования оперативности выдачи результатов и, как следствие, требования формирования комплектов данных (условий распространения ЧС) в заданные директивные сроки. Наборы данных разных типов могут быть обработаны в системе целиком либо могут быть разбиты на части, называемые партиями данных. Партия данных – это совокупность данных

одного типа, входящих в набор данных, обрабатываемых в конвейерной системе. Решение задачи управления вычислительным процессом обработки партий данных в конвейерной системе предполагает построение расписаний обработки этих партий. Задача построения расписаний обработки партий данных является комплексной и предполагает решение двух подзадач: определения составов партий данных и построения расписаний обработки сформированных партий. В итоге совместное решение сформулированных задач (определения составов партий и расписаний их обработки) должно гарантировать получение комплектов результатов обработки в заданные для них директивные сроки. В силу изложенного решение задачи управления вычислительным процессом обработки партий данных в конвейерных системах является актуальным.

Основные проблемы и решения

Развитие современных методов построения расписаний обработки партий представлено в работах [2-11]. В [2] выполнена классификация задач управления обработкой партий (построения расписаний обработки партий). Задачи различаются по виду процесса обработки (непрерывный либо дискретный), способам представления времени моделирования (непрерывное либо дискретное), способам формирования партий и т.д. Управление обработкой партий предполагает построение расписаний для фиксированного их состава, определение количества и размера партий до реализации процедуры построения расписаний (алгоритм определения составов партий никак не связан с характеристиками оборудования и процессом обработки, составы партий определяются без связи с построением расписаний), определение размеров партий совместно с решением задачи построения расписаний их обработки. Методы, рассмотренные в [2], предполагают формирование партий и распределение их по обрабатываемым приборам при дискретном времени моделирования для непрерывного производства. При этом использован аппарат частично целочисленного линейного программирования (ЧЦЛП). Большая размерность модели (наличие более тридцати ограничений), использование методов ЧЦЛП, задание ограниченного количества обрабатываемых приборов (ограниченного количества ресурсов) делают затруднительным определение решения для задач большой размерности за ограниченное время. Методы управления обработкой партий, рассматриваемые в [3], предполагают наличие фиксированных партий данных и их обработку на ограниченном количестве приборов (задача определения оптимальных составов партий в этой работе не рассматривается). В работах [4,5] рассматривается задача управления обработкой партий в непрерывном (химическом) производстве. Под партиями в этом случае подразумевается объемы материалов, участвующих в процессе производства (объемы партий определяются способом производства требуемого вида продукта, количеством конечного продукта, определяемым спросом). Таким образом, в [4,5] реализуется распределение обработки партий материалов различных видов (размер партий не оптимизируется), обеспечивающих выпуск продуктов разных типов, по параллельно

действующим машинам. При этом рассматриваются задачи ограниченной размерности (2 продукта, 2-3 прибора в обрабатываемой конвейерной системе). В работе [6] рассматривается решение задачи среднесрочного планирования выпуска продукции при ограниченном количестве ресурсов и последующего составления расписаний обработки сформированных при планировании партий. При этом под партией подразумевается совокупность изделий одного типа, выпуск которых закрепляется за определенным предприятием или производственным участком. Размеры партий определяются в соответствии с заказами на производство и директивными сроками их выпуска. Модель оптимизации составов партий учитывает только стоимостные параметры выпуска продукции, но не учитывает временные характеристики и особенности технологических процессов. На основе полученного решения по распределению заказов по производственным участкам решается задача выделения для них ресурсов с целью обработки. Совместно задача определения составов партий и управления выпуском (формирования расписаний обработки партий) в работе не решается. В [6] использованы модель большой размерности и аппарат ЧЦЛП, что ограничивает размерность решаемой задачи. В работе [7] решается задача определения количества и составов партий единичных (разнотипных) требований, обрабатываемых на одном приборе, с заданными директивными сроками обработки и стоимостью доставки партий. Составы партий разнотипных требований формируются с учетом директивных сроков. Задача предполагает наличие одного обрабатывающего прибора, для которого отсутствуют простои при обработке партий. Формирование партий предполагает и одновременное автоматическое построение расписаний их обработки. В результате решается задача распределения составов партий на основе заданных директивных сроков окончания обработки входящих в них требований. Аналогичная задача формирования партий требований в соответствии с их директивными сроками завершения, обрабатываемых на параллельных машинах, рассматривается в [8]. Объединение требований в партии реализуется с использованием эвристической процедуры в соответствии со значениями параметров начала обработки и директивными сроками окончания обработки. Т.к. обработка двух партий на одной машине (приборе) не может пересекаться, тогда сроки начала и окончания обработки партий используются для их распределения по параллельным машинам (расписание вытекает из сформированных составов партий). В работе [9] решается задача планирования производства полупроводников, предполагающая совместное формирование составов партий обрабатываемых пластин разных типов и расписаний обработки партий в конвейерной системе с параллельно действующими машинами. При определении локально оптимальных решений по составам партий и расписаниям их обработки используется один обобщенный критерий. Особенностью аппарата формирования составов партий является использование метода отжига. Реализуется поиск в окрестностях текущего локально эффективного решения. Для формирования новых решений, входящих в окрестности, введены эвристические правила, оперирующие со случайно выбираемыми

партиями, изменяющие как составы партий, так и расписания их обработки (изменение позиции партии, изменение обрабатываемого прибора для выполнения операции, создание новых партий). На основе сформированного совместного решения по составам партий и расписаниям их обработки выполняется оценка эффективности расписания с использованием дизъюнктивного графа. Предложенный в [9] подход позволяет реализовывать стохастический поиск локально оптимальных решений. Планированию производственного процесса посвящена работа [10], в которой решается задача распределения заказов на производство продукции по сменным заданиям, распределения заданий по партиям и формирование расписаний обработки партий. Для определения составов сменных заданий используется эвристическая процедура, для определения составов партий разработана имитационная процедура, позволяющая моделировать прохождение партиями конвейерной системы. Определение эффективных составов партий предполагает задание параметров имитационной модели, соответствующих размерам партий изделий каждого типа, и проведения моделирования. В соответствии с результатами моделирования выбираются значения параметров размеров партий, обеспечивающие минимальное значение критерия. После того как с использованием моделирования определены оптимальные размеры партий, выполняется формирование расписаний их обработки. В [11] реализуется решение задачи определения составов партий компонент, из которых выполняется формирование элементов (аналог формирования комплектов из обработанных в системе изделий). Для формирования партий и расписаний их обработки введена оптимизационная модель, являющаяся многопараметрической и многоиндексной. Определение решений по количеству и составам партий осуществляется путем полного перебора возможных значений этих параметров. Расписание для полученного решения формируется посредством использования эвристической процедуры. При большой размерности задачи (значительное число типов компонент и количество компонент каждого типа) прямой перебор при формировании партий не обеспечивает решение поставленной задачи за ограниченное время. В итоге решение задачи определения составов партий и построения расписаний их обработки реализуется путем привлечения: 1) аппарата ЧЦЛП (однако при большой размерности задачи получение решения за ограниченное время является затруднительным, решения по составам партий формируются без учета расписаний их обработки); 2) методов формирования партий с учетом директивных сроков окончания обработки входящих в них требований; 3) эвристических процедур и правил (однако, применение правил не позволяет получить решения, приближающиеся к оптимальным). Т.е. эффективные составы партий определяются с привлечением аппарата ЧЦЛП, что делает затруднительным решение задач большой размерности. Либо составы партий определяются, исходя из директивных сроков окончания обработки данных, что не предполагает оптимизацию. Либо составы партий определяются на основе эвристических правил, что также затрудняет получение эффективных решений. В соответствии с этим разработка моделей и методов определения локально оптимальных составов партий и расписаний их обработки является актуальной задачей.

Целью работы является совершенствование методов локальной оптимизации решений по составам партий данных, обрабатываемых в конвейерной системе, и решений по порядкам обработки этих партий на сегментах в конвейерной системе (расписанию обработки партий). Достижение цели обеспечивается декомпозицией обобщенной функции (цели) системы на совокупность иерархически упорядоченных подфункций (подцелей), каждая из которых реализуется на определенном уровне иерархии системы. В результате выполненной декомпозиции обобщенной функции системы в рассмотрение введена двухуровневая модель иерархической игры определения локально оптимальных решений по составам партий и расписаниям их обработки. На основании предложенного иерархического подхода достижение сформулированной цели обеспечивается решением следующих задач: а) обоснования математической модели вычислительного процесса обработки партий данных в конвейерной системе; б) обоснования вида критериев оптимизации в модели иерархической игры, используемой для определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки; в) обоснование метода локальной оптимизации решений по составам партий данных; г) обоснование метода локальной оптимизации решений по расписаниям обработки партий.

В рассматриваемой работе реализуется решение задачи обоснования математической модели вычислительного процесса обработки партий данных в конвейерной системе при формировании комплектов из результатов обработки и задании директивных сроков формирования комплектов каждого типа, а также задачи обоснования вида критериев оптимизации в модели иерархической игры, используемой для определения эффективных решений по составам партий данных и расписаниям их обработки.

Задача, близкая к рассматриваемой в данной работе, решалась в [12]. Особенностью постановки задачи, решаемой в [12], является наличие временных ограничений на длительности интервалов времени обработки партий данных, т.е. задание временных интервалов, в течение которых выполняется обработка партий. Из данных, обработанных в течение этих интервалов времени, формируются комплекты установленного состава. Для решения этой задачи в [12] выполнено обоснование метода формирования комплектов из результатов обработки данных, полученных по истечении каждого установленного интервала времени функционирования системы. При этом оценка эффективности решений по составам партий выполняется с точки зрения количества комплектов, сформированных из результатов обработки данных, полученных по истечении заданных временных интервалов.

Декомпозиция обобщенной функции системы управления вычислительным процессом обработки партий при задании ограничений на интервалы времени реализации операций с данными и условия формирования комплектов, выполненная в [12], позволила определить три уровня иерархии принятия решений в системе. На первом уровне осуществляется формирование решений по составам партий данных, на втором – формирование решений по составам групп партии, обрабатываемых в течение временных интервалов заданной длительности, на третьем уровне – формирова-

ние решений по расписаниям обработки партий данных в конвейерных системах. Для каждого уровня определены формы критериев эффективности принятия решений и методы формирования соответствующих решений.

Рассматриваемая в предлагаемой работе задача также предполагает определение решений по составам партий данных и порядкам их обработки в конвейерной системе (расписаниям обработки партий в конвейерной системе) при условии формирования комплектов из результатов. Однако ее особенностью является задание директивных сроков формирования комплектов каждого типа. Т.е. постановка задачи предполагает задание количества комплектов каждого типа, которые должны быть сформированы из результатов обработки данных, и задание директивных сроков формирования каждого комплекта определенного типа (моментов времени, к наступлению которых каждый комплект определенного типа должен быть сформирован). В соответствии с этим определение количества сформированных комплектов реализуется не с учетом результатов обработки, полученным к моментам времени окончания заданных интервалов времени (как в работе [12]), а с учетом результатов, формируемых по мере обработки данных (в течение всего времени обработки партий). При этом моменты времени окончания формирования каждого комплекта определенного типа должны соответствовать директивным сроком, для них заданным.

Конвейеризация программ обработки данных предполагает, что за каждым сегментом конвейера закреплены для выполнения определенные их части [1]. Введем в рассмотрение следующие обозначения: i – идентификатор типа данных, обрабатываемых в системе, n – количество типов обрабатываемых данных ($i = \overline{1, n}$), n^i – количество данных i -го типа, которые должны быть обработаны. Данные i -го типа обрабатываются соответствующей им программой, тогда i – идентификатор программы, выполняемой в составе конвейера, обрабатывающей данные i -го типа. Однократное выполнение конвейеризированной программы i -го типа обеспечивает обработку одного элемента данных i -го типа. Если значение $n^i \geq 1$ ($i = \overline{1, n}$), тогда обрабатывающая программа должна быть выполнена в конвейерной системе n^i раз. Производительность всех сегментов конвейера является одинаковой, объемы вычислений, выполняемые в соответствии с программным кодом, реализующим обработку данных i -ых типов ($i = \overline{1, n}$) на каждом сегменте, различны. Тогда функционирование каждого сегмента конвейера при обработке данных характеризуется длительностями выполнения им операций с данными каждого i -го типа. Т.к. являются различными длительности выполнения программ на соответствующих сегментах, тогда может быть сформировано расписание обработки данных, представляющее собой порядок запуска программ на выполнение.

В результате управление вычислительным процессом в конвейерных системах предполагает определение порядка запуска программ обработки данных на выполнение.

Постановка задачи предполагает задание значений $n^i > 1$ ($i = \overline{1, n}$). Однотипные данные могут быть объединены для обработки в партии. Партия – это совокупность данных одного типа, которые обрабатываются без переналадки (перенастройки) конвейера. Переналадка (перенастройка) сегмента конвейера представляет собой завершение активного состояния программы, выполнявшей обработку данных, и активизацию программы, которая будет реализовывать обработку данных в соответствии с сформированным расписанием. Характеристиками партии являются: тип i и количество данных в ней. Партия является фиксированной, если в нее входят все данные i -го типа. Если партия содержит не все n^i данных, в системе обрабатывается ни одна, а несколько партий данных этого типа.

Особенностью постановки задачи является требование формирования комплектов разных типов из результатов обработки (составы комплектов разных типов являются заданными). Комплект данных (результатов обработки) – это совокупность результатов обработки разных типов, входящих в него в заданном количестве. Т.е. составы комплектов являются заданными и не могут быть изменены. При формировании комплектов предполагается, что данные всех n типов в определенном количестве входят в комплекты каждого типа. Комплекты заданных составов формируются из результатов по мере обработки данных в конвейерной системе (данные, входящие в обрабатываемую партию, после обработки снимаются с выхода конвейера и могут быть использованы при формировании комплекта соответствующего типа). Тогда могут быть зафиксированы моменты времени окончания формирования каждого комплекта соответствующего типа.

В соответствии с выполненными рассуждениями управление вычислительным процессом обработки партий данных в конвейерной системе при условии формирования комплектов заданных составов и заданных директивных сроках их формирования предполагает: 1) определение составов партий данных, обрабатываемых в системе; 2) определение порядка обработки партий данных; 3) распределение обработанных в составе партий данных по комплектам заданного состава. Для решения поставленной задачи определения составов партий и порядков их обработки на сегментах конвейера применены методы, реализующие локальную оптимизацию решений (это связано с доказанным свойством NP-полноты рассматриваемой задачи). Поэтому эффективными решениями по составам партий и порядкам их обработки будут являться те решения, которые при реализации локального поиска позволяют получить минимальные значения введенных критериев оптимизации (локально эффективные решения).

Рассматриваемая задача является задачей с полной информацией, все параметры, характеризующие обрабатываемые данные (типы данных, количество данных, длительности обработки данных различных типов, составы комплектов различных типов и т.д.) и функционирующую систему (количество сегментов, дисциплина обработки партий, длительности интервалов времени функционирования системы и т.д.) являются заданными.

Т.к. через i обозначен идентификатор типа данных, обрабатываемых в системе, тогда через d_i обозначим момент времени поступления в систему данных каждого i -го типа ($i = \overline{1, n}$). Для всех программ моменты времени их загрузки в систему и моменты поступления данных на обработку одинаковы, при этом $d_i = 0$. Обозначим через l индекс сегмента конвейера, осуществляющего выполнение l -й части программы, при этом $l = \overline{1, L}$. Каждым сегментом конвейера выполняются вычисления, соответствующие назначенной для него части программы. Дисциплина обслуживания выполняемых в системе программ предполагает прохождение данными, которые они обрабатывают, всех сегментов конвейера, при этом прерывание обработки данных является недопустимым. Выполнение на каждом l -м сегменте назначенной ему части i -го программы характеризуется параметром длительности обработки данных, однозначно соответствующей объему вычислений.

Классификации решаемой задачи построения расписаний выполнена по аналогии с [12]. В соответствии с [13] задача составления расписаний может быть представлена в следующем виде: $\alpha/\beta/\gamma$, где параметр α соответствует классу (типу) обрабатываемой системы, β – типу решаемой задачи и характеризует ее особенности, γ – виду критерия оптимизации при определении эффективного решения. Рассматривается конвейерная система, которая в [3] и [13] определена как *FlowShop*. Тогда в качестве α указывается F . Решаемая в системе задача обработки данных предполагает объединение обрабатываемых данных в партии. В этом случае в соответствии с [3] и [13] в качестве характеристики решаемой задачи указывается *batch*. Критерий, в соответствии с которым определяется эффективное расписание, учитывает особенности метода определения порядка обработки партий, реализующего жадный подход. Метод предполагает, что в последовательности обработки партий, порядок выполнения операций с которыми оптимизирован на предыдущих шагах алгоритма, добавляется новая партия данных и определяется ее эффективное местоположение в этих последовательностях. Критерий эффективности решения по порядку обработки партий данных сформирован с точки зрения условия реализации внутренней цели функционирования системы, которая обуславливает необходимость эффективного использования оборудования системы (эффективное использование оборудования системы связано с минимизацией простоев сегментов конвейера при реализации обработки партий). Для классификации задачи в рассмотрение введено обозначение простоя (ожидания) отдельного l -го сегмента конвейера при обработке им партий в виде $T_l^{ож}$. Критерий, используемый при определении локально эффективного расписания обработки партий, учитывает суммарные простои всех сегментов конвейера при реализации операций.

Для классификации задачи критерий обозначен в виде $\sum_{l=1}^L T_l^{ож}$. Тогда рассматриваемая задача с точки зрения [3], [13] может быть охарактеризована как:

$$F | batch | \sum_{l=1}^L T_l^{ож}$$

Особенностью решаемой задачи является необходимость формирования комплектов из результатов обработки данных и задание директивных сроков окончания формирования каждого комплекта определенного типа. Комплект результатов обработки данных представляет собой совокупность данных, при этом количество данных каждого типа, входящих в комплект одного типа является заданным. Через g обозначим идентификатор типа комплекта, который формируется из результатов обработки данных в конвейерной системе, а через $g^{КОМ}$ – общее количество типов формируемых комплектов. Через w_{ig} обозначим количество данных i -го типа, которые должны входить в один комплект g -го типа. В рассмотрение введена матрица (W) , значения элементов w_{ig} которой равны числу данных i -го типа, которые входят в один комплект g -го типа. Через $n_g^{КОМ}$ обозначим количество комплектов g -го типа, которые должны быть сформированы из обрабатываемых данных i -ых типов ($i = \overline{1, n}$) в соответствии с заданием. Тогда количество n^i данных каждого i -го типа ($i = \overline{1, n}$), которые будут обработаны в системе, определяется следующим образом: $n^i = \sum_{g=1}^{g^{КОМ}} n_g^{КОМ} \cdot w_{ig}$. В итоге все поступившие на вход системы для обработки данные будут использованы при формировании комплектов разных типов. Также через h_g обозначим индекс (номер) сформированного комплекта g -го типа, тогда $h_g = \overline{1, n_g^{КОМ}}$. Т.к. решаемая задача предполагает задание для каждого комплекта директивных сроков его формирования, тогда в рассмотрение введена матрица $D_{g, h_g}^{КОМ}$, элемент $d_{g, h_g}^{КОМ}$ которой представляет собой задаваемый момент времени окончания формирования h_g -го комплекта g -го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{КОМ}}, g = \overline{1, g^{КОМ}}$). При этом для каждого g -го типа элементы $d_{g, h_g}^{КОМ}$ матрицы $D_{g, h_g}^{КОМ}$ упорядочены в ее g -ой строке по возрастанию значений моментов времени окончания формирования комплектов: $h_g < h'_g$, если $d_{g, h_g}^{КОМ} \leq d_{g, h'_g}^{КОМ}$. Тогда обработка данных в конвейерной системе направлена на осуществление операций на всех сегментах конвейера с данными разных типов таким образом, чтобы формирование комплектов из результатов обработки выполнялось с учетом (в соответствии) с задаваемыми директивными сроками.

Определение эффективных решений по составам партий данных i -ых типов ($i = \overline{1, n}$) вместо фиксированных партий позволяет получить лучший результат с точки зрения формирования в установленные сроки комплектов из результатов обработки. При этом достигается внешняя цель функционирования системы –

обеспечение в заданные сроки формирования комплектов установленных типов из результатов обработки данных в конвейерной системе. При этом должно быть определено как количество партий данных, так и их составы.

Входными данными для системы построения расписаний обработки партий при формировании комплектов являются: типы i ($i = \overline{1, n}$) данных, обрабатываемых в системе, количество данных $n_i \geq 2$ каждого i -го типа; матрица (W) , элемент w_{ig} которой равен количеству данных i -го типа, которые должны входить в один формируемый комплект g -ого типа ($i = \overline{1, n}$, $g = \overline{1, g^{КОМ}}$), матрица $D_{g, h_g}^{КОМ}$ директивных сроков формирования комплектов, элемент $d_{g, h_g}^{КОМ}$ которой соответствует задаваемому моменту времени окончания формирования h_g -го комплекта g -го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{КОМ}}$, $g = \overline{1, g^{КОМ}}$). Выходными решениями, обеспечивающими формирование комплектов в установленные сроки, являются: количество и составы партий данных i -ых типов ($i = \overline{1, n}$); расписания обработки партий данных в конвейерной системе.

В итоге обобщенная цель функционирования системы представлена как совокупность иерархически упорядоченных целей подсистем (функций, решаемых на иерархически упорядоченных уровнях системы построения расписаний обработки партий). Формирование решений на уровнях системы построения расписаний обработки партий осуществляется следующим образом: первый уровень – решения по количеству и составам партий, второй уровень – решения по порядку обработки партий сформированного состава на сегментах конвейера. Выполненная декомпозиция обобщенной функции системы на совокупность иерархически упорядоченных подфункций позволяет рассмотреть задачу как задачу теории иерархических игр [14,15].

С целью формирования модели иерархической игры для построения комплексных расписаний обработки партий в рассмотрение введены следующие обозначения: m_i – количество партий данных i -го типа ($i = \overline{1, n}$), формируемых на первом уровне принятия решений, при $i = \overline{1, n}$ элементы m_i образуют вектор (M) ; A – матрица, элемент a_{ih} которой – это количество данных i -го типа в h -ой партии ($h \leq m_i$), размерность матрицы A – $n \times h^{max}$, где $h^{max} = \max_{1 \leq i \leq n} (m_i)$. Решение, формируемое на первом уровне системы (количество и составы партии) имеет вид: $[M, A]$.

Расписание обработки партий данных i -ых типов ($i = \overline{1, n}$) обозначено как π , оно представляет собой совокупность (множество) последовательностей π^l запуска партий на обработку на каждом l -ом сегменте конвейера ($i = \overline{1, L}$). Расписание π имеет вид: $\pi = \{ \pi^1, \pi^2, \pi^3, \dots, \pi^L \}$.

Расписание обработки партий π формируется в предположении, что порядок обработки партий является одинаковым на всех L сегментах конвейера. Для формализации вида последовательностей π^l расписания π в рассмотрении введена матрица P порядка обработки партий в системе; элемент $p_{ij} = 1$, если партия данных i -го типа занимает в последовательности π^l j -ю позицию, $p_{ij} = 0$ в случае, если партий данных i -го типа не занимает в последовательности π^l j -ю позицию, размерность матрицы $n \times n_p$, где n_p – количество партий в последовательностях π^l расписания π . Порядок обработки партий группы на всех сегментах одинаков, поэтому достаточно определения одной матрицы порядка P . В рассмотрение введена матрица R – матрица количества данных i -ых типов в партиях, занимающих в последовательностях π^l j -е позиции (элемент r_{ij} равен количеству данных i -го типа в партии, занимающей j -ю позицию в π^l , размерность матрицы $n \times n_p$). Решение, формируемое на нижнем уровне иерархии, имеет вид: $[P, R]$.

В соответствии с функциями уровней системы между ними выполняется обмен информацией следующего вида: 1) на вход первого уровня подаются: количество n типов обрабатываемых данных; количество n^i ($i = \overline{1, n}$) данных каждого типа, обрабатываемых в системе (определяемое на основе заданных значений $n_g^{КОМ}$ количества комплектов каждого g -го типа ($g = \overline{1, g^{КОМ}}$)); матрица (W) составов комплектов; матрица $D_{g, h_g}^{КОМ}$ директивных сроков окончания формирования комплектов g -ых типов ($g = \overline{1, g^{КОМ}}$); выхода уровня передаются составы партий данных i -ых типов ($i = \overline{1, n}$) – решение $[M, A]$; 2) на вход второго уровня – решение $[M, A]$; с выхода уровня – сформированное для решения $[M, A]$ эффективное расписание π обработки партий. При формировании расписаний обработки партий данных i -ых типов состав партий не изменяется (значения m_i и a_{ih} , поступившие с верхнего уровня, изменены быть не могут). В общем виде модель иерархической игры в соответствии с введенными обозначениями имеет следующий вид [14,15]:

1) первый уровень:

$$f_1([M, A][P, R]^*) \rightarrow \min(\max), \quad (1)$$

2) второй уровень:

$$f_2([M, A], [P, R]) \rightarrow \min(\max). \quad (2)$$

С точки зрения аппарата теории иерархических игр каждым игроком принимается решение, соответствующее функции (подцели) отдельного уровня. Игрок на верхнем уровне принимает решение по составам партий данных, игрок на втором уровне принимает решение по расписанию обработки партий данных в конвейерной системе.

Комплекты формируются только из результатов обработки данных, которые входят в партии. Полное формирование одного комплекта g -го типа предполагает получение (в требуемом количестве) всех результатов обработки данных, для этого необходимых. Формирование всех результатов обработки данных (в требуемом количестве) требует реализовать к директивному сроку формирования комплекта соответствующего типа. Поэтому наилучшим решением по составам партий будет являться то решение (с учетом построенного расписания обработки этих партий), которое обеспечивает формирование комплектов разных типов в соответствии с их директивными сроками. Для определения эффективных решений на первом уровне должно определяться соответствие сроков окончания формирования комплектов (для решений по составам партий и расписанию их обработки) заданным директивным срокам. Данное соответствие характеризуется степенью превышения реальных сроков формирования комплектов заданным директивным сроком. Это условие соответствует внешней цели функционирования системы и интерпретируется при формировании критерия эффективности решений на верхнем уровне иерархии.

Для определения вида модели вычислительного процесса обработки партий данных введены следующие обозначения: t_i^l – время обработки данных i -го типа на l -ом сегменте конвейера ($i = \overline{1, L}$); t_{ik}^l – время переналадки l -го сегмента с обработки данных i -го типа на обработку данных k -го типа; t_{ii}^l – время первоначальной наладки l -го сегмента на обработку данных i -го типа; (t_{ik}^l) – матрица длительностей переналадок сегментов конвейера для типов данных, партии которых обрабатываются в системе; t_{ji}^{nl} – время начала обработки партии данных i -го типа, занимающей в последовательности π^l j -ю позицию; (t_{ji}^{nl}) – матрица моментов времени начала обработки партий данных i -ых типов, занимающих в π^l j -е позиции; (t_{jq}^{ol}) – матрица моментов времени начала обработки q -ых данных в партиях, занимающих в π^l j -е позиции (q – порядковый номер данных в партии в j -ой позиции в π^l ($q = \overline{1, n_j}, n_j = \sum_{h=1}^n r_{hj}$, где n_j – количество данных в партии, занимающей j -ю позицию в π^l). Элементы матрицы (t_{ji}^{nl}) определяются следующим образом: $[t_{ji}^{nl}] = p_{ij} \cdot [t_{jl}^{ol}]$, где $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n_p}$, $[t_{jl}^{ol}]$ – момент времени начала обработки первых данных в партии, занимающей j -ю позицию в π^l .

Определение значений t_{ji}^{nl} и t_{jq}^{ol} ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n_p}; l = \overline{1, L}; q = \overline{1, n_j}, n_j = \sum_{h=1}^n r_{hj}$) выполняется по аналогии с подходом [12].

Для $(q=1)$ -ой позиции данных i -го типа в $(j=1)$ -ой партии в π^l выражение для определения t_{ji}^{ol} формируется при учете параметра t_{ii}^l – времени наладки сегмента на обработку данных i -го типа: $t_{11}^{ol} = t_{11}^{nl} = t_{11}^l$. Для $q > 1$ ($q = \overline{2, n_l}, n_l = \sum_{h=1}^n r_{hl}$) имеем [1]:

$$t_{1q}^{ol} = \sum_{h=1}^n t_{hh}^l \cdot p_{hl} + (q-1) \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hl}.$$

В этом выражении первое слагаемое определяет длительность наладки сегмента конвейера на обработку данных в первой позиции в π^l , второе слагаемое – длительность обработки данных в первой партии, предшествующих данным в q -ой позиции. Для позиции $(q=1)$ данных $(j=2)$ -ой партии в π^l для t_{2q}^{ol} имеем: если $t_{i_1 i_2}^{Inep}$ – время переналадки первого сегмента конвейера с

обработки данных i -го типа (первая позиция партии в π^l) на обработку данных другого типа (вторая позиция партии в π^l), а r_{il} – количество данных i -го типа в партии в первой ($j=1$) позиции в π^l , тогда $t_{2i}^{nl} = t_{2i}^{ol} = \sum_{h=1}^n t_{hh}^l \cdot p_{hl} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot r_{hl} + t_{i_1 i_2}^{Inep}$, где значение $t_{i_1 i_2}^{Inep}$ определяется следующим образом:

$$t_{i_1 i_2}^{Inep} = t_{i_r i_r'}^l, \text{ где } \begin{cases} i_r = i / p_{i1}^l = 1, i = \overline{1, n} \\ i_r' = j / p_{j2}^l = 1, j = \overline{1, n} \end{cases}.$$

Для позиций $q > 1$ ($q = \overline{2, n_2}, n_2 = \sum_{h=1}^n r_{h2}$) значения t_{2q}^{ol} определяются выражением:

$$t_{2q}^{ol} = \sum_{h=1}^n t_{hh}^l \cdot p_{hl} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot r_{hl} + t_{i_1 i_2}^{Inep} + (q-1) \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{h2},$$

$$q = \overline{2, n_2}.$$

Обобщенное выражение для $t_{jl}^{ol} = t_{ji}^{nl}$ при $j > 2$ для последовательности π^l имеет вид:

$$t_{ji}^{nl} = \sum_{h=1}^n t_{hh}^l \cdot p_{hl} + \sum_{f=1}^{j-1} \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot r_{hf}^l + \sum_{h=1}^{j-1} t_{i_h i_{h+1}}^{Inep},$$

моменты времени начала обработки q -ых данных в партии с $j > 2$:

$$t_{jq}^{ol} = \sum_{h=1}^n t_{hh}^l \cdot p_{hl} + \sum_{f=1}^{j-1} \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot r_{hf}^l + \sum_{h=1}^{j-1} t_{i_h i_{h+1}}^{Inep} + (q-1) \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hj}^l$$

Выражения для t_{jl}^{ol} и t_{ji}^{nl} сформированы следующим образом [12]:

$$t_{1l}^{ol} = t_{1i}^{nl} = \max\left(\sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hl}; t_{1l}^{ol-1} + \sum_{h=1}^n t_h^{l-1} \cdot p_{hl}\right);$$

$$t_{j1}^{ol} = t_{ji}^{nl} = \max\left(t_{j-1, n_{j-1}}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{h, j-1} + t_{i_j, i_j}^{lnep}; t_{j1}^{ol-1} + \sum_{h=1}^n t_h^{l-1} \cdot p_{hj}\right);$$

$$t_{jq}^{ol} = \max\left(t_{jq-1}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hj}; t_{jq}^{ol-1} + \sum_{h=1}^n t_h^{l-1} \cdot p_{hj}\right).$$

Полученные выражения представляют собой модель вычислительного процесса обработки партий данных i -ых типов ($i = \overline{1, n}$) на l -ых сегментах конвейера ($l = \overline{1, L}$). В соответствии с введенными обозначениями вид решения, формируемого на нижнем уровне иерархии системы, примет следующую форму: $[P, \{(t_{jq}^{ol}) | l = \overline{1, L}\}]$.

Метод построения расписаний обработки партий данных на втором уровне системы реализует жадный подход к оптимизации. Он предполагает добавление текущей рассматриваемой партии в конец последовательностей π^l ($l = \overline{1, L}$), в которых на предыдущих шагах алгоритма были размещены партии данных, и определение эффективного местоположения этой партии в π^l (определение для рассматриваемой партии позиций в π^l ($l = \overline{1, L}$), которые обеспечивают локально оптимальное решение). Внутренней целью функционирования системы является полное использование временного ресурса сегментов конвейера. Построение решений по порядкам обработки партий на сегментах конвейера в соответствии с этой целью обеспечивает формирование «плотных» расписаний. В этом случае решение по порядку обработки партий должно быть построено таким образом, чтобы временной ресурс системы использовался в полной мере. Тогда критерий эффективности расписаний обработки партий соответствует внутренней цели функционирования системы, определяющей необходимость минимизации простоев оборудования при обработке. При определении текущей эффективной позиции рассматриваемой партии в π^l значение критерия характеризует общие простои всех сегментов конвейера при обработке текущего количества партий, находящихся в π^l (для всех партий, включенных в последовательности π^l ($l = \overline{1, L}$)).

В этом случае критерий эффективности расписания обработки партий на нижнем уровне учитывает: а) время простоя сегментов в ожидании начала обработки партий данных (с учетом интервалов наладки, переналадки и последующего ожидания); б) время простоя сегментов в ожидании готовности данных при их обработке внутри партий. Простой l -го сегмента в ожидании начала обработки первой в π^l ($l = \overline{1, L}$) партии равен значению t_{1l}^{ol} , суммарное время простоя сегментов в ожидании начала обработки партий в последовательностях π^l определяется выражением

$\sum_{l=1}^L t_{1l}^{ol}$. Интервал простоя l -го сегмента в ожидании

начала обработки следующей партии после окончания обработки предыдущей определяется выражением вида:

$$t_{jl}^{ol} - \left[t_{j-1, n_{j-1}}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{h, j-1} \right],$$

где $j > 1$, $n_{j-1} = \sum_{h=1}^n r_{h, j-1}$ – количество данных в предыдущей ($j-1$)-ой партии. Суммарный простой l -го сегмента в ожидании начала обработки всех j -ых партий ($j = \overline{2, n_p}$) определен следующим образом:

$$\sum_{j=2}^{n_p} \left[t_{jl}^{ol} - \left[t_{j-1, n_{j-1}}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{h, j-1} \right] \right].$$

В этом случае суммарный простой всех L сегментов в ожидании начала обработки партий на них (простой между партиями для всех L сегментов) определяется выражением:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^{n_p} \left[t_{jl}^{ol} - \left[t_{j-1, n_{j-1}}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{h, j-1} \right] \right]. \quad (3)$$

Простой l -го сегмента в ожидании готовности к обработке данных, занимающих q -ю позицию в j -ой партии в последовательности π^l , определяется выражением вида: $t_{jq}^{ol} - \left[t_{j, q-1}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hj} \right]$, где $j = \overline{1, n_p}$. Это выражение соответствует интервалу между данными в q -ой и $(q-1)$ -ой позициях в j -ой партии в π^l . Тогда суммарный простой l -го прибора в ожидании готовности к обработке всех данных в j -ой партии в π^l вычисляется с использованием выражения:

$$\sum_{q=2}^{n_j} \left[t_{jq}^{ol} - \left[t_{j, q-1}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hj} \right] \right], \quad (4)$$

где q – номер позиции данных в j -ой партии в π^l , n_j – число данных в этой j -ой партии, $n_j = \sum_{h=1}^n r_{hj}$. На основе

(4) общий простой l -го сегмента в ожидании готовности к обработке данных внутри всех партий в π^l определяется выражением вида: $\sum_{j=1}^{n_p} \sum_{q=2}^{n_j} \left[t_{jq}^{ol} - \left[t_{j, q-1}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hj} \right] \right]$.

Суммарный простой всех L сегментов конвейера в ожидании готовности данных внутри партий вычисляется выражением:

$$\sum_{l=2}^L \sum_{j=1}^{n_p} \sum_{q=2}^{n_j} \left[t_{jq}^{ol} - \left[t_{j, q-1}^{ol} + \sum_{h=1}^n t_h^l \cdot p_{hj} \right] \right]. \quad (5)$$

Критерий эффективности решения на нижнем уровне иерархии для текущего количества партий, добавленных в π^l ($l = \overline{1, L}$) учитывает общий простой сегментов конвейера при определении порядка обработки этих партий, тогда при его формировании должны быть учтены: выражение $\sum_{l=1}^L t_{1l}^{ol}$ и формулы (3) и (5).

В соответствии с введенным обозначением вида t_{jq}^{ol} определено обозначение для момента времени окончания обработки на l -ом сегменте конвейера q -ых данных в партии, занимающей j -ю позицию в последовательности π^l ($l = \overline{1, L}$), в виде $\overline{t_{jq}^l}$ и аналогичное обозначение для момента времени окончания обработки в системе (соответственно, на L -ом сегменте конвейера) требуемого количества данных i -го типа, включаемых в формируемый h_g -ый комплект g -го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}$, $g = \overline{1, g^{KOM}}$) в следующие виде: $(\overline{t_i^L})_{g, h_g}$. Тогда для h_g -ый комплекта g -го типа ($h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}$, $g = \overline{1, g^{KOM}}$) может быть определен вектор моментов времени окончания обработки всех данных i -ых типов (в требуемом их количестве W_{ig} при $i = \overline{1, n}$), обозначенный в виде T_{g, h_g} , формируемый из значений $(\overline{t_i^L})_{g, h_g}$ для этих типов. Таким образом, на верхнем уровне с использованием решения по порядкам обработки партий данных вида $[P, \{(t_{jq}^{ol}) | l = \overline{1, L}\}]^*$, сформированного для соответствующего решения по составам партий $[M, A]$, определяются вектора T_{g, h_g} ($h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}$, $g = \overline{1, g^{KOM}}$) значений моментов времени окончания обработки требуемого количества данных i -ых типов $(\overline{t_i^L})_{g, h_g}$. Также для каждого h_g -ый комплекта g -го типа вводится в рассмотрение обозначение $\overline{t_{g, h_g}^{KOM}}$ для момента времени окончания его формирования. Значения $\overline{t_{g, h_g}^{KOM}}$ определяются следующим образом: $\overline{t_{g, h_g}^{KOM}} = \max_i [(\overline{t_i^L})_{g, h_g}]$, т.е. момент времени окончания формирования h_g -ый комплекта g -го типа определяется как максимум среди моментов времени окончания обработки необходимого количества данных всех i -ых типов ($i = \overline{1, n}$). Тогда в случае $\overline{t_{g, h_g}^{KOM}} > d_{g, h_g}^{KOM}$ фиксируется запаздывание с формированием h_g -ый комплекта g -го типа относительно его директивного срока d_{g, h_g}^{KOM} . Т.к. цель управления вычислительным процессом состоит в обеспечении формирования комплектов в соответствии с директивными сроками, тогда критерием эффективности решений по составам партий является суммарное запаздывание в формировании всех h_g -ый комплектов g -го типов. Для вычисления суммарного запаздывания с формированием комплектов при обработке данных в рассмотрение введен параметр tz_{g, h_g}^{KOM} , соответствующий

интервалу времени запаздывания с формированием h_g -го комплекта g -го типа по сравнению с заданным для него директивным сроком. Определение значения tz_{g, h_g}^{KOM} для конкретного комплекта g -го типа выполняется следующим образом:

$$tz_{g, h_g}^{KOM} = \begin{cases} \overline{t_{g, h_g}^{KOM}} - d_{g, h_g}^{KOM}, & \text{при } \overline{t_{g, h_g}^{KOM}} > d_{g, h_g}^{KOM}; \\ 0, & \text{при } \overline{t_{g, h_g}^{KOM}} \leq d_{g, h_g}^{KOM}. \end{cases} \quad (6)$$

Тогда суммарное запаздывание с формированием h_g -ых комплектов g -го типов, соответствующее критерию f_I принятия решений по составам партий на верхнем уровне, определяется выражением вида: $f_I = \sum_{g=1}^{g^{KOM}} \sum_{h_g=1}^{n_g^{KOM}} tz_{g, h_g}^{KOM}$, где значение параметра tz_{g, h_g}^{KOM} определяется выражением (6).

Способ определения значений $(\overline{t_i^L})_{g, h_g}$ моментов времени окончания обработки требуемого количества $w_{i, g}$ данных i -го типа, включаемых в h_g -ые комплекты g -го типов, рассмотрен ниже. Для обоснования способа вычисления значений $(\overline{t_i^L})_{g, h_g}$ моментов времени окончания обработки в системе (на L -ом сегменте конвейера) требуемого количества $w_{i, g}$ данных i -го типа, включаемых в h_g -ые комплекты g -го типов ($i = \overline{1, n}$, $h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}$, $g = \overline{1, g^{KOM}}$), в рассмотрение введены следующие обозначения: 1) i' – текущий рассматриваемый тип данных, которые из партий распределяются по комплектам в порядке возрастания их идентификаторов g ; 2) $st_{i'}$ – счетчик количества данных i' -го типа, включенных в составы всех формируемых комплектов различных типов; 3) g' – идентификатор комплекта, который формируется на текущей итерации алгоритма; 4) G^{KOM} – упорядоченное множество идентификаторов g типов комплектов, формируемое в соответствии с видом матрицы D_{g, h_g}^{KOM} (множество идентификаторов типов комплектов, позиция типа g комплекта в котором определяется в соответствии со значением параметра d_{g, h_g}^{KOM}); 5) $G^{KOM'}$ – упорядоченное множество идентификаторов g типов комплектов, являющееся копией множества G^{KOM} , используемое при реализации алгоритма; 6) J_i – множество идентификаторов позиций партий данных i -го типа в последовательности π^L , имеющее вид: $J_i = \{j_1, j_2, \dots\}$; 7) j' – рассматриваемая позиция партии данных i' -го типа в последовательности π^L ; 8) $h_{g'}$ – порядковый номер комплекта рассматриваемого g' -го типа.

Алгоритм определения моментов времени $(\overline{t_i^L})_{g,h_g}$ окончания обработки данных i -ых типов в соответствии с расписанием вида $[P, \{(t_{jq}^{Ol}) / l = \overline{1, L}\}]^*$, используемых при формировании h_g -ых комплектов g -ых типов, имеет следующий порядок шагов:

- 1) для g -ых типов комплектов ($g = \overline{1, g^{KOM}}$) задание значения параметра h_g равным 1 ($h_g = 1$);
- 2) задание индекса i' типа данных, которые будут распределяться по комплектам g -ых типов ($g = \overline{1, g^{KOM}}$): $i' = \min\{i / i \in I\}$, где I – множество типов данных, партии которых обрабатываются в системе; $I = I \setminus \{i'\}$;
- 3) задание значения счетчика $st_{i'}$ количества данных i' -го типа, добавленных в h_g -ый комплект g' -го типа, равным 0 ($st_{i'} = 0$);
- 4) задание идентификатора g' вида комплектов, в которые будут включаться данные i' -го типа: $g' = \min\{g_j / g_j \in G^{KOM}\}$; $G^{KOM'} = G^{KOM} \setminus \{g'\}$;
- 5) определение позиции j' в последовательности π^L партии i' -го типа, данные из которой будут включаться в h_g -ый комплект g' -го типа:
 $j' = \min\{j_h / j_h \in J_{i'}\}$, где h – порядковый номер позиции j партии i' -го типа в множестве $J_{i'}$;
 $J_{i'} = J_{i'} \setminus \{j'\}$; инициализация значения индекса (номера) данных q в партии в j' -ой позиции в π^L :
 $q = 0$;
- 6) если $st_{i'} < w_{i',g'}$, тогда выполняется переход на шаг 7; если $st_{i'} = w_{i',g'}$, тогда выполняется переход на шаг 8;
- 7) если $q < n_{j'}$, тогда $st_{i'} = st_{i'} + 1$; $q = q + 1$; выполняется переход на шаг 6; если $q = n_{j'}$, тогда переход на шаг 5;
- 8) определение значения: $(\overline{t_i^L})_{g',h_{g'}} = t_{j'q}^{OL} + \sum_{h=1}^n t_h^L \cdot P_{h,j'}$; изменение значения номера $h_{g'}$ формируемого комплекта g' -го типа:
 $h_{g'} = h_{g'} + 1$;
- 9) проверка условия $G^{KOM'} = \emptyset$; в случае его выполнения – переход на шаг 10; при выполнении условия $G^{KOM'} \neq \emptyset$ задание идентификатора вида комплекта g' , в который будут включаться данные i' -го типа:
 $g' = \min\{g_j / g_j \in G^{KOM'}\}$; $G^{KOM'} = G^{KOM'} \setminus \{g'\}$;
 задание значения счетчика $st_{i'}$ количества данных i' -го типа, добавленных в $h_{g'}$ -ый комплект g -го типа равным 0 ($st_{i'} = 0$); реализуется переход на шаг 6;

10) проверка условия $I = \emptyset$, при его выполнении реализуется переход на шаг 11; при выполнении условия $I \neq \emptyset$ осуществляется модификация идентификатора типа i' , данные которого распределяются по комплектам g -ых типов ($g = \overline{1, g^{KOM}}$): $i' = \min\{i / i \in I\}$, $I = I \setminus \{i'\}$; реализуется переход на шаг 3;

11) останов алгоритма.

Реализация сформулированного алгоритма позволяет сформировать для каждого h_g -го комплекта ($h_g = \overline{1, n_g^{KOM}}$) g -го типа ($g = \overline{1, g^{KOM}}$) вектор T_{g,h_g} значений моментов времени окончания обработки требуемого количества данных i -ых типов $(\overline{t_i^L})_{g,h_g}$ ($i = \overline{1, n}$). С использованием значений $(\overline{t_i^L})_{g,h_g}$ реализуется определение $\overline{t_{g,h_g}^{KOM}}$ – моментов времени окончания формирования каждого h_g -ый комплекта g -го типа из результатов обработки данных i -ых типов в конвейерной системе и последующее вычисление значения критерия на верхнем уровне вида (6), характеризующего текущее решение по составам партий данных.

Таким образом, двухуровневая модель иерархической игры для определения эффективных составов партий данных и расписаний их обработки при формировании комплектов и заданных для них директивных сроках имеет итоговый следующий вид:

1) первый уровень: $\min f_1$, где $f_1 = \sum_{g=1}^{g^{KOM}} \sum_{h_g=1}^{n_g^{KOM}} t_{g,h_g}^{KOM}$, а

значения параметра t_{g,h_g}^{KOM} определяются выражением (6);

2) второй уровень: $\min f_2$, где

$$f_2 = \sum_{l=2}^L t_{l1}^{Ol} + \sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^{n_p} \left[t_{jl}^{Ol} - \left[t_{j-1,n_{j-1}}^{Ol} + \sum_{h=1}^n t_h^L \cdot P_{h,j-1} \right] \right] + \\ + \sum_{l=2}^L \sum_{j=1}^{n_p} \sum_{q=2}^{n_j} \left[t_{jq}^{Ol} - \left[t_{j,q-1}^{Ol} + \sum_{h=1}^n t_h^L \cdot P_{hj} \right] \right].$$

Использование двухуровневой модели иерархической игры, представленной в виде совокупности критериев эффективности решений на каждом уровне иерархии системы, позволяет определять локально оптимальные решения по составам партий данных разных типов и расписаниям их обработки на сегментах конвейера.

Заключение

Результатами выполненных исследований являются: сформированная двухуровневая модель построения комплексных расписаний обработки партий с формированием комплектов из результатов обработки данных различных типов и заданными для них директивными сроками; сформулированный способ вычисления моментов времени окончания формирования комплектов с использованием значений моментов времени окончания обработки данных различных типов, входящих в комплекты. Использование сформированной модели

позволяет определить: 1) эффективные составы партий (количество партий, число данных в них); 2) эффективные порядки обработки партий на сегментах конвейера. Дальнейшие исследования направлены на разработку методов построения комплексных расписаний обработки партий данных при формировании комплектов с учетом заданных для них директивных сроков (комплектов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хьюз, К. Параллельное и распределенное программирование на C++/ К. Хьюз, Т.Хьюз, М.: Изд-во «Вильямс», 2004.– 672 с.
2. Mendez C. A. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes./ C. A. Mendez, J. Cerda, I. E. Grossmann, L. Harjunkoski, M. Fahl. // *Computers and Chemical Engineering*, 2006, #30.– pp. 913–946.
3. Ковалев, М.М. Модели и методы календарного планирования. Курс лекций/ М.М. Ковалев. Минск: Изд-во БГУ, 2004.– 63 с.
4. Tan Y. Comparative Study of Different Approaches to Solve Batch Process Scheduling and Optimisation Problems./ Tan Y., Huang W., Sun Y., Yue Y.// *Proceedings of the 18th International Conference on Automation & Computing*, Loughborough University, Leicestershire, UK, 8 September 2012.– pp. 424–444.
5. Adonyi R. Incorporating heat integration in batch process scheduling./ R. Adonyi, J. Romero, L. Puigjaner, F. Friedler.// *Applied Thermal Engineering*, 2003, # 23.– pp. 1743–1762;
6. Kreipl S. Planning and Scheduling in supply chains: An Overview of Issues in Practice./ S. Kreipl, M. Pinedo.// *Production and Operations Management*, 2004, vol.17, #1.– pp. 77-92;
7. Steiner G. Minimizing the weight number of late jobs with Batch setup times and delivery costs on a single machine./ G. Steiner, Zhang R.// *Multiprocessor scheduling: Theory and Applications*, Book edited by E. Levner. – Vienna, Austria: Itech Education and Published, 2007.– 436 pp.
8. Koehler F. Optimal Batch Schedules for Parallel Machines./ F. Koehler, S. Khuller // *Algorithms and Data Structures: 13th International Symposium.*– Berlin: Springer – Verlag, 2013.– pp. 475– 486;
9. Yugma C. Batching and Scheduling Algorithm for the diffusion Area in Semiconductor Manufacturing./ C. Yugma, S. Davsere-Perez, C. Artiques, O. Sibille.// *International Journal of Production Research*, Taylor&Francis, 2012, #8.– pp.2118–2132;
10. Chandra P. Managing Batch Processors to reduce lead time in a semiconductor packaging line/ P. Chandra, S. Gupta.// *International Journal of Production Research*, 1997, #35 (3)– pp. 611– 633;
11. Surjandari I. The Batch Scheduling Model for Dynamic multiitem, Multilevel Production in an assembly Job-Shop with Parallel Machines./ I. Surjandari, A. Rachman, A. Dhini.// *International Journal of Technology*, 2015,#1.– pp. 84-96;
12. Кротов, К.В. Многоуровневая модель построения расписаний обработки партий данных в конвейерных системах при формировании комплектов и наличии ограничений / К.В.Кротов// СПб.: Труды СПИИРАН, 2016, Вып. 4(47). – С. 65-91;
13. Lawler E. L. Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity. / E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, D. B. Shmoys.// *Eindhoven University of Technology, Department of Mathematics and Computing Science.*– Eindhoven, Holland, 1989 у.– 72 pp.
14. Петросян, Л.А. Теория игр / Л.А.Петросян, Н.А.Зенкевич, Е.А.Семина. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1999. – 300с.
15. Гермейер, Ю.Б. Игры с противоположными интересами / Ю.Б.Гермейер. – М.: Наука, 1976. – 327 с.

THE TWO-LEVEL MODEL OF CONSTRUCTION OF COMPLEX SCHEDULES OF PROCESSING DATA PARTIES IN CONVEYOR SYSTEMS WITH SETTING DEADLINES OF SETS FORMING

K.V.Krotov¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Abstract. The problem of justification a two-level model of the hierarchical game for building complex schedules processing data parties of different types in conveyor system with the formation of sets of processing results and setting deadlines of release of sets is considered in the work. A mathematical model of computing process processing data parties in a conveyor system, on the basis of which kind of performance criteria decide on the composition of parties and schedules them for processing levels of the hierarchical system was justified, was entered into consideration for solving the problem. Method of calculating moments of the end of the formation of sets of each type to be used in determining the effectiveness criterion value solutions for party makeup is introduced into consideration.

Keywords. Hierarchical game, schedules, deadlines, party of data, sets.

REFERENCES

1. Hughes K. Hughes T. *Parallel'noe i raspredelennoe programirovanie na C++* [Parallel and Distributed Programming Using C ++], Moscow, Publishing House of the "Williams", 2004, 672 p.
2. Mendez C. A. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes./ C. A. Mendez, J. Cerda, I. E. Grossmann, L. Harjunkoski, M. Fahl. // *Computers and Chemical Engineering*, 2006, #30.– pp. 913–946.
3. Kovalev M.M. *Modeli i metody kalendarnogo planirovaniya. Kurs lektsiy*. [Models and methods of scheduling. Lecture course], Minsk, Belorussian State University, 2004, 63 p.
4. Tan Y. Comparative Study of Different Approaches to Solve Batch Process Sheduling and Optimisation Problems./ Tan Y., Huangi W., Sun Y., Yue Y.// *Proceedings of the 18th International Conference on Automation & Computing*, Loughborough University, Leicestershire, UK, 8 September 2012.– pp. 424–444.
5. Adonyi R. Incorporating heat integration in batch process scheduling./ R. Adonyi, J. Romero, L. Puigjaner, F. Friedler.// *Applied Thermal Engineering*, 2003, # 23.– pp. 1743–1762;
6. Kreipl S. Planning and Scheduling in supply chains: An Overview of Issues in Practice./ S. Kreipl, M. Pinedo.// *Production and Operations Management*, 2004, vol.17, #1.– pp. 77-92;
7. Steiner G. Minimizing the weight number of late jobs with Batch setup times and delivery costs on a single machine./ G. Steiner, Zhang R.// *Multiprocessor scheduling: Theory and Applications*, Book edited by E. Levner. – Vienna, Austria: Itech Education and Published, 2007.– 436 pp.
8. Koehler F. Optimal Batch Schedules for Parrallel Machines./ F. Koehler, S. Khuller // *Algorithms and Data Structures: 13th International Symposium*.– Berlin: Springer – Verlag, 2013.– pp. 475– 486;
9. Yugma C. Batching and Scheduling Algorithm for the diffusion Area in Semiconductor Manufacturing./ C. Yugma, S. Davsere-Perez, C. Artiques, O. Sibille.// *International Journal of Production Research*, Taylor&Francis, 2012, #8.– pp.2118–2132;
10. Chandra P. Managing Batch Processors to reduce lead time in a semiconductor packaging line/ P. Chandra, S. Gupta// *International Journal of Production Research*, 1997, #35 (3)– pp. 611– 633;
11. Surjandari I. The Batch Sheduling Model for Dynamic multiitem, Multilevel Production in an assembly Job-Shop with Parrallel Machines./ I. Surjandari, A. Rachman, A. Dhini// *International Journal of Technology*, 2015,#1.– pp. 84-96;
12. Krotov K.V. *Mnogourovnevaya model' postroeniya raspisaniy obrabotki partiy dannykh v konveyernykh sistemakh pri formirovanii komplektov i nalichii ogranicheniy* [Multilevel model of construction of the processing schedules batch data in conveyor systems in the formation of sets and availability restrictions], SPb.: *Proceedings of SPIIRAS*, 2016, # 4(47). – P. 65-91;
13. Lawler E. L. Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity. / E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, D. B. Shmoys.// *Eindhoven University of Technology, Department of Mathematics and Computing Science*.– Eindhoven, Holland, 1989 y.– 72 pp.
14. Petrosyan L.A., Zenkevich N.A., Semina E.A. *Teoriya igr* [Theory of games], Moscow, Publishing House of the "High School", 1999, 300 p.
15. Germeier Y.B. *Igry s neprotivopolozhnyimi interesami*. [Game with nonconflicting interests], Moscow, Nauka, 1976 - 327 p.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ПЛАН ПРЕПОДАВАТЕЛЯ СПО»

Федосеева Ю.В.¹, Зорина И.Г.², Тутарова В.Д.³, Азерская А.В.⁴

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

⁴anuta_sav08@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен процесс разработки автоматизированной информационной системы «Индивидуальный план преподавателя СПО», целью которой является автоматизация процесса формирования индивидуального плана преподавателя для учебных заведений среднего профессионального образования. Внедрение данной системы позволило значительно сократить время преподавателя на заполнение индивидуального плана, снизило количество ошибок при заполнении и унифицировало общую форму бланков индивидуального плана.

Ключевые слова: автоматизированная информационная система; образование; индивидуальный план; преподаватель.

Введение

В современном информационном обществе главным ресурсом является информация. Процессы с ней базируются на информационных и коммуникационных технологиях. Информационные и коммуникационные технологии – это методы, устройств и производственных процессов, используемых обществом для сбора, хранения, обработки и распространения информации [1].

Основу современных информационных технологий составляют:

- компьютерная обработка информации по заданным алгоритмам;
- хранение больших объемов информации на машинных носителях;
- передача информации на любое расстояние в ограниченное время [2].

За последнее время произошло кардинальное изменение роли и места персонального компьютера и информационных технологий в жизни общества. Человек постиндустриального общества и человек информационного общества принципиально иначе подходят к оценке любых проблем и их решению. В нашей стране сегодня использование информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) в ключевых сферах жизни общества: государственном управлении, образовании, бизнесе, культуре и других сферах представляет только начальные формы [4].

Информатизация образования – процесс обеспечения сферы образования методологией и практикой разработки и оптимального использования современных средств ИКТ, ориентированных на реализацию психолого-педагогических целей.

Одной из важнейших задач информатизации образования является формирование информационной культуры специалиста, уровень сформированности которой определяется, во-первых, знаниями об информации, информационных процессах, моделях и технологиях; во-вторых, умениями и навыками применения средств и методов обработки и анализа информации в различных видах деятельности; в-третьих, умением использовать

современные информационные технологии в профессиональной (образовательной) деятельности; в-четвертых, мировоззренческим видением окружающего мира как открытой информационной системы [3].

Педагогическая деятельность преподавателя многогранна, сложна, трудоемка, в ней нет неизменных элементов. Исходя из этого, появляется потребность в автоматизации учета деятельности преподавателя.

Постановка задач

Индивидуальный план работы преподавателя является документом, определяющим организацию, объем и содержание, формы и методы работы преподавателя на учебный год.

Должностные обязанности лиц профессорско-преподавательского состава включают учебную, учебно-методическую, организационно-методическую, научно-методическую работу, а также повышение уровня квалификации. Ввиду такого многообразия форм служебной деятельности преподавателей суммарный объем поручаемой им работы исчисляется в часах.

Все виды учебной, учебно-методической, научно-методической, организационно-методической работы и работы по повышению квалификации выполняются преподавателями по их индивидуальным планам, ежегодно составляемым на предстоящий учебный год и оформляемым на типовом бланке установленного образца.

Индивидуальный план регламентирует работу преподавателя по выполнению его должностных обязанностей и включает все виды работ, порученных ему заведующим отделением. Он составляется на основе планируемых работ отделения на очередной учебный год и конкретных заданий по отдельным направлениям, включенных в план-график работы преподавателя в соответствии с рекомендуемыми нормами времени, оформленный как приложение к заключенному трудовому договору между ним и ректором университета.

Цель работы – автоматизация процесса формирования индивидуального плана преподавателя для

учебных заведений среднего профессионального образования за счет разработки автоматизированной информационной системы (АИС) «Индивидуальный план преподавателя СПО» на примере Многопрофильного колледжа ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». АИС «Индивидуальный план преподавателя СПО», предназначенная для создания и заполнения индивидуальных планов преподавателями, проверке их методистами и корректировке заведующими отделений, значительно упростила работу и сэкономит время каждого, что в современном мире является актуальным.

Функциональные задачи, реализуемые АИС «Индивидуальный план преподавателя СПО»:

- составление индивидуального плана преподавателя на начало учебного года;
- формирование итогового индивидуального плана преподавателя на конец учебного года;
- составление отчетов для методистов, заведующих отделениями, заместителя директора по учебно-методической работе о заполнении и выполнении индивидуальных планов преподавателей Многопрофильного колледжа на начало и конец учебного года;
- формирование отчетов для руководства о заполнении индивидуальных планов преподавателей Многопрофильного колледжа на начало и конец учебного года;
- вывод на печать всех видов отчетности по заполнению и выполнению индивидуального плана преподавателя СПО.

Для разработки АИС «Индивидуальный план преподавателя СПО» использовались web-инструменты, а именно, язык гипертекстовой разметки html, язык гипертекстового препроцессора php, формальный язык описания внешнего вида документа css, прототипно-ориентированные сценарные языки javascript и ajax. Для хранения информации использовалась СУБД MySQL. База данных содержит 28 сущностей, физическая модель данных представлена на рис. 1. При ее проектировании все отношения были приведены к третьей нормальной форме Бойса - Кодда.

Доступ к АИС «Индивидуальный план преподавателя СПО» возможен с любого персонального компьютера с помощью Web-приложения в Intranet Многопрофильного колледжа. АИС «Индивидуальный план преподавателя СПО» построена на клиент-серверной архитектуре, подразумевающей разделение на две программные части: серверную и клиентскую. Серверная часть приложения размещена на файловом сервере.

В процессе работы программные оболочки, запускаемые пользователями на своих компьютерах, обращаются за данными к серверу системы. Сервер непосредственно считывает документы из базы данных, обрабатывает их нужным образом и передает их программной оболочке, где полученные данные отображаются в интерфейсе пользователя. Многие ресурсоемкие операции, такие, как, скажем, поиск документов, выполняются также на сервере [5].

Клиентская часть подразделяется на три вида пользователей: преподаватели, заведующие отделениями, методист. На рис. 2 представлены доступные функции пользователей с помощью диаграммы последовательности.

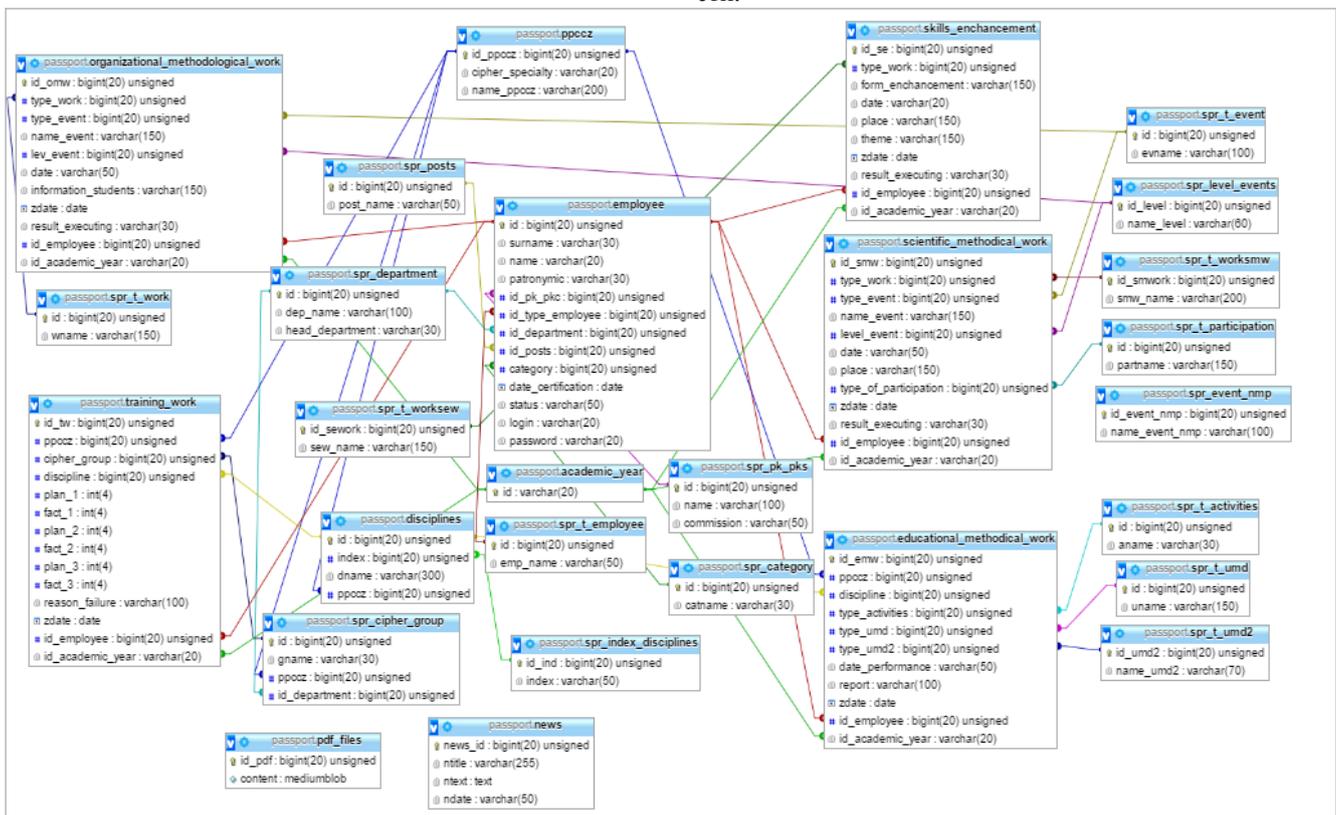


Рис. 1. Физическая модель базы данных

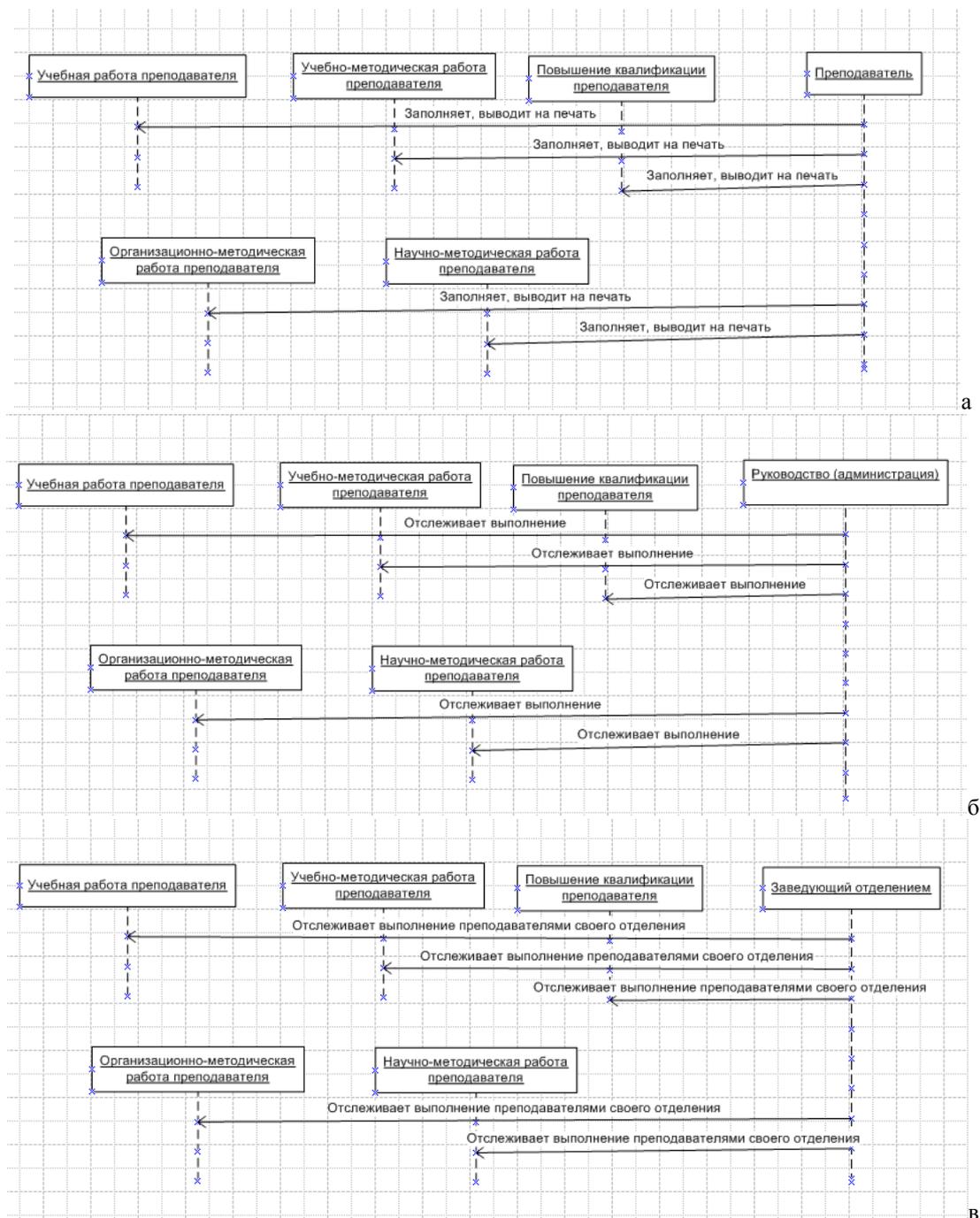


Рис. 2. Функции пользователей клиентской части:
а – преподаватель, б – методист,
в – заместитель директора по учебно-методической работе

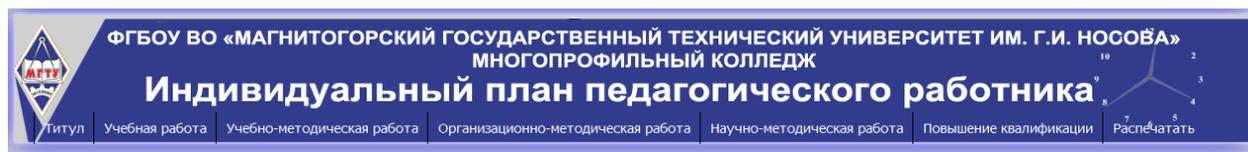


Рис. 3. Фрагмент интерфейса АИС «Индивидуальный план преподавателя СПО»

Реализация проекта

Для входа в систему необходимо в Web-браузере в адресной строке ввести ip-адрес файлового сервера Многопрофильного колледжа.

Интерфейс АИС «Индивидуальный план препода-

вателя СПО» выполнен в соответствии с информационной политикой ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова», отвечает концепции фирменного стиля и содержит атрибуты бренда. Фрагмент интерфейса с панелью «Меню» представлен на рис. 3.

На главной странице АИС возможен доступ к организационно-методическим материалам Многопрофильного колледжа текущего учебного года, которые хранятся в базе данных в формате .pdf, к новостной ленте, календарю и формы авторизации пользователей. Для работы с индивидуальным планом необходимо на данной странице выбрать академический год и его период, на который преподаватель будет заполнять индивидуальный план.

Заполнение индивидуального плана происходит в шесть этапов. На каждом этапе в соответствии с пунктами «Меню» пользователь заполняет следующие

виды форм: титульный лист (этап 1, рис.4), учебная работа (этап 2, рис.5), учебно-методическая работа (этап 3, рис.6), организационно-методическая работа (этап 4, рис.7), научно-методическая работа (этап 5, рис.8) и повышение квалификации (этап 6, рис.9). Каждый этап сопровождается печатью заполненных форм с видами работ индивидуального плана преподавателя. В соответствии с политикой конфиденциальности каждый преподаватель имеет доступ только к своему индивидуальному плану.

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова"
Многопрофильный колледж

РЕКОМЕНДОВАНО К УТВЕРЖДЕНИЮ:
Заведующий отделением
Отделение №1 Информационные
технологии и автоматизация
технологических процессов
Загора О.Н. / _____
_____ 20__ г.

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора по УМР
Федосеева Ю.В. / _____
_____ 20__ г.

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ПЛАН РАБОТЫ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО РАБОТНИКА
Загора Олег Николаевич, преподаватель, первой категории, штатный
на 2016/2017 учебный год

План рассмотрен на заседании отделения:
Протокол № ____ от _____

Методист _____ / _____
_____ 20__ г.

Председатель ПЦК Зорина И.Г. / _____
_____ 20__ г.

Педагогический работник
Загора Олег Николаевич / _____
_____ 20__ г.

Выполнение плана за первый семестр
рассмотрено на заседании отделения:
Протокол № ____ от _____

Выполнение плана за учебный год
рассмотрено на заседании отделения:
Протокол № ____ от _____

Педагогический работник
Загора Олег Николаевич / _____
_____ 20__ г.

Рис. 4. Фрагмент титульного листа, подготовленного к печати

Шифр специальности: 09.02.03

Учебный предмет: Моделирование и анализ пр

Добавить новый предмет

Индекс учебной группы: ППр-12-1у

Первый семестр: План: 136

Второй семестр: План: 2

Подтвердить Очистить

Версия для печати

Таблица: Учебная работа

№	Шифр специальности	Индекс уч. дисциплины (ПМ,МДК)	Наименование уч. дисциплины(ПМ,МДК)	Группа	Первый семестр		Второй семестр		Учебный год		
					План	факт	План	Факт	План	Факт	
75	09.02.03	МДК 01.01	Системное программирование	ППр-14-1	80		85		165		Удалить
76	09.02.03	МДК 01.01	Системное программирование	ППр-14-1	80		84		164		Удалить
77	09.02.03	УП.03.01	03.01 Учебная практика	ППр-14-1	0		36		36		Удалить
78	09.02.03	МДК 01.01	Системное программирование	ППр-13-2	62		0		62		Удалить
100	09.02.03	МДК 01.01	Системное программирование	ППр-13-1	62		0		62		Удалить
101	09.02.03у	МДК 04.01	Модерирование и анализ программного обеспечения	ППр-12-1у	136		2		138		Удалить

Рис.5. Фрагмент формы заполнения учебной работы

Шифр специальности: 09.02.03

Учебный предмет: Моделирование и анализ пр

Вид деятельности: актуализация

Вид учебно-метод. документации: Рабочая программа профес

Срок исполнения: сентябрь 2016

Тип УМД: Электронный образовательн

Подтвердить Очистить

Версия для печати

Таблица: Учебно-методическая работа

№	Шифр специальности	Индекс уч. дисциплины (ПМ,МДК)	Наименование уч. дисциплины (ПМ,МДК)	Вид деятельности	Вид УМД	Тип УМД	Срок исполнения	
32	09.02.03	МДК 01.01	Системное программирование	актуализация	Рабочая программа профессионального модуля		сентябрь 2016	Удалить
38	09.02.03у	МДК 04.01	Модерирование и анализ программного обеспечения	корректировка	Рабочая программа профессионального модуля		сентябрь 2016	Удалить
39	09.02.03у	Т.04.02.01	Разработка проекта и управление его предметной областью	корректировка	Рабочая программа профессионального модуля		сентябрь 2016	Удалить
40	09.02.03у	МДК 05.01	Внедрение и поддержка программного обеспечения компьютерных систем	корректировка	Рабочая программа профессионального модуля		сентябрь 2016	Удалить

Рис. 6. Фрагмент формы заполнения учебно-методической работы

№	Вид деятельности	Вид мероприятия	Название мероприятия	Уровень мероприятия	Дата	Информация о студентах
29	Организация	Неделя специальности	Олимпиада по программированию	колледжный		10
30	Подготовка	Олимпиада	XVI региональный конкурс по информационным технологиям «IT – отращивание талантов» «Программирование, оный тур	региональный		2
31	Подготовка	Олимпиада	XVI региональный конкурс по информационным технологиям «IT – отращивание талантов» «Компьютерная графика и дизайн в системе Adobe Photoshop, заочный тур	региональный		1
33	Участие	Конкурс	II Всероссийский конкурс по базам данных с использованием инструментальных средств программирования на базе ФГОУ ВО	всероссийский		1

Рис. 7. Фрагмент формы заполнения организационно-методической работы

№	Вид деятельности	Вид мероприятия	Наименование	Уровень мероприятия	Дата	Место	Вид участия
30	участие	работа ПДК	Участие в работе ПДК	колледжный			очное
34	публикация	научно-практическая конференция	подготовка и публикация статьи	всероссийский			очное

Рис. 8. Фрагмент формы заполнения научно-методической работы

№	Форма повышения	Дата	Место	Тема
10	Участие в мероприятиях системы внутриколледжного обучения	октябрь	ваов	ваивирике

Рис. 9. Фрагмент формы заполнения повышения квалификации

Формирование отчетов о выполнении индивидуальных планов преподавателями выполняет заместитель директора по учебно-методической работе или методист. Для каждого этапа заполнения индивидуального плана преподавателя в левой части экрана существует форма для фильтрации индивидуальных планов (рис. 10). Форма для фильтрации содержит такие же выпадающие списки, что и форма для заполнения. Заведующий отделением имеет доступ к индивидуальным планам преподавателей, закрепленных на отделении, руководимым им.

Заключение

Первая версия АИС «Индивидуальный план преподавателя СПО» проходит апробацию с 1 сентября 2016 года и является действующей системой в настоящее время, что значительно сократило время, затраченное на заполнение индивидуального плана преподавателя, снизило количество ранее допущенных ошибок при заполнении, унифицировало общую форму бланков индивидуального плана. Все необходимые отчеты заведующих отделениями, методистов и заместителя директора по учебно-методической работе, ранее выполняемые на бумажных носителях, систематизированы и автоматически формируются в электронном виде в соответствии с их запросами, и в последующем выводятся на печать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научный форум. Информационные технологии в развитии современного информационного общества / [Электронный ресурс] <http://nauchforum.ru-studconf/tech/xxiii/6944> (дата обращения: 17.10.2016).
2. Появление и развитие информационных технологий / [Электронный ресурс] http://studopedia.ru/11_95826_poyavlenie-i-razvitiye-informatsionnih-tehnologiy.html (дата обращения: 20.10.2016)
3. Богатырева Ю.И., Косарев П.А. Лекция 4. Использование информационных и коммуникационных технологий в образовании / [Электронный ресурс] <http://tsput.ru/res/informat/aosit/Lecture4.htm> (дата обращения: 21.10.2016)
4. Козловских Е.В. Проблемы информатизации образования на современном этапе / [Электронный ресурс] <http://nsportal.ru/shkola/materialy-metodicheskikh-obedineniy/library/2013/01/22/problemy-informatizatsii-obrazovaniya> (дата обращения: 22.10.2016)
5. Система ГАРАНТ. Платформа F1. Сетевая клиент-серверная версия / [Электронный ресурс] <http://www.garant29.ru/index.php/produkty-i-uslugi/novejshie-tehnologii/tekh-nologiya-klient-server.html> (дата обращения: 12.11.2016)

Выберите фильтры:

Шифр специальности:

Учебный предмет:

Индекс учебной группы:

- A-15-1
- A-15-2**
- ДжК-15-1
- ДжК-16-1
- ЭжК-15-1
- ЭжК-15-5
- ЭжК-16-1
- ЭжК-16-5
- ЭжКр-16-1
- Кс-15-1
- Кс-15-2
- М-15-1
- М-15-2
- МА-13-1
- МА-14-1
- Мс-15-1
- Мас-15-1
- ММ-13-1
- ММ-14-1
- ММ-14-2

а

Таблица: Учебная работа													
№	Фамилия	Имя	Отчество	Шифр специальности	Индекс уч. дисциплины(ПМ,МДК)	Наименование уч. дисциплины(ПМ,МДК)	Группа	Первый семестр		Второй семестр		Учебный год	
								План	Факт	План	Факт	План	Факт
572	Риве	Юлия	Анатольевна	15.02.07	ОГСЭ.05	Русский язык и культура речи	A-15-2	48		0		48	
1011	Камчатная	Наталья	Анатольевна	15.02.07	ОГСЭ.01	Основы философии	A-15-2	48		0		48	
1068	Кучерова	Наталья	Викторовна	15.02.07	ЕН.03	Информационное обеспечение профессиональной деятельности	A-15-2	0		60		60	
1135	Маликова	Марина	Николаевна	15.02.07	ОГСЭ.02	История	A-15-2	48		0		48	
1524	Степанова	Татьяна	Александровна	15.02.07	ОП.05	Материаловедение	A-15-2	64		50		114	
1815	Корчагина	Марина	Николаевна	15.02.07	ОП.08	Вычислительная техника	A-15-2	0		150		150	
1838	Сальникова	Марина	Велловна	15.02.07	ОГСЭ.03	Иностранный язык	A-15-2	32		40		72	
2483	Тарасова	Ольга	Александровна	15.02.07	ОП.01	Инженерная графика	A-15-2	64		40		104	
2625	Ершова	Лидия	Ивановна	15.02.07	ПМ.06	Выполнение работ по профессии Слесарь по контрольно-измерительным приборам и автоматике	A-15-2	0		102		102	
2689	Трубина	Ирина	Николаевна	15.02.07	ОП.04	Охрана труда	A-15-2	0		40		40	
3026	Ложкин	Игорь	Александрович	08.02.09	ОП.03	Электротехника	A-15-2	87		60		147	
3037	Антропова	Наталья	Владимировна	15.02.07	ЕН.01	Математика	A-15-2	112		0		112	
3150	Перевалова	Ольга	Алексеевна	15.02.07	ОП.03	техническая механика	A-15-2	0		93		93	

б

Рис. 10. Составление отчета:
а – выбор фильтра; б – результат выполнению фильтра

AUTOMATED INFORMATION SYSTEM «INDIVIDUAL PLAN THE OF VOCATION EDUCATION OF EDUCATOR»

Fedoseeva Yu.V.¹, Zorina I.G.², Tutarova V.D.³, Azerskaya A.V.⁴
1,2,3,4 Nosov Magnitogorsk State Technical University, Multiprofile college

Abstract. The article describes the development of the automated information system "Individual plan of the educator of Vocational Education", which automate the process of making an individual plan of the educator of Vocational Education. The introduction of this system significantly reduces educators time when completing an individual plan, reduces the number of errors when filling out and the standardized forms of the individual plan.

Keywords: automated information system, vocational education, individual plan, educator.

REFERENCES

1. Nauchnii forum. Informachionnie tehnologii v razvitii sovremennogo informachionnogo obschestva / [elektronnii resurs] URL: <http://nauchforum.ru/stud-conf/tech/xxiii/6944> (accessed 17 October 2016)
2. Poyavlenie i razvitie informachionnih tehnologij / [elektronnii resurs] URL: http://studopedia.ru/11_95826_poyavlenie-i-razvitie-informatsionnih-tehnologiy.html (accessed 20 October 2016)
3. Bogatireva Yu.I., Kosarev P.A. Lekciya 4. Ispol'zovanie informachionnih i kommunikachionnih tehnologij v obrazovanii / [elektronnii resurs] URL: <http://tspu.ru/res/informat/aosit/Lecture4.htm> (accessed 21 October 2016)
4. Kozlovskih E.V. Problemi informatizatsii obrazovaniya na sovremennom etape / [elektronnii resurs] URL: <http://nsportal.ru/shkola/materialy-metodicheskikh-obedinenii/library/2013/01/22/problemy-informatizatsii-obrazovaniya> (accessed 22 October 2016)
5. Sistema GARANT. Platforma F1. Setevaya klient-servernaya versiya / [elektronnii resurs] URL: <http://www.garant29.ru/index.php/produkty-i-uslugi/noveshie-tehnologii/tehnologiya-klient-server.html> (accessed 12 November 2016)

УДК 62-50:004.057.8

ПОСТРОЕНИЕ КРОССПЛАТФОРМЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О РАБОТЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

П.А. Никишечкин¹, И.А. Ковалев², А.С. Григорьев³, А.Н. Никич⁴

^{1,2,3,4}ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва, Россия

¹pnikishechkin@gmail.com

Аннотация. В статье представлены теоретические аспекты разработки решения для сбора диагностической информации о работе технологического оборудования, ее обработки и передачи на более высокие уровни управления предприятием. Предложена структура построения кроссплатформенного решения, позволяющего повысить уровень информатизации для построения современных промышленных предприятий.

Ключевые слова: автоматизация технологических процессов, информатизация, сбор данных, контроллер, числовое программное управление, ЧПУ.

Сбор информации с производственных участков, где происходят различные технологические операции, является важной и необходимой задачей для современного производства [1,2]. С помощью полученных данных можно отслеживать не только различные диагностические данные (ошибки и предупреждения систем ЧПУ, температура, вибрации в зоне резания, износ инструмента и т.д.), но и информацию о производительности оборудования и работе его оператора (например, моточасы станка). Все это напрямую связано с экономическими показателями как отдельно взятого участка, цеха, так и всего предприятия, поскольку позволяет оперативно реагировать на внештатные ситуации, а также повышать производительность работы путем оптимизации технологических процессов [3-5].

В настоящее время технологические производства представляют из себя автоматизированные ячейки по выполнению различных производственных операций. Зачастую один оператор может обслуживать до 5 станков, на которых ему необходимо следить за технологическим процессом. При этом операторов на линии может быть более 20, управляемых технологических единиц – более 100 (на больших машиностроительных предприятиях – «Уралвагонзавод», «КЭМЗ», «АвтоВАЗ» - более 1000). В настоящее время существует тенденция перехода предприятий к построению производства по типу «Индустрия 4.0». Сложностью такого подхода может являться тот факт, что затруднено получение диагностических данных со всех технологических устройств одновременно. Стоит учесть, что на производстве может стоять гетерогенное оборудование различных производителей. Системы управления данных технологических единиц способны отдавать в сеть диагностические данные. Одной из задач проведения данного исследования является систематизированный

сбор обработка гетерогенной информации в одну базу данных [6].

Проведенный анализ показал, что аналогов разрабатываемого продукта на внутреннем рынке нет. Конкуренция с зарубежными решениями избегается путем попадания в другую ценовую категорию, а также из-за того факта, что большинство зарубежных разработок представляют из себя проприетарное программное обеспечение.

Информацию с технологического оборудования можно получать как непосредственно на самой линии, так и в компьютерной сети производственного цеха (если таковая имеется), где данные будут передаваться по протоколам сетевого взаимодействия [7-10]. Совокупность большого количества технологического оборудования от различных производителей затрудняет процессы мониторинга их функционирования и усложняет процесс передачи технологической информации на более высокие уровни производства (рис. 1).

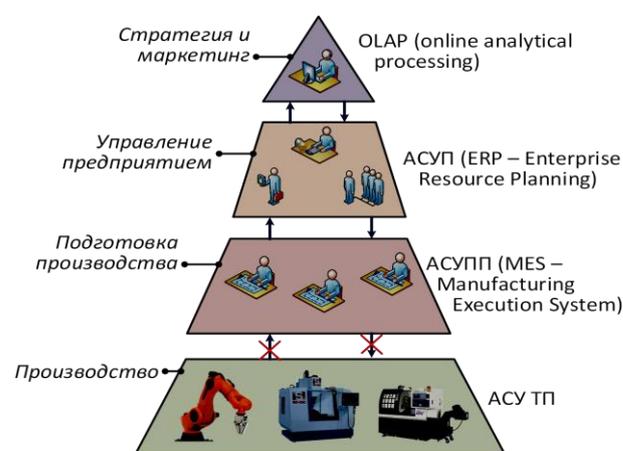


Рис. 1. Уровни построения современного цифрового производства

В работе для достижения поставленной цели предлагается создание решения в виде кроссплатформенного программно-реализованного контроллера, способного реализовывать сбор и обработку данных с разнородного технологического оборудования. Программно-реализованные контроллеры имеют ряд преимуществ перед стандартными аппаратными решениями, такими как гибкость настройки, низкая цена, возможность оперативной модернизации [11-12]. Общая структура построения предлагаемого решения показана на рис. 2 и может представлять собой как автономное решение, способное передавать в сеть различные диагностические данные, так и встроенное в систему управления более высокого уровня, например, систему ЧПУ.

Основная реализация предлагаемого решения лежит на прикладном уровне, и представляет собой

программно-вычислительный модуль, позволяющий подключаться к оборудованию различных типов, используя наиболее известные протоколы связи (EtherCAT, SERCOS, CANBus), и агрегировать информацию в единый Web сервер, откуда информация будет передаваться на более высокие уровни производства (SCADA, MES, удаленные клиенты).

На рис 3 представлена архитектура построения основных модулей предлагаемого решения. В центральной части представлена реализация главного вычислительного модуля – ядра решения, функционирующего в режиме реального времени и осуществляющего сбор данных с оборудования различных видов. Данный модуль взаимодействует с терминальными клиентами, а также с аппаратными средствами автоматизации.

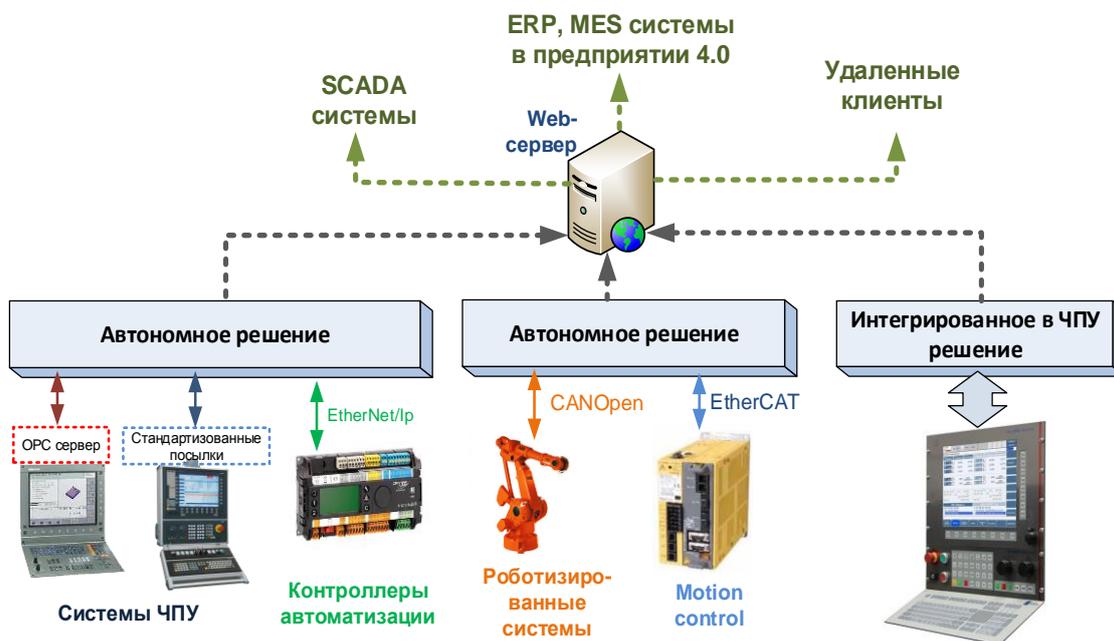


Рис. 2. Общий принцип функционирования предлагаемого решения



Рис. 3. Архитектура построения основных модулей предлагаемого решения

Основной задачей главного вычислительного модуля (ядра) решения является сбор данных в режиме реального времени с оборудования различных видов по различным промышленным протоколам связи (SERCOS, EtherCAT, CANBus). Для поддержки указанных протоколов связи была разработана собственная библиотека, реализующая единый универсальный интерфейс взаимодействия с аппаратными модулями. За счет внедрения подобных уровней абстракции реализуется гибкость, универсальность решения и возможность использования его с набором управляющего оборудования от различных производителей, что зачастую наблюдается на отечественных предприятиях даже в пределах одного цеха.

Что касается внутренней реализации ядра предлагаемого решения, то оно выполнено в соответствии с модульным подходом и его можно представить в виде следующих основных компонентов: терминальный модуль верхнего уровня пользовательского пространства, связующий клиенты НМИ со структурами основных модулей ядра контроллера, математический модуль, где происходят основные вычисления (реализует также задачи логическую и диспетчеризации, модуль кроссплатформенности, модуль драйверов, функционирующий в адресном пространстве выбранной ОС. Данные модули реализованы на языке C++ с использованием методов объектно-ориентированного программирования. Оборудование для автоматизации, такое как системы ЧПУ, ПЛК, сервоприводы от различных производителей обычно предоставляют определенный ограниченный набор диагностической информации, по которой можно определять текущий статус и состояние его работы. На текущий момент производится адаптация решения к работе с системами ЧПУ NCT201 (NCT, Венгрия), Fanuc0i (Fanuc, Япония), а также сервоприводами IntDrive (Bosch Rexroth) и DS (NCT, Венгрия) и получению с них диагностических данных. Соответственно, перед использованием предлагаемого решения в штатном терминальном клиенте необходимо создать конфигурацию подключенного оборудования для его корректной идентификации и работы с ним.

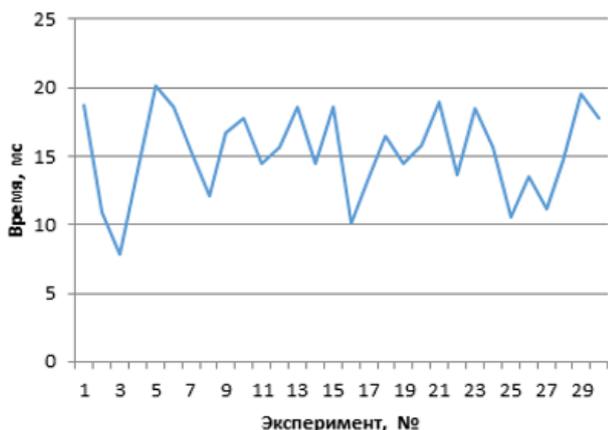
Помимо этого, одним из важных особенностей при разработке вычислительного ядра предлагаемого решения является его кроссплатформенность, как на системном, так и аппаратном уровнях. Это позволяет

использовать различную базу его построения и встраивать его в различные уже функционирующие системы. На системном уровне за счет использования кроссплатформенных библиотек, мьютексов, таймеров и функций-оберток и механизмов разделяемой памяти реализована возможность работы на различных операционных системах: семейства Windows, ОС на базе Linux, а также расширением систем Windows – систем RTX от компании Interval Zero [14-15]. Кроссплатформенность на системном уровне позволяет производить портирование модуля и на различные аппаратные платформы - реализована возможность работы главного модуля на процессорах различной архитектуры: x86 (Intel, AMD) или ARM, включая отечественные решения (Эльбрус 4С, Байкал-Т, М). Это позволяет использовать модуль как на персональных компьютерах, так и на одноплатных компьютерах, и строить независимые компактные устройства для автоматизации технологических процессов, с возможностью удаленного управления и доступа к данным, что является важным фактором при построении умных производств.

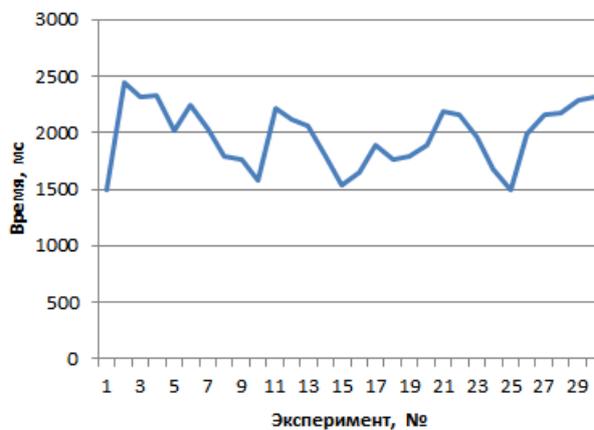
Программная реализация связи с терминальными клиентами (НМИ) реализуется по стандартным протоколам TCP/IP и функционирует на уровне пользовательского пространства операционной системы, а взаимодействие с внешними устройствами реализуется в базовом адресном пространстве используемой операционной системы (на уровне драйверов). Таким образом разграничивается нагрузка на вычислительные мощности платформы исполнения между задачами обработки информации с использованием стандартных протоколов связи и общение с терминальными клиентами [13].

Таким образом, при выбранном подходе возможно решать следующие задачи:

- объединение разнородного оборудования в единое информационное пространство;
- мониторинг состояния работы оборудования;
- сбор информации о производительности оборудования и оператора;
- оперативное реагирование на внештатные ситуации;
- прогнозирование возможных аварийных ситуаций;
- возможность передачи информации о производстве на верхние уровни предприятия (соответствие концепции развития Индустрия 4.0);
- минимизация времени простоя оборудования.



а)



б)

Рис. 4. Тестовые испытания опроса элементов устройств в сети: а) 100 элементов; б) 1500 элементов

Практическая реализация и использование представленного решения на промышленных предприятиях позволят получить новый способ сбора и обработки информации с линии станков и другого технологического оборудования с использованием отечественных аппаратных и программных компонентов. Реализация принципов кроссплатформенности в решении позволит снизить, а в будущем и вовсе исключить зависимость от иностранных компонентов и тем самым обеспечить технологическую и информационную безопасность отечественных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martinov G.M. An Approach to Building a Multiprotocol CNC System / G.M. Martinov, A.B. Lyubimov, A.I. Bondarenko, A.E. Sorokoumov, I.A. Kovalev // Automation and Remote Control. – 2015 - Vol. 76, No. 1. – P. 172-178.
2. Martinov G.M. Real-Time Diagnosis and Forecasting Algorithms of the Tool Wear in the CNC Systems / G.M. Martinov, A.S. Grigoryev, P.A. Nikishechkin // Advances in Swarm and Computational Intelligence. – 2015 – Vol.9142. – P. 115-126.
3. Козак Н.В. Реализация логической задачи ЧПУ и задачи производственной безопасности на основе внешних вычислительных модулей Soft PLC / Н.В. Козак, Р.А. Абдуллаев, И.А. Ковалёв, Н.Ю. Червонова // Автоматизация в промышленности. – 2016. - №5. – С. 28-30.
4. Никишечкин А.П. Теоретические аспекты разработки программного комплекса для автоматизированной установки операционной системы реального времени "АxiOMA RTOS" / А.П. Никишечкин, Р.Л. Пушков, А.Н. Никич // Вестник МГТУ "Станкин". – 2016. - №3. - С. 78-81.
5. Абдуллаев Р.А. Практические аспекты реализации управления разнородным технологическим оборудованием электроавтоматикой в системах ЧПУ / Р.А. Абдуллаев // Вестник МГТУ "Станкин". – 2013. - №1(24). - С. 52-55.
6. Мартинов Г.М. Формирование базовой вычислительной платформы ЧПУ для построения специализированных систем управления / Г.М. Мартинов, Л.И. Мартинова // Вестник МГТУ "Станкин". – 2014. - №1(24). - С. 92-97.
7. Мартинов Г.М. Принципы построения кроссплатформенного программно-реализованного контроллера электроавтоматики систем ЧПУ высокотехнологичными производственными комплексами / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, А.С. Емельянов // Вестник МГТУ "Станкин". – 2013. - №1(24). - С. 42-51.
8. Мартинов Г.М. Принцип построения распределенной системы ЧПУ с открытой модульной архитектурой / Г.М. Мартинов, Н.В. Козак, Р.А. Нежметдинов, Р.Л. Пушков // Вестник МГТУ "Станкин". – 2010. - №4(12). - С. 116-122.
9. Григорьев С.Н. Система ЧПУ: современные вызовы, информационная и технологическая безопасность / С.Н. Григорьев, Г.М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. – 2016. - №5. - С. 3-5.
10. Мартинов Г.М. Разработка средств визуализации и отладки управляющих программ для электроавтоматики, интегрированных в систему ЧПУ / Г.М. Мартинов, Р.А. Нежметдинов, П.А. Никишечкин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2012. - №4(23). - С. 134-138.
11. Grigoriev S.N. An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines / S.N. Grigoriev, G.M. Martinov // 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. – Chemnitz, Germany: Procedia CIRP, 2016. – Vol. 46. – P. 525–528.
12. Мартинов Г.М. Построение специализированной системы ЧПУ для пятикоординатного строгально-фрезерного обрабатывающего центра / Г.М. Мартинов, Н.В. Козак // СТИН. – 2015. - №8. - С. 2-6.
13. Пушков Р.Л. Разработка программного комплекса для автоматизированной установки операционной системы реального времени «АxiOMA RTOS» / Р.Л. Пушков, С.В. Рыбников, А.Н. Никич // Труды XVI-ой международной молодежной конференции "Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2016). Под ред. А.В. Толока. – Москва: ООО «Аналитик», 2016. – С. 177-181.
14. Григорьев С.Н. Проблемы, тенденции и перспективы развития систем числового программного управления технологических систем и комплексов / С.Н. Григорьев, Г.М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. - 2013. - № 5. - С. 4-7.
15. Мартинов Г.М. Построение специализированной системы ЧПУ для пятикоординатного строгально-фрезерного обрабатывающего центра / Г.М. Мартинов, Н.В. Козак // СТИН. - 2015. - №8. - С. 2-6.

RESEARCH AND DEVELOPMENT A CROSS-PLATFORM SYSTEM FOR THE COLLECTION AND PROCESSING OF DIAGNOSTIC INFORMATION ABOUT WORKING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES

P.A. Nikishechkin¹, I.A. Kovalev², A.S. Grigoryev³, A.N. Nikich⁴
^{1,2,3,4}Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

Abstract. The article presents the theoretical aspects of the development of solutions for the collection of diagnostic information about the process equipment operations, processing and transmission to higher levels of enterprise management. The structure of the construction of a cross-platform solution that enables to increase the level of information for the construction of modern industrial enterprises.

Keywords: technological-process automation, IT, data acquisition, controller, computer numerical control, CNC.

REFERENCES

1. Martinov G.M. An Approach to Building a Multiprotocol CNC System / G.M. Martinov, A.B. Lyubimov, A.I. Bondarenko, A.E. Sorokoumov, I.A. Kovalev // Automation and Remote Control. – 2015 - Vol. 76, No. 1. – P. 172-178.
2. Martinov G.M. Real-Time Diagnosis and Forecasting Algorithms of the Tool Wear in the CNC Systems / G.M. Martinov, A.S. Grigoryev, P.A. Nikishechkin // Advances in Swarm and Computational Intelligence. – 2015 – Vol.9142. – P. 115-126.
3. Kozak N.V. Implementation of logical CNC tasks and manufacturing safety problems on the basis of external computing modules Soft PLC / N.V. Kozak, R.A. Abdullaev, I.A. Kovalev, N.Y. Chervonnova // Automation in the industry. - 2016. - №5. - Page 28-30.
4. Nikishechkin A.P. Theoretical aspects of the development software for automated installation of the real time operating system "AxiOMA RTOS" / A.P. Nikishechkin, R.L. Pushkov, A.N. Nikich // Vestnik MSTU "STANKIN". - 2016. - №3. - Page 78-81.
5. R.A. Abdullayev Practical aspects of implementing management heterogeneous technological equipment electroautomatics in CNC systems / RA systems Abdullayev // Vestnik MSTU "STANKIN". - 2013. - №1 (24). – Page 52-55.
6. Martinov G.M. Forming the base CNC computing platform for building a specialized control systems /G.M. Martinov, L.I. Martinova // Vestnik MSTU "STANKIN". - 2014. - №1 (24). - Page 92-97.
7. Martinov G.M. Principles of building cross-platform software-implemented controller CNC systems with high-tech industrial complexes / G.M. Martinov, R.A. Nezhmetdinov, A.S. Emelyanov // Vestnik MSTU "STANKIN". - 2013. - №1 (24). - Page 42-51.
8. Martinov G.M. Principle of building distributed CNC system with open modular architecture / G.M. Martinov, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov, R.L. Pushkov // Vestnik MSTU "STANKIN". - 2010. - №4 (12). - Page 116-122.
9. Grigoriev S.N. CNC system: modern challenges, information and technological security / S.N. Grigoriev, G.M. Martinov // Automation in the industry. - 2016. - №5. - Page 3-5.
10. Martinov G.M. Development of visualization and debugging of control programs for electroautomatics integrated in the CNC system / G.M. Martinov, R.A. Nezhmetdinov, P.A. Nikishechkin // Vestnik MSTU "STANKIN". - 2012. - №4 (23). - Page 134-138.
11. Grigoriev S.N. An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines / S.N. Grigoriev, G.M. Martinov // 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. – Chemnitz, Germany: Procedia CIRP, 2016. – Vol. 46. – P. 525–528.
12. G.M. Martinov, N.V. Kozak Specialized Numerical Control System for FiveAxis Planing and Milling Center // Russian Engineering Research, 2016, Vol. 36, No. 3, pp. 218–222.
13. Pushkov R.L. Development of software package for the automated installation a real-time operating system «AxiOMA RTOS» / R.L. Pushkov, S.V. Rybnikov, A.N. Nikich // Proceedings of the XVI-th international youth conference "Systems design, technological preparation of production and management phases of industrial product life cycle (CAD/CAM/PDM - 2016).– Moscow, 2016. – P. 177-181.
14. Grigoriev S.N. Problems, trends and prospects of development CNC and technological complexes / S.N. Grigoriev, G.M. Martinov // Automation of Industry. - 2013. - № 5. - P. 4-7.
15. G.M. Martinov, R.A. Nezhmetdinov, A.U. Kuliev Approach to implementing hardware-independent automatic control systems of lathes and lathe-milling CNC machines //Izv.Vuz. Av. Tekhnika. 2016, no. 2, pp. 128–131.

УДК 621.313.2:681.513.7:004.896

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА ОТКЛИКА ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.В. Кожевников¹, В.Н. Волков²

^{1,2}ФГБОУ ВО «Череповецкий Государственный Университет»,
г. Череповец, Россия

¹kojevnikovav@chsu.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы и предлагаемый способ анализа отклика нейросетевой модели автоматизированных электроприводов постоянного тока, применяемых в производственных цепочках, требующих высокой точности поддержания скорости процессов. Кратко рассмотрен вопрос построения моделей, со ссылками на ранние работы, нерешенные задачи и предлагаемое их решение.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, прокатное производство, нейросетевая модель, машинное обучение, диагностика.

Актуальность работы

Автоматизированные средства современных электроприводов позволяют получать и сохранять набор всевозможных параметров состояния за длительные периоды времени. Анализ данных параметров дает возможность оценить качество технологического процесса и получить информацию о состоянии самого электропривода. Применение вычислительной техники позволяет построить модели для оценки динамики электропривода при использовании различных моделей. Одна из таких моделей была предложена авторами [1, 2] и в основе которой применение нейронной сети для построения модели автоматизированного электропривода. Основным достоинством данной модели является отсутствие необходимости знания внутренних параметров электропривода для ее построения. При этом на основании рассогласования отклика нейросетевой модели и отклика реального электропривода можно судить о нарушениях в состоянии электропривода. Однако оценка данного рассогласования и ее сопоставление с реальными неисправностями в работе электропривода требует дальнейшего исследования. В данной работе предложен вариант решения данной проблемы, который в настоящее время находится в разработке.

Основные проблемы и решения

Электропривод является динамическим объектом и его можно описать векторами входных и выходных данных, а также вектором состояния. Автоматизированный электропривод позволяет получить множества параметров внешних и внутреннего состояния, а также сохранить их временную последовательность. Это дает возможность разработать структуру и применить нейронную сеть [3, 4] для построения модели на основании имеющихся временных векторов. Согласно теореме об универсальной аппроксимации [3, 5], можно

построить нейросетевую модель любого нелинейного динамического объекта:

$$\bar{y}(n+1) = \varphi(\bar{y}(n), \dots, \bar{y}(n-q+1), \bar{u}(n), \dots, \bar{u}(n-q+1)), \quad (1)$$

Большое же количество данных, полученных средствами автоматизированного электропривода можно использовать для ее обучения на все виды переходных процессов. Предполагается, что модель обучается на изначально исправном электроприводе и будет давать отклик на входные данные соответственно тому, который дает исправный электропривод. Наиболее эффективный вариант нейронной сети, который учитывает динамическую природу процесса. На Рис.1 приведена структурная схема рекуррентной нейронной сети [5], которая использует выходные параметры в качестве обратных связей для учета динамики моделируемого объекта.

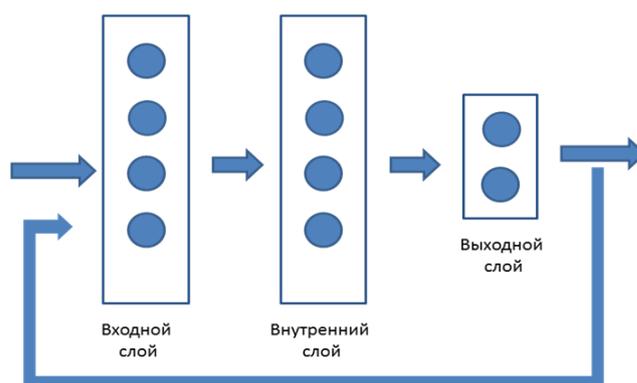


Рис.1. Структурная схема рекуррентной нейронной сети

В ряде работ подробно описан процесс обучения подобных нейросетевых моделей. При этом, до настоящего времени нет четких критериев по выбору структуры и способа обучения сети. Данная задача решается в каждом случае исследователями индивидуально [4, 5], экспери-

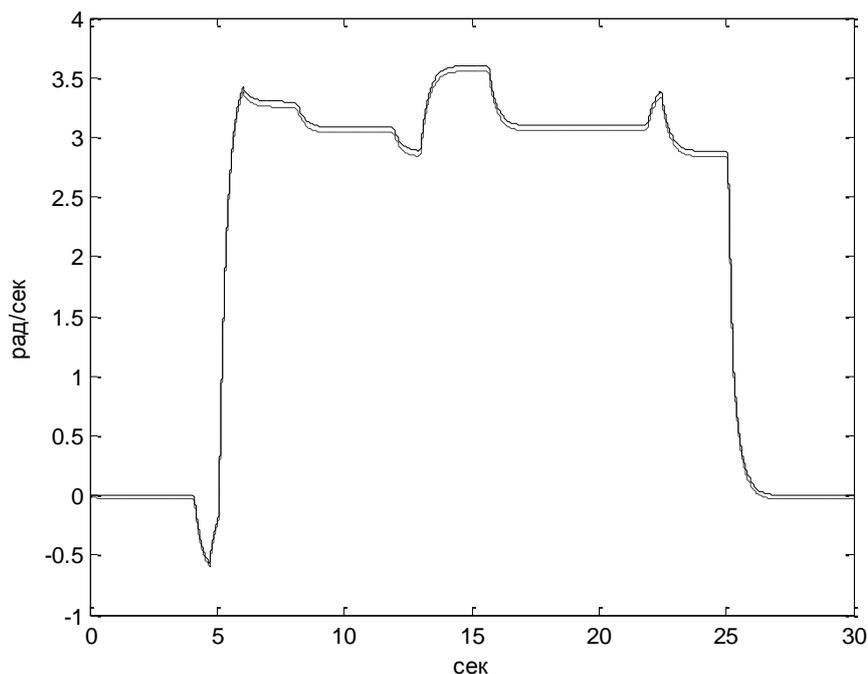


Рис.2 Переходные процессы автоматизированного электропривода и повторение его динамики обученной рекуррентной нейронной сетью на примере скорости W

ментальным подбором наиболее оптимальной структуры сети. При этом приходится рассмотреть множество вариантов при выборе количества слоев сети и количества нейронов. Кроме того, требуется подобрать структуру самих нейронов и выбрать способ обучения. Наиболее распространенные способы обучения, это применения метода обратного распространения ошибки или использование генетических алгоритмов. Отдельной и наиболее важной задачей является необходимость определить необходимые входные и выходные параметры, которые будут использованы для входов и выходов нейронной сети. Также, определенную трудность представляет выбор выходных параметров, которые можно использовать в качестве обратных связей. Авторами данной работы была разработана ранее структура нейросетевой модели [1, 2], повторяющая после обучения с высокой точностью динамику переходных процессов электроприводов прокатного стана. Был проведен ряд экспериментов с моделями в среде разработки Matlab, а также опробирована модель на характеристиках, снятых с реального двигателя постоянного тока. В качестве входного вектора данных использовались управляющее задание на силовую схему U_z , расчетный момент двигателя M и обратные связи по скорости W и току якоря I_a с единичной задержкой. В качестве выходных параметров модели, соответственно, использовались ток якоря I_a и скорость электродвигателя W без единичной задержки. На рис 2. приведен пример сопоставления динамики скорости реального электропривода (сплошной линией) и его обученной нейросетевой модели (пунктирная линия).

После получения достаточно точной модели были смоделированы нарушения в работе электропривода, такие как нарушение целостности якорной цепи, обмотки возбуждения и нарушения изоляции. При этом отклик по

скорости и току электродвигателя начинал давать отклонения, которые влияли на рост погрешности рассогласования суммарной динамики электропривода и модели. Расчет погрешности производился по формуле:

$$Err = \frac{1}{N} \sum_i^N (W_{neyr} - W_{drive})^2, \quad (2)$$

где Err – среднеквадратичное отклонение рад/с на каждой

итерации расчета, W_{neyr} – вектор изменения скорости нейросетевой модели, W_{drive} – вектор изменения скорости электропривода, N – размерность вектора.

Если в нормальном состоянии электропривода погрешность составляла порядка $Err = 2.4 \cdot 10^{-5}$, то при внесении даже небольших нарушений в параметры электропривода суммарная погрешность динамики резко возрастала до $Err = 3.8$.

Даже без последующей обработки, уже сами отклонения динамики параметров электропривода и его нейросетевой модели, даже при незначительных нарушениях во внутренней структуре электропривода, позволяют делать вывод о возможном зарождающемся дефекте или нарушении технологического процесса. Подобные изменения динамики не способна распознать встроенная система автоматического управления электроприводом, поскольку они видны только при сопоставительном анализе на всей динамике рассогласования с моделью.

Таким образом, нейросетевая модель может быть использована для слежения за состоянием промышленных электроприводов и помочь фиксировать нарушения в работе, которые только зарождаются.

Между тем остается открытым вопрос распознавания на данных отклонениях отдельных неисправностей.

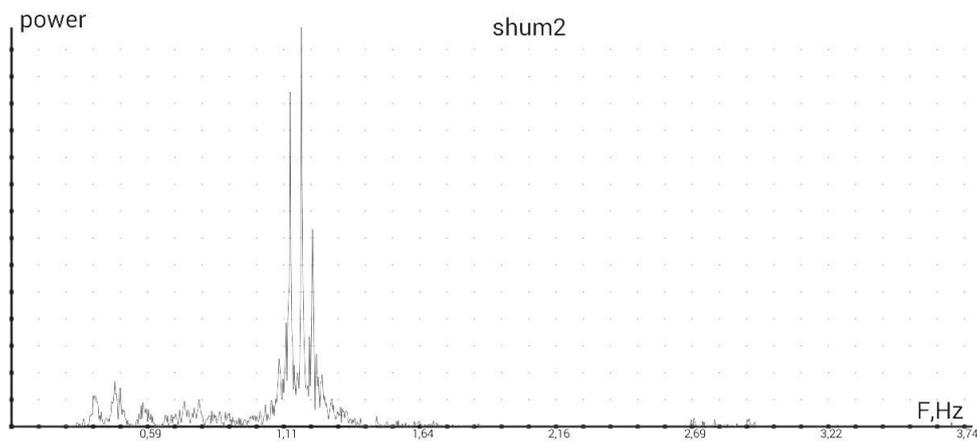


Рис.3. Спектр сигнала коэффициента k_4 вейвлет разложения

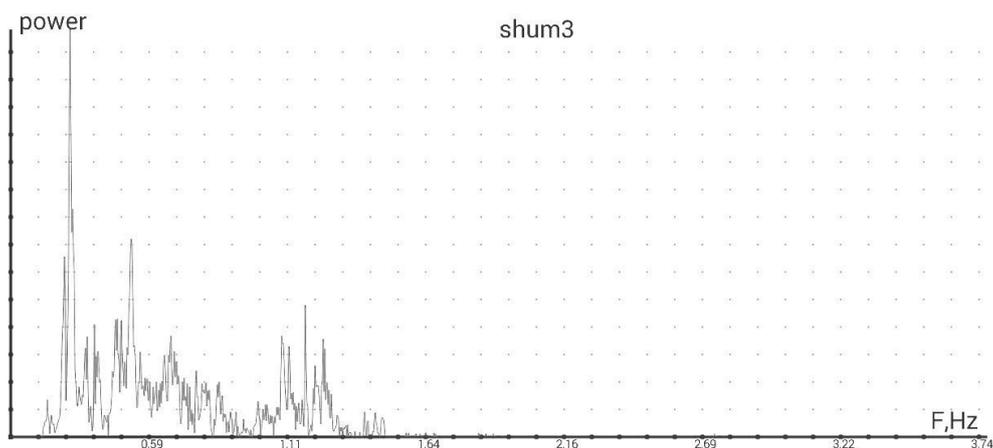


Рис.4. Спектр сигнала коэффициента k_5 вейвлет разложения

Анализ графиков рассогласования динамики во временной области не позволяет выявить конкретные нарушения. Даже при визуальном сопоставлении некоторые неисправности дают практически идентичные графики рассогласования на одинаковых переходных процессах.

В настоящее время ведется работа по разработке системы анализа отдельных отклонений в динамике рассогласования электропривода и его нейросетевой модели. Наиболее перспективными выглядят методы работы в частотной области [6, 7] в комбинации с методами машинного обучения при распознавании отдельных ситуаций. Один из классических подходов, который был опробован, применение дискретного преобразования Фурье [8] для анализа динамики рассогласования скоростей.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad (3)$$

где, $k = 0, \dots, N-1$ – количество отсчетов дискретного сигнала.

Однако, в чистом виде данный метод неэффективен для анализа на всей протяженности динамики, и при анализе сигнал рассогласования дает спектр, на котором множество гармонических составляющих, не несущих полезной информации.

Более перспективным выглядит предварительно применить вейвлет разложение сигнала [9]. Тогда

появляется возможность его анализа в частотно-временной области. В работе используется наиболее простое для реализации разложение – вейвлет Хаара. Применяется ряд фильтров для получения срезов на разных частотных диапазонах. Сигнал подается на низкочастотный фильтр и получается свертка:

$$y[n] = (x * g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[n-k]. \quad (4)$$

В результате разложения получают детализирующие коэффициенты и коэффициенты аппроксимации (высокочастотные и низкочастотные фильтры). Это дает возможность получить различные приближения сигнала с разрешением по времени и частоте.

Если далее к отдельным коэффициентам вейвлетам применить преобразование Фурье, то можно получить набор спектров для различных частотно-временных приближений. Таким образом, диапазон поиска можно разделить для определенных диапазонов соотношений временной и частотной областей.

В качестве примера можно рассмотреть преобразование Фурье для двух соседних вейвлетов от ранее рассчитанной Егг рассогласования скоростей нейросетевой модели и электропривода на рабочем участке (рис.3 и рис. 4). На разных частотно-временных участках становится возможным рассмотреть отдельные энергетические параметры спектров. Многие частотные характеристики не видны при применении преобразования Фурье к исходному сигналу на фоне других частот,

имеющих большую энергию. В то же время, именно в этих частотных областях может оказаться ключевая информация об изменении состояния электропривода. Теперь, контролируя изменение данных спектров от отдельных вейвлетов, становится возможным выявить отклик различных дефектов экспериментальным путем.

Обнаружение роста отдельных спектральных составляющих от вейвлет коэффициентов можно использовать для прогнозирования развития дефектов и скорости их развития. Для этих целей также целесообразно использовать технологии машинного обучения. В частности, перспективным выглядят самообучающиеся глубинные нейронные сети, на входе которых набор фильтров для различных наборов данных и производится свертка сигнала на каждом слое сети. Рассмотрение механизмов данных сетей выходит за рамки данной статьи. Следует только добавить, что разработка их структуры процесс нетривиальный, и требующий множество экспериментов. Это связано с тем, что подобные технологии только зарождаются, но при этом уже успешно себя зарекомендовали в системах распознавания речи и зрительных образов.

Выводы

В данной статье рассмотрены вопросы анализа отклика динамической нейросетевой модели автоматизированного электропривода. Кратко приведены результаты предыдущих работ авторов по построению нейросетевой модели. Рассмотрены и предложены способы решения проблемы анализа рассогласования динамики параметров реального электропривода и его модели с применением технологий частотного анализа и вейвлет разложения.

В настоящее время авторами ведется прикладная научно-исследовательская работа по разработке системы диагностики промышленных электроприводов с применением интеллектуальных технологий, в частности выявляются отдельные признаки в рассогласовании динамики электропривода и его нейросетевой модели с применением изложенных в статье технологий.

1. Волков, В.Н. Разработка нового метода диагностирования автоматизированных электромеханических систем прокатных станов с помощью нейросетевых алгоритмов / В.Н. Волков, А.В. Кожевников // Вестник Череповецкого государственного университета. Научный журнал. – Череповец: ФБГОУ ВПО ЧГУ. - № 4 (51). Т.1 - 2013. - С. 11-16.
2. Кожевников, А.В. Диагностирование приводов прокатных станов с помощью нейросетевой оценки / А.В. Кожевников // Metallurgical processes and equipment. - №3(33). - 2013.- С. 54-60.
3. Горбань, А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А.Н. Горбань // Сибирский журнал вычислительной математики/РАН. Сибирское отделение. – Новосибирск, 1998. –Т.1, №1.-с.11-24
4. Клепников, В.Б. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами / В.Б. Клепников, С.А. Сергеев, К.В. Махотило, И.В. Обруч // Электротехника.- 1999. – №5. – с.2-6.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс». 2006. – 1104с.
6. Петухов, В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения / В. Петухов // Журнал «Новости Электротехники». – 2008. – №1(49).
7. Северо-западный Учебный центр. Возможности диагностики механизмов по току электродвигателя. URL: <http://vibro-expert.ru/vozmojnosti-dagnostiki-mexanizmov-po-toku-elektrodvigatelya.html>
8. Википедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Дискретное_преобразование_Фурье
9. Википедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Дискретное_вейвлет_преобразование

DEVELOPMENT OF THE ANALYSIS OF THE DYNAMIC NEURAL NETWORK MODEL OF THE AUTOMATED ELECTRIC DRIVE

A.V. Kojevnikov, V.N. Volkov
Cherepovets State University, Russia

Abstract. This article describes the issues and the proposed method for analyzing response of neural network model of automated electric drives of direct current used in rolling mills. Briefly addressed the issue of construction of models, with references to earlier works, unsolved problems and their proposed solution.

Keywords: Automatic Electric drive, rolling production, neural network model, machine learning, diagnostics.

REFERENCES

1. Volkov V.N., Kozhevnikov .A.V. *Razrabotka novogo metoda diagnostirovaniya avtomatizirovannykh elektromekhanicheskikh sistem prokatnykh stanov s pomoshch'yu neyrosetevykh algoritmov* [Development of a new method of diagnosing automated electromechanical systems of rolling mills using neural network algorithms] / Bulletin of the Cherepovets State University.
2. Science Magazine. - Cherepovets: Cherepovets State University. - № 4 (51). Vol.1 - 2013. - P. 11-16.
3. Kozhevnikov .A.V. *Diagnostirovaniye privodov prokatnykh stanov s pomoshch'yu neyrosetevoy otsenki* [Diagnosing drives of rolling mills using neural network evaluation] / Metallurgical processes and equipment. - №3 (33). - 2013.- pp 54-60.

-
4. Gorban A.N. *Obobshchennaya approksimatsionnaya teorema i vychislitelnye vozmozhnosti neyronnykh setey* [Generalized approximation theorem and the computational capabilities of neural networks] / Siberian Journal of Numerical Mathematics / Russian Academy of Sciences. Siberian department-set. – Novosibirsk, 1998., Vol.1, № 1. – p.11-24.
 5. Klepnikov V.B., Sergeev S.A., Mahotilo K.V., Obruch I.V. *Primeneniye metodov neyronnykh setey i geneticheskikh algoritmov v reshenii zadach upravleniya elektroprivodami* [Application of neural networks and genetic algorithms in solving the problems of motor control] / Elektrotehnika.- 1999. - №5. - p.2-6.
 6. Haykin S. *Neyronniye seti: polny kurs* [Neural networks: a complete course, 2nd edition. from English]. – Moscow: Izdatelsky dom "Wilyams". 2006. – 1104p.
 7. Petuhov V. *Diagnostika elektrodvigatelye. Spektral'nyy analiz moduley vektorov Parka toka i napryazheniya* [Diagnostics of electric motors. Spectral analysis of the magnitude of the current and voltage of the Park] / Journal "Electrical Engineering News» №1 (49) 2008.
 8. Northwest Learning Center. *Vozmozhnosti diagnostiki mekhanizmov po toku elektrodvigatelya* [The diagnostic current motor mechanisms]. URL: <http://vibro-expert.ru/vozmozhnosti-diagnostiki-mexanizmov-po-toku-elektrodvigatelya.html>
 9. Wikipedia, the free encyclopedia [electronic resource] URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Diskretnoye_preobrazovaniye_Fur'ye [Discrete Fourier transform]
 10. Wikipedia, the free encyclopedia [electronic resource] URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Diskretnoye_veyvlet_preobrazovaniye [The discrete wavelet transform]

ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ, СЫРЬЯ, КОМПЛЕКТУЮЩИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Н.В. Сырейщикова¹, Д.А. Пшеничникова²
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»,
г. Челябинск, Россия

¹ snv.ktn@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты совершенствования процесса входного контроля металлоизделий, сырьевых материалов, полуфабрикатов, комплектующих на основе выбора и применения современных методов неразрушающего контроля и статистических методов менеджмента качества с использованием IDEF-моделирования и компьютерной программы VProWin. Результаты работы позволяют достичь уменьшения количества внешних отказов, и следовательно, сокращения затрат на непроизводственные расходы.

Ключевые слова: входной контроль, неразрушающие методы контроля, статистические методы менеджмента качества, внедрение.

Введение

Качество сегодня – это главный критерий оценки продукции, работ, услуг, который определяет уровень жизни каждого человека и общества в целом. Оно является индикатором высокого стандарта или уровня совершенства, и не случайно, производитель, рекламируя свою продукцию, говорит о её качестве [1].

Проблема качества, была непростой во все времена, особенно когда предприятия сталкиваются с большими трудностями, сокращением производства, закрытием заводов, отсутствием возможности выплатить зарплату коллективам. Подобные проблемы осложняются ещё и нестабильностью в финансовой системе. Назревает вопрос: о каком же качестве может идти речь в такой ситуации? Лишь бы выжить, не допустить окончательного развала индустрии страны. В том-то и дело, что именно качество – это тот ключ, которым открывают двери выхода из кризиса [2].

Сегодня тенденции в мире таковы, что качество является ведущим инструментом развития предприятий и даже целых отраслей. Вопрос качества стал очень острым, когда какой угодно продукции во всём мире стало так много, что потребитель начал испытывать серьёзные затруднения с её выбором. Да и поставщик оказался в затруднении с выбором предприятия-стратегического партнера для сотрудничества.

В настоящее время основная цель любого предприятия должна быть определена как выпуск высококачественной продукции, максимально соответствующей требованиям и ожиданиям потребителей. Систематическое улучшение качества продукции и услуг не только обеспечивает снижение затрат на устранение дефектов в процессе производства, эксплуатации продукции в общей стоимости затрат на её производство и эксплуатацию, но и увеличивает деловую и инвестиционную привлекательность предприятия [3].

Актуальность работы

В настоящее время продукция, выпускаемая предприятиями машиностроительной отрасли, как и некоторых других отраслей не пользуется высокой

популярностью из-за ее низкой конкурентоспособности. Основной причиной низкой конкурентоспособности машиностроительной продукции можно назвать вовлечение в производство материалов, несоответствующих по качеству предъявляемым к ним требованиям. А так как за соблюдением качества производимого товара ответственность несет производитель, то именно для него обеспечение качества путем эффективного входного контроля металлопродукции, сырья и комплектующих является объективной необходимостью, обеспечивающей предотвращение условий возникновения вышеуказанной проблемы, что и определяет актуальность данной работы [3].

Таким образом, актуальность данной работы обоснована тем, что в настоящее время одним из важнейших направлений системы обеспечения качества на предприятиях является развитие и совершенствование входного контроля качества металлопродукции, сырья и комплектующих, получаемых по кооперации и используемых в собственном производстве конечной продукции. Главная цель входного контроля, определяющая его сущность и место в производственном процессе, – предотвратить вовлечение в производство материалов, не соответствующих по качеству предъявляемым к ним требованиям.

На кафедре технологии автоматизированного машиностроения Южно-Уральского государственного университета выполнена работа по улучшению процесса входного контроля сырьевых материалов и комплектующих с помощью применения статистических методов менеджмента качества для ПАО «Челябинский кузнечно-прессовый завод» (ПАО «ЧКПЗ»). В работе было признано целесообразным использовать накопленный опыт российского комплексно-системного управления качеством, ориентируясь на требования стандартов ИСО серии 9000 и методы менеджмента качества.

Основные проблемы и решения

В настоящее время в российской промышленности в целом существует ряд проблем, препятствующих её развитию, которые характерны практически для всех

предприятий машиностроительной отрасли. Так, диагностика проблем исследуемого предприятия ПАО «ЧКПЗ» показала, что периодически возникают расходы, потери и убытки в непроизводственной сфере при неудовлетворительном входном контроле качества заготовок, полуфабрикатов и металлопродукции, а именно:

- штрафы за отгрузку недоброкачественных партий заготовок;
- арбитражные издержки по хозяйственным спорам за ошибочное отнесение годного сырья в брак и наоборот;
- неадекватно используемые формы стимулирования в отношении работников, оплачиваемые предприятием, в том числе суммы незаслуженно выплаченных денежных средств работникам;
- оплачиваемые за счет предприятия транспортные расходы доставки и возврата негодных партий от потребителей.

Кроме вышеназванных к проблемам изучаемого предприятия относятся такие как:

- нехватка квалифицированных кадров: рабочих, работников ИТР, специалистов, менеджеров среднего и высшего звена;
- формальный подход к системе менеджмента качества, не обеспечивающей прироста эффективности в силу отсутствия заинтересованности со стороны персонала компании;
- отсутствие на предприятии современных средств измерения, что влечет за собой низкую эффективность контроля качества выпускаемой продукции и входного контроля металлоизделий, сырья и комплектующих со стороны как отдела технического контроля предприятий, так и испытательной лаборатории;
- высокий уровень брака продукции, поступившей от поставщиков, а так же выпускаемой продукции;
- дефицит оргтехники (компьютерной и офисной) в испытательной лаборатории, что затрудняет работу всего предприятия;
- отсутствие системы учета издержек, а так же отсутствие идентификации присущих организации видов расходов [4, 5].

Для решения в данной работе из вышеприведенных проблем были выбраны наиболее существенные, такие как: периодические потери от неудовлетворительного процесса входного контроля, серьезно влияющие на экономическую политику ПАО «ЧКПЗ».

Было проведено аналитическое исследование основных методов входного контроля, позволяющих для условий предприятия значительно сократить потери различного рода и повысить конкурентоспособность выпускаемой предприятием продукции. Был осуществлен их анализ, рассмотрены сильные и слабые стороны каждого метода. В зависимости от возможности использования продукции были рассмотрены неразрушающий и разрушающий виды входного контроля. В свою очередь был проведен анализ следующих видов неразрушающего контроля: акустического, капиллярного, магнитного, радиационного, теплового, методов контроля течеисканием, электрического и электромагнитного методов. Кроме того, из разрушающих методов контроля проанализированы следующие: механические испытания,

металлографические исследования, химический анализ, спектральный анализ, коррозионные испытания [6–17].

Так, акустический метод эффективен при выявлении дефектов с малым раскрытием, чувствителен к изменению структуры и физико-механических свойств материалов, но зачастую требует двустороннего доступа к изделию и обладает малой точностью оценки координат дефектов [11]. Капиллярный контроль предназначен для обнаружения поверхностных и сквозных дефектов в объектах контроля, определения их расположения, протяженности и ориентации по поверхности объектов любых размеров, форм, материалов, но контролируемая поверхность требует предварительной очистки от загрязнений. [12]. Магнитный метод позволяет регистрировать дефекты на сложных поверхностях и в узких зазорах, но в тоже время требует вторичного преобразования информации [15]. Оптический метод основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего поглощением, отражением, рассеиванием, дисперсией, поляризацией с контролируемым объектом

и позволяет контролировать объект, независимо от материала, даже для прозрачных объектов, но отличается узким диапазоном контролируемых параметров, жесткими требованиями к состоянию окружающей среды и чистоте поверхности изделия [14]. Радиационные (радиоактивные) методы базируются на «просвечивании» объектов, позволяющим определить вид дефекта, но является вредным для человека [15]. Тепловой метод основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов и обладает высокой производительностью и многопараметрическим характером испытаний, но отличается низкой степенью автоматизации при непрерывных измерениях и контроле движущихся объектов [16]. Методы контроля течеисканием применяются для обнаружения сквозных дефектов, требуют значительных временных затрат на пропитку и проявление индикаторной жидкости, что приводит к снижению производительности контроля и сложности его автоматизации [8].

Вихретоковый метод отличается универсальностью и широкими функциональными возможностями, но применим только для контроля деталей, изготовленных из электропроводящих материалов и при контроле одного параметра другие являются мешающими [10].

Разрушающий контроль служит для количественного определения максимальной нагрузки на предмет, после которой наступает разрушение. Испытания могут носить разный характер: статические нагрузки позволяют точно измерить силу воздействия на образец и подробно описать процесс деформации. Динамические испытания служат для определения вязкости или хрупкости материала. Испытания на усталость – это многократные нагрузки небольшой силы, вплоть до разрушения. Испытания на твердость служат для измерения силы, с которой более твердое тело внедряется в поверхность образца. Испытания на изнашивание и истирание позволяют определить изменения свойств поверхности материала при длительном воздействии трения [17].

Из рассмотренных методов неразрушающего контроля выбран для применения на ПАО «ЧКПЗ» оптический метод, как наиболее оптимальный для данного

предприятия, который позволит повысить качество закупаемых на производство сырья, продукции, комплектующих и снизить количество рекламаций от внутренних и внешних потребителей из-за дефектов качества.

Так же было рекомендовано улучшить процесс входного контроля металлоизделий, сырья и комплектующих предприятия с помощью применения статистических методов менеджмента качества. В работе был использован накопленный опыт российского комплексно-системного управления качеством, базирующийся на требованиях стандартов ИСО серии 9000 и методах всеобщего управления качеством [2; 20–25; 30].

Для повышения эффективности процесса входного контроля были использованы основные статистические методы менеджмента качества: система сбора данных (контрольный листок); средства и методы для анализа нечисловых данных (диаграмма Исикавы, диаграмма последовательности); средства и методы для анализа числовых данных: диаграмма Парето, диаграмма рассеивания, стратификация, гистограмма; новые статистические методы: диаграммы сходства и граф взаимозависимости и дополнительные статистические методы: технология структурирования функции качества (СФК) [20–21; 24–25].

Разработан процесс «Совершенствование процесса входного контроля металлоизделий, сырья и комплектующих» (см. рис. 1; ВК – входной контроль, НД – нормативная документация, ИЛ – испытательная лаборатория, ОТК – отдел технического контроля, МТО – материально-ответственное лицо). Для его описания составлен паспорт процесса, с указанием основных элементов: владелец, поставщики, потребители, входы, выходы, ресурсы, управление процессом. Основные характеристики процесса даны на схеме (см. рис. 2). Определена матрица распределения ответственности персонала. Процесс выделен из общей схемы процессов предприятия, визуализирован и декомпозирован с помощью IDEF-моделирования и компьютерной программы BPwin [19], что упрощает его реализацию и понимание. Разработаны оценочные показатели процесса и их аналитические модели. Установлены количественные критерии разработанных оценочных показателей процесса [4–5].

В качестве одного из контролируемых параметров процесса был принят коэффициент общей эффективности контроля ($k_{офк}$), позволяющий получить информацию о том, насколько эффективно используется имеющееся оборудование для контроля. Общая эффективность контроля (испытаний) – объективный показатель состояния испытательного оборудования.

$k_{офк}$ рассчитывается следующим образом:

$$k_{офк} = Z_{врем} \times Z_{мощн} \times k_{годн.},$$

где $Z_{врем.}$ – загруженность по времени; $Z_{мощн.}$ – загруженность по мощности; $k_{годн.}$ – коэффициент выхода годных деталей.

Количество дефектов, переходящих на следующую операцию (N) было принято определять по формуле:

$$N = D_i - D_{new}, \text{ ед.},$$

где D_i – общее количество дефектов, выявленных на i -той операции, ед.; D_{new} – количество вновь обнаруженных дефектов из общего числа дефектов i -той операции, которые не были обнаружены на предыдущей операции, ед.

Время на устранение обнаруженной проблемы было принято устанавливать путем определения количества дней, прошедших от дня обнаружения до дня устранения проблемы. Границы допустимых значений располагаются в пределах 5-ти рабочих дней, в зависимости от сложности проблемы.

Время на выявление причины обнаруженной проблемы было принято подсчитывать в процессе определения количества дней, прошедших со дня обнаружения, до дня выявления причины проблемы. Причина выявленной проблемы должна быть обнаружена в пределах 3-х рабочих дней со дня обнаружения проблемы.

При расчете интегрального показателя конкурентоспособности продукции было принято определять отдельные показатели конкурентоспособности продукции путем их сравнения с базовыми, эталонными показателями или показателями для товаров-конкурентов. Показатель конкурентоспособности по i -му параметру (Q_i) определяется по формуле:

$$Q_i = \frac{P_i}{P_{i0}},$$

где P_i – величина i -го параметра товара; P_{i0} – величина i -го параметра для товара-эталона.

Для регламентации требований к порядку и правилам осуществления усовершенствованного процесса входного контроля, установления всех необходимых видов документов и правил их оформления, а так же распределения ответственности персонала предприятия был разработан стандарт организации «Входной контроль металлоизделий, сырья и комплектующих». Стандарт был апробирован в условиях ПАО «ЧКПЗ» и внедрен для использования.

Для повышения надежности процесса входного контроля металлопродукции, сырья и комплектующих, а так же для решения стоящих перед данным процессом таких задач, как: регистрация и анализ статистических данных о фактическом уровне качества получаемой продукции, разработка на их основе предложений по повышению качества, были созданы рекомендации по применению статистических методов контроля качества входной продукции (контрольного листка, диаграммы Парето, АВС-анализа и др.). Данные рекомендации устанавливают порядок проведения процесса применения статистических методов контроля качества, их оформления для анализа основных причин несоответствия. Последующий анализ эффективности проведения улучшающих мероприятий, показывающий во сколько раз изменился рассматриваемый показатель надежности, осуществляется в следующем порядке.

Анализируются некоторые факторы, причем устанавливается, что потери от i -го фактора (числа бракованных изделий) составляют в абсолютном выражении величину L_i . Относительная значимость i -го фактора, т. е.

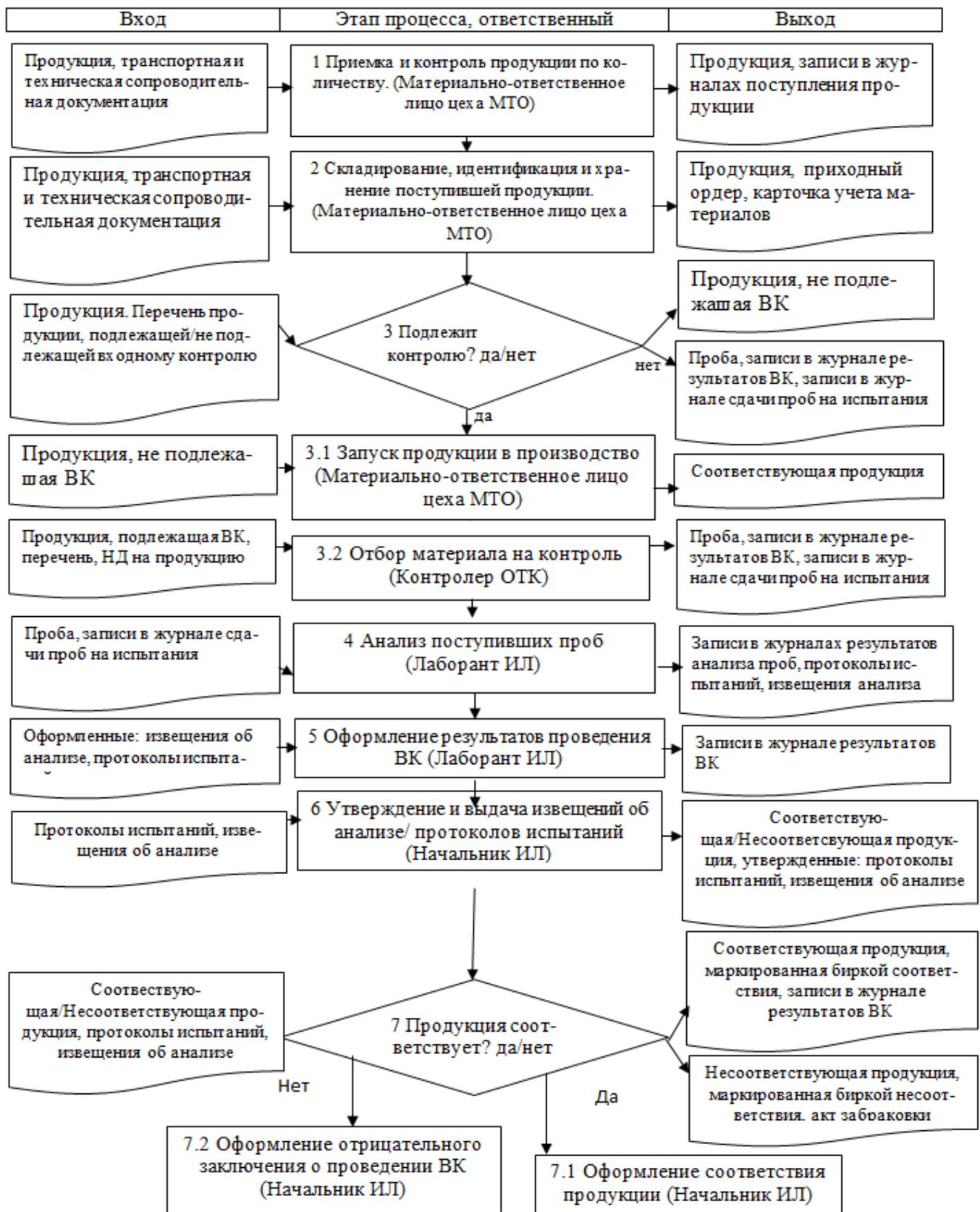


Рис. 1 Блок-схема процесса «Совершенствование входного контроля продукции»



Рис. 2 Схема процесса «Совершенствование входного контроля продукции»

процент потерь, им обусловленный, составляет величину p_i [17; 18]:

$$p_i = (L_i/L) * 100\%,$$

где $L = \sum L_i$ – суммарные потери по всем факторам.

Далее оценивается выигрыш по показателю l от проведения мероприятий по уменьшению влияния некоторого фактора, выразившийся в снижении процента потерь от этого фактора до величины $p'_i < p_i$ при неизменности потерь от всех остальных факторов. Поскольку потери от действия всех остальных факторов, начиная со второго, не изменялись, то справедливо равенство $L - L_i = L' - L'_i$. Это равенство можно переписать в виде:

$$L/L' = (100 - p'_i) / (100 - p_i).$$

Для позитивного показателя l , обратно пропорционального L , k определяется $k = l'/l = L/L'$, для негативного показателя l , прямо пропорционального L , k определяется $k = l'/l = L/L'$. Таким образом, в обоих случаях:

$$k = L/L' = (100 - p'_i) / (100 - p_i).$$

Прирост показателя может быть также выражен в процентах:

$$[(l' - l)/l] * 100\% = (l'/l - 1) * 100\% = [(100 - p'_i) / (100 - p_i) - 1] * 100\%.$$

В рекомендациях отражено, что данный анализ позволяет дать количественную оценку повышения показателей надежности, достигнутых в результате проведения улучшающих мероприятий, реализующих выработанные рекомендации, данные на основании

применения статистических методов менеджмента качества [27; 29]. Использование диаграммы Парето позволяет отобразить и выявить проблемы и основные факторы, с которых нужно начинать действовать, и распределять усилия с целью эффективного разрешения этих проблем. Применение ABC-анализа диаграммы Парето позволяет выявить те проблемы, которые подлежат первоочередному решению, путем ранжирования их приоритетности по группам: группа А – наиболее важные, существенные проблемы, причины, дефекты. Относительный процент группы А в общем количестве дефектов (причин) обычно составляет от 60 до 80%. Соответственно, устранение причин группы А имеет большой приоритет, а связанные с этим мероприятия – самую высокую эффективность; группа В – причины, которые в сумме имеют не более 20%; группа С – самые многочисленные, но при этом наименее значимые причины и проблемы [20].

Был произведен анализ и расчет затрат на качество по предприятию до и после освоения результатов работы [26]. Пример диаграммы, полученных долевых составляющих затрат на качество по модели РАФ: на предупреждение, анализ и отказы по предприятию дан на рис. 3. Данная диаграмма показывает распределение затрат на качество при выявлении несоответствующей по качеству продукции до и после улучшения процесса на рассматриваемом предприятии ПАО «ЧКПЗ».

Выводы

Анализ и расчет затрат на качество показал, что внедрение результатов работы позволяет достигнуть: 1 перераспределения затрат и сокращения доли на внутренние дефекты, снижения общей суммы затрат и появления дополнительной прибыли; 2 повышения



Рис. 3 Пример диаграммы долевых составляющих затрат на качество по модели РАФ

исполнительской дисциплины на предприятии, улучшения мотивации сотрудников; 3) повышения качества управленческих решений благодаря ставшими более «прозрачными» для руководства предприятия процессов обеспечения качества.

Установлено, что существенная доля затрат на устранение внутренних несоответствий указывает на проблемы производства, связанные со значительным числом бракованных (несоответствующих) изделий. Одновременно с этим большая величина затрат на оценку качества продукции говорит о возможности предприятия не допускать отгрузку несоответствующей продукции потребителю. По результатам анализа рекомендовано:

- предпринимать корректирующие мероприятия для отыскания и устранения коренных причин несоответствий выявленных при входном контроле;
- осуществлять сбор и анализ данных, полученных в результате многочисленных оценок качества продукции, для понимания и предотвращения повторяющихся проблем в будущем.

Приоритетное осуществление мероприятий по профилактике брака дает возможность своевременно выявить и предотвратить переход бракованной партии, поступившей на предприятие и, таким образом, снизить уровень брака и дефектов, что в свою очередь, влечет значительное улучшение качества выпускаемых изделий при неизменной или даже уменьшенной в результате перераспределения общей суммы затрат на качество.

Совершенствование процесса «Входной контроль металлопродукции, сырья и комплектующих» позволяет предотвратить появление безвозвратных производственных потерь, потерь от несоответствующей продукции, переделки брака, снижения затрат на повторный контроль, оплату штрафов и рекламаций.

В результате внедрения результатов работы на ПАО «ЧКПЗ» достигнуты следующие факторы экономии:

- предотвращение денежных выплат по рекламациям и штрафам;
- повышение качества выпускаемой продукции;

- уменьшение числа рекламаций;
- сокращение трудоемкости управления процессом за счет проектирования процесса «Входной контроль металлопродукции, сырья и комплектующих» методом IDEF-моделирования.

Заключение

В результате проведенной работы усовершенствован процесс входного контроля сырьевых материалов и полуфабрикатов путем применения выбранного на основе анализа используемых во всем мире современных методов контроля, наиболее подходящие для предприятия, – методы оптического контроля. Процесс входного контроля металлоизделий, сырья и комплектующих выделен из общей схемы процессов предприятия, описан, визуализирован и декомпозирован с помощью IDEF-моделирования и компьютерной программы BPwin, что значительно упростило его реализацию, понимание и управление.

Разработан, апробирован и внедрен стандарт организации «Входной контроль сырьевых материалов и полуфабрикатов», содержащий требования к процессу, порядку его осуществления, управления и оформления с учетом всех выбранных усовершенствований. Разработаны и приняты к исполнению апробированные рекомендации по применению статистических методов: контрольного листка, диаграммы Парето, ABC-анализа, стратификации, диаграммы сходства, домика качества (QFD) и других для анализа данных и совершенствования процесса, для обеспечения правильной организации действий при контроле поступившей на предприятие металлопродукции, сырья и комплектующих.

Освоение результатов проведенной работы позволило достичь уменьшения количества внешних отказов, и следовательно, сокращения затрат на хранение и возврат бракованных партий продукции поставщикам, сокращения затрат на повторный контроль и испытания, уменьшения расходов на командировки, снижения уровня денежных выплат и пр. Результаты работы апробированы и реализованы на предприятии ПАО «ЧКПЗ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазилкина, Е.И., Паничкина Т.Г. Управление конкурентоспособностью организации / Е.И. Мазилкина, Т.Г. Паничкина. – М.: ОМЕГА-Л, 2013. – 319 с.
2. Ребрин, Ю.И. Управление качеством: Учебное пособие / Ю.И. Ребрин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2014. – 174 с.
3. Бондаренко, С.И. Конкурентоспособность продукции металлургического комплекса России / С.И. Бондаренко. – М.: «Научная книга», 2012. – 103 с.
4. Пшеничникова, Д.А. Улучшение процесса входного контроля сырьевых материалов и полуфабрикатов с помощью применения статистических методов менеджмента качества / Д.А. Пшеничникова, Н.В. Сырейщикова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. V Всерос. науч.-технич. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. университет, 2009. – Ч.1.– С. 116–119.
5. Пшеничникова, Д.А. Как внедрить статистические методы в процесс входного контроля / Д.А. Пшеничникова, Н.В. Сырейщикова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. VI Всерос. науч.-технич. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. университет, 2010. – Ч.1.– С. 246–248.
6. Барахтин, Б.К. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения. Т. 1./ Б.К. Барахтин, А.М. Немец. – НПО.: «Профессионал», 2006.– 490 с.
7. ГОСТ 24297-2013. Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
8. Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
9. Потапов, А.И. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий: Научное, методическое, справочное пособие / А.И. Потапов, В.А. Сяськоюю. – Санкт-Петербург. – СПб., 2009. – 904 с.
10. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочное пособие. Изд.-во: Машиностроение 2005. – 656 с.
11. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля. / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова.– М.: Высш. шк., 1991.– 283 с.
12. Филинов, М.В. Капиллярный контроль. / М.В. Филинов. М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.
13. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль: справочник: Магнитные методы контроля / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.
14. Филинов, В.Н. Неразрушающий контроль: справочник: Оптический контроль / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6. Кн. 2. М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.
15. Ермолов, И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества: Учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Высшая школа, 2003. – 368 с.
16. Вавилов, В.П. Неразрушающий контроль: Справочник: Тепловой контроль/ Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5. Кн. 2. М.: Машиностроение, 2006. – 600 с.
17. Рощина, Ю. Методы контроля качества металлопродукции / Ю. Рощина // Неразрушающий контроль. – М.: Высш. шк., 2010. – № 10 (84). – С. 197–212.
18. ГОСТ Р 50779.30-95. Статистические методы. Приемочный контроль качества. Общие требования. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1995. – 40 с.
19. Маклаков, С.В. Моделирование бизнес-процессов с AllFussion Process Modeler (BPWin 4.1) / С.В. Маклаков. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2015. – 240 с.
20. Управление качеством. Ч. 1: Семь простых методов: учебное пособие для вузов / Ю.П. Адлер, Т.М. Полховская, В.Л. Шнер – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСиС, 2001. – 138 с.
21. Винокурова, В.И. Применение статистических методов на предприятии / В.И. Винокурова, Н.В. Сырейщикова //Прогрессивные технологии в машиностроении: тематич. сб. научн. тр. – Челябинск. Изд. центр ЮУрГУ, 2011. – С. 91–96.
22. Жалинский, С.А. Повышение конкурентоспособности продукции путем освоения передовых технологий менеджмента качества / С.А. Жалинский, Н.В. Сырейщикова // Новые технологии наукоемкого машиностроения: приоритеты развития и подготовка кадров: сб. ст. Междунар. молодежной научно-практич. конф. – Набережные Челны: Изд-во Казан. гос. техн. ун-т, 2015. – С. 119–124.
23. Ильина, К.Б. Повышения уровня конкурентоспособности машиностроительного предприятия на примере ЗАО «Конар» / К.Б. Ильина, Н.В. Сырейщикова // Прогрессивные технологии в машиностроении: тематич. сб. научн. тр. – Челябинск. Изд. центр ЮУрГУ. 2015. – С. 80–86.
24. Кимличенко, Н.В. Совершенствование системы организации управления производством предприятия инструментами менеджмента качества / Н.В. Кимличенко, Н.В. Сырейщикова // 40-ые Гагаринские чтения: научн. тр. Междунар. молодежной научн. конф. – М.: МАТИ, 2014. Т 6. – С. 33–34.
25. Горшкова, А.В. Повышение конкурентоспособности продукции путем применения инновационных технологий / А.В. Горшкова, Н.В. Сырейщикова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. V Всерос. науч.-технич. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. университет, 2009. – Ч.1.– С. 127–130.
26. ГОСТ Р 52380.2–2005. Руководство по экономике качества. Ч. 2.– М.: Стандартинформ, 2005. – 15 с.
27. Panel Discussion. How to Attain Quality Excellence by Statistical and Related Methodologies. Moderator Hiroe Tsubaki. Panelists: Jing Sun, Kazuo Ishiyama, Natcha Thawesaengskulthai, Yury P. Adler, Antony J. Hayer. - 7th ANQ Congress Tokyo 2009. Program Book. – 36 p.
28. Hoerl R., Snee R. Statistical thinking: improving business performance. — Duxbury (Thomson Learning Inc.), 2012. – 528 p.
29. Salsburg D. The lady tasting tea: how statistics revolutionized science in the twentieth century. - N.Y., W.H. Freeman and Co., 2010. – 340 p.
30. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ. 2015. – 15 с.

THE ENTRANCE CONTROL OF HARDWARE, RAW MATERIALS, ACCESSORIES WITH USE OF STATISTICAL METHODS OF A QUALITY MANAGEMENT

N.V. Syreishchikova, D.A. Pshenichnikova
The South Ural state university, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Results of perfection of process of the entrance control of hardware, raw materials, the half-finished products completing on the basis of a choice and applications of modern methods of not destroying control and statistical methods of a quality management with use of IDEF-modelling and computer program BPwin are resulted. Results of work allow to reach reduction of quantity of external refusals, and therefore, reductions of expenses for non-productive expenses.

Keywords: the entrance control, not destroying quality monitoring, statistical methods of a quality management, introduction.

REFERENCES

1. Mazilkina, E.I., Panichkina, T.G. Upravlenie konkurentosposobnost'yu organizatsii / E.I. Mazilkina, T.G. Panichkina. – M.: OMEGA-L, 2013. – 319 p.
2. Rebrin, YU.I. Upravlenie kachestvom: uchebnoe posobie / YU.I. Rebrin. – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2014. – 174 p.
3. Bondarenko, S.I. konkurentosposobnost' produktsii metallurgicheskogo kompleksa Rossii / S.I. Bondarenko. – M.: nauchnaya kniga, 2012. – 103 p.
4. Pshenichnikova, D.A. Uluchenie protsessa vkhodnogo kontrolya syre'vykh mater'yalov i polufabrikatov s pomoshchyu primeneniya statisticheskikh metodov menedzhmenta kachestva / D.A. Pshenichnikova, N.V. Syreishchikova // Nauchnoe tvorchestvo molodyezhi – lesnomu kompleksu Rossii: mater. V Vseros. nauch.-tekhnich. konf. – Ekaterinburg: Ural. gos. universitet, 2009. – CH. 1. – P. 116–119.
5. Pshenichnikova, D.A. Kak vnedrit' statisticheskikh metody v protsess vkhodnogo kontrolya / D.A. Pshenichnikova, N.V. Syreishchikova // nauchnoe tvorchestvo molodyezhi – lesnomu kompleksu Rossii: mater. VI Vseros. nauch.-tekhnich. konf. – Ekaterinburg: Ural. gos. universitet, 2009. – CH. 1. – P. 246–248.
6. Barakhtin, B.K. Metally i splavy. Analiz i issledovanie. Fiziko-analiticheskie metody issledovaniya metallov i splavov. Nemetallicheskie vklyucheniya. T. 1 / B.K. Barakhtin, A.M. Nemets. M.: –NPO. «Professional», 2006. – 490 p.
7. GOST 24297-2013. Verifikatsiya zakuplennoy produktsii. Organizatsiya provedeniya i metody kontrolya. – M.: Standartinform, 2014. – 15 p.
8. Kanevskiy, I.N. Nerazrushayushchie metody kontrolya: ucheb. posobie / I.N. Kanevskiy, E.N. Sal'nikova. – Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2007. – 243 p.
9. Potapov, A.I. Nerazrushayushchie metody i sredstva kontrolya tolshiny pokrytiy i / izdeliy: nauchnoe, metodicheskoe, spravochnoe posobie / A.I. Potapov, V.A. Syas'ko. – Sankt-Peterburg. – SPb., 2009. – 904 p.
10. Klyuev, V.V. Nerazrushayushchiy kontrol' I diagnostika: spravochnoe posobie. M.: Izd-vo: Mashinostroenie. 2005. – 656 p.
11. Ermolov, I.N. Nerazrushayushchiy kontrol'. V 5 kn. Kn.2 / Akusticheskie metody kontrolya. / I.N. Ermolov, N.P. Aleshin, A.I. Potapov, pod red. V.V. Sukhorukova. – M.: Vyssh. shk., 1991. – 283 p.
12. Filinov, M.V. Kapillyarnyy kontrol' / M.V. Filinov. M.: Mashinostroenie, 2006. – 738 p.
13. Klyuev, V.V. Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: Magnitnye metody kontrolya 7 Pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 6. Kn. 1. M.: Mashinostroenie, 2006. – 832 p.
14. Filinov, M.V. Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik: Opticheskiy kontrol' / Pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 6. Kn. 2. M.: Mashinostroenie, 2006. – 832 p.
15. Ermolov, I.N. Metody i sredstva nerazrushayushchiy kontrolya kachestva: ucheb. nosobie dlya inzh.-tekhn. spets. buzov. / Pod obsh. red. V.V. Klyueva. – M.: Vyssh.shk., 2003. – 368 p.
16. Vavilov, V.P. Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: Teplovoy kontrol' / Pod obsh. red. V.V. Klyueva. T.5. Kn. 2. M.: Mashinostroenie, 2006. – 600 p.
17. Roshina, YU. Metody kontrolya kachestva metalloproduktcii / YU. Roshina // Nerazrushayushchiy kontrol'. – M.: Vyssh. shk., 2010. № 10 (84) – P. 197–212.
18. GOST R 50779.30-95. Statisticheskie metody. Priemochnyy kontrol' kachestva / Obshie trebovaniya. – M.: IPK Izd-vo standartov, 1995. – 40 p.
19. Maklakov, S.V. Modelirovanie biznes-protsessov s AllFussion Process Modeler (BPWin 4.1) / S.V. Maklakov. – M.: DIALOG-MIFI? 2015. – 240 p.
20. Upravlenie kachestvom. CH. 1. Sem' prostykh metodov: ucheb. nosobie dlya vuzov / YU.P. Adler, T.M. Polkhovskaya, V.L. SHper – 2-e izd., pererab. I dop. – M.: MISIS, 2001. – 138 p.
21. Binokurova, B.I. Primenenie statisticheskikh metodov na predpriyatii / B.I. Binokurova, N.V. Syreishchikova // Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii: tematbch. sb. naychn. sb. naychn. tr. – Chelyabinsk. Izd. tsentr YUUrGU, 2011. – P. 91–96.
22. ZHalinskiy, S.A. Povyshenie konkurentosposibnosti produktcii putem osvoeniya peredobnykh tekhnologii menedzhmenta kachestva / S.A. ZHalinskiy, N.V. Syreishchikova // Novye tekhnologii naukoemkogo mashinostroeniya: priority razvitiya I podgotobki kadrov: sb. st. Mezhdunar. molodyezhnoy nauchno-praktich. konf. – Naberezhnye CHelny: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-t., 2015. – P. 119–124.
23. Il'ina, K.B. Povyshenie urobnya konkurentosposibnosti mashinostroitelnogo predpriya na primere ZAO «Konar» / K.B. Il'ina, N.V. Syreishchikova // Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii: tematbch.sb. naychn. sb. naychn. tr. – Chelyabinsk. Izd. tsentr YUUrGU., 2015. – P. 80–86.
24. Kimlichenko, N.V. Sovershenstvovanie sistemy organizats upravleniya proizvodstvom predpriyatiya instrumentami menefmenta kachestva /

-
- N.V. Kimlichenko, N.V. Syreychikova // 40-y Gagarinskie chteniya: nauchn.tr. Mezhdunar. molodezhnoy nauchn. konf. – M.: MATI, 2014. T.6. – P. 33–34.
25. Gorshkova, A.V. Povyshenie konkurentosposibnosti produktsii putem primeneniya innovatsionnykh tekhnologiy / A.V. Gorshkova, N.V. Syreychikova // Nauchnoe tvorchestvo molodyezhi – lesnomu kompleksu Rossii: mater. V Vseros. nauch.-tekhnich. konf. – Ekaterinburg: Ural. gos. universitet, 2009. – CH. 1. – P. 127–130.
26. GOST R 52380.2-2005. Rukovodstvo po ekonomike kachestva. CH. 2. – M.: Standartinform, 2005. – 15 p.
27. Panel Discussion. How to Attain Quality Excellence by Statistical and Related Methodologies. Moderator Hiroe Tsubaki. Panelists: Jing Sun, Kazuo Ishiyama, Natcha Thawesaengskulthai, Yury P. Adler, Antony J. Hayer. - 7th ANQ Congress Tokyo 2009. Program Book. – 36 p.
28. Hoerl, R., Snee, R. Statistical thinking: improving business performance. – Duxbury (Thomson Learning Inc.), 2012. – 528 p.
29. Salsburg, D. The lady tasting tea: how statistics revolutionized science in the twentieth century. – N.Y., W.H. Freeman and Co.', 2010. – 340 p.
30. GOST R ISO 9001–2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya. – M.: Standartinform, 2015. – 15 p.

УДК [622.78+669.053.4]:004.891

БАЗА ЗНАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РУДНОГО СЫРЬЯ*

Е.А. Горбатова¹, Е.А. Емельяненко², М.В. Зарецкий³

¹ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского», г. Москва, Россия,

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

³m-zaretsky@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы разработки автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) для процессов переработки рудного сырья. Определено множество параметров, определяющих качество процессов переработки рудного сырья. Описана онтологическая модель базы знаний для АСТПП. Разработана система логического вывода для системы поддержки принятия решений (СППР).

Ключевые слова: переработка рудного сырья, автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП), онтология, логический вывод, система поддержки принятия решений (СППР).

Актуальность работы

Эффективность деятельности современного горнодобывающего предприятия определяется максимально полным извлечением из рудного сырья ценных компонентов при соблюдении норм природоохранного законодательства. Выбор наиболее приемлемого способа переработки рудного сырья и отходов повышает экономическую эффективность предприятия, позволяет минимизировать техногенное загрязнение окружающей среды.

Введение

Ценные компоненты извлекаются из кондиционно-некондиционного природного рудного сырья, из техногенного сырья. В случае, когда извлечение ценных компонентов из некондиционного или техногенного сырья нецелесообразно, возможна его переработка без извлечения ценных компонентов, например, выработка строительных материалов. В том случае, когда любая переработка некондиционного или техногенного сырья нецелесообразна, производится его складирование в химически связанном виде на поверхности или в выработанном пространстве.

Для выбора наиболее целесообразного процесса переработки руды или техногенного сырья создаются автоматизированные системы технологической подготовки производства (АСТПП). Решение задач выбора наиболее целесообразного варианта технологического процесса в АСТПП осуществляется с помощью системы поддержки принятия решений (СППР).

Система правил выбора решения основана на формализованном представлении знаний о минеральном

сырье и технологических процессах его переработки. Формализация знаний о предметной области выполнена в рамках онтологической парадигмы. Выбор наиболее приемлемого решения осуществляется на основе правил логического вывода. При невозможности однозначной формулировки правил вывода используется известный метод парных сравнений, основанный на нечеткологической парадигме.

Анализ литературы

Методологические основы для разработки АСТПП процессов переработки рудного сырья изложены в [1-3]. Принципы онтологического подхода к разработке СППР изложены в [4-6]. Подход к применению указанных принципов для разработки СППР проектирования процессов переработки рудного сырья изложен в [7]. Метод парных сравнений изложен в [8].

Формальное описание проблемы

Технологический процесс является последовательностью взаимосвязанных операций, каждая из которых преобразует входящие материальные потоки в исходящие. Исходящие материальные потоки предыдущей операции являются входящими для следующей операции. Для проведения каждой операции требуется ресурсы (трудовые материальные и т.д.).

Формулируется цель, которая должна быть достигнута в результате проведения технологического процесса. В качестве цели мы рассматриваем достижение результата, удовлетворяющего заданной совокупности критериев.

* Работа выполнена в рамках государственного контракта Российского научного фонда № 14-37-00050

- Входящие материальные потоки могут являться:
- кондиционным сырьем;
 - некондиционным сырьем;
 - техногенным сырьем (кондиционным или некондиционным).

- Исходящие материальные потоки могут являться:
- продуктом производства;
 - техногенным сырьем (кондиционным или некондиционным).

- Ресурсами являются:
- рабочее время персонала;
 - рабочее время оборудования;
 - химические реагенты;
 - электроэнергия;
 - тепловая энергия;
 - вода.

Будем рассматривать технологические операции двух типов. В операциях первого типа (измельчение, дробление) на входной поток оказывается механическое воздействие. В операциях второго типа (флотация, выщелачивание) на входной поток оказывается физико-химическое воздействие.

Технологический процесс представляем, как упорядоченную последовательность технологических операций.

Онтологическое описание проблемы

Сформулируем онтологию в виде [6]:

$$Onto = \langle C, Pr, V, I, R, A, D \rangle$$

Здесь:

- C — множество классов;
- R — множество отношений;
- Pr — множество свойств классов;
- V — множество значений свойств;
- I — множество реализаций классов;
- A — множество аксиом;
- D — множество алгоритмов вывода.

Мы рассматриваем следующие классы:

- C_1 — класс стандартов для рудного сырья;
- C_2 — класс стандартов для медного концентрата;
- C_3 — класс стандартов для цинкового концентрата;
- C_4 — класс рудного сырья;
- C_5 — класс продуктов производства (медный или цинковый концентрат);
- C_6 — класс техногенного сырья;
- C_7 — класс технологических операций;
- C_8 — класс технологических процессов;
- C_9 — класс технологического оборудования.

Множество R состоит из следующих отношений:

- является реализацией (is an instance of...);
- является частью (is a part of...);
- связан (is connected to...);
- имеет сходство (has similarity with...)

Множество свойств класса C_1 состоит из следующих элементов:

- $PCuNorm$ — минимальное содержание меди в рудном сырье (%);
- $PZnNorm$ — минимальное содержание цинка в рудном сырье (%);

- $PSNorm$ — максимальное содержание серы в рудном сырье (%);
- $PAsNorm$ — максимальное содержание мышьяка в рудном сырье (%).

Множество свойств класса C_2 состоит из следующих элементов:

- $PCuMin$ — минимальное содержание меди в концентрате (%);
- $PZnMax$ — максимальное содержание цинка в концентрате (%);
- $PSMax$ — максимальное содержание серы в концентрате (%);
- $PAsMax$ — максимальное содержание мышьяка в концентрате (%).

Множество свойств класса C_3 состоит из следующих элементов:

- $PCuMax$ — максимальное содержание меди в концентрате (%);
- $PZnMin$ — минимальное содержание цинка в концентрате (%);
- $PSMax$ — максимальное содержание серы в концентрате (%);
- $PAsMax$ — максимальное содержание мышьяка в концентрате (%).

Множество свойств класса C_4 состоит из следующих элементов:

- PCu — фактическое содержание меди в рудном сырье (%);
- PZn — фактическое содержание цинка в рудном сырье (%);
- PS — фактическое содержание серы в рудном сырье (%);
- PAs — фактическое содержание мышьяка в рудном сырье (%).
- Ind_Sort — промышленный сорт рудного сырья (рассматриваются 4 сорта).

Множество свойств класса C_5 состоит из следующих элементов:

- $PCuConc$ — фактическое содержание меди в концентрате (%);
- $PZnConc$ — фактическое содержание цинка в концентрате (%);
- $PSConc$ — фактическое содержание серы в концентрате (%).
- $PAsConc$ — фактическое содержание мышьяка в концентрате (%).

Класс C_6 имеет то же множество свойств, что и класс C_4 .

Множество свойств класса C_7 , состоит из следующих элементов:

- $Equip$ — список оборудования для каждой операции;
- $Resource$ — список ресурсов операции.

Каждая реализация класса C_8 , является списком из реализаций класса C_7 .

Множества свойств класса C_9 :

- $Param$ — список основных параметров оборудования.

Алгоритм проектирования технологического процесса

Основные оценки для проектирования технологических процессов формулируются с помощью следующей системы предикатов:

- $Pr_1 = PCu \geq PCuNorm$;
- $Pr_2 = PZn \geq PZnNorm$;
- $Pr_3 = PS \geq PSNorm$;
- $Pr_4 = PAs \geq PAsNorm$;
- $S_1 = Pr_1 \wedge Pr_2$
- $S_2 = Pr_1 \wedge \overline{Pr_2}$;
- $S_3 = \overline{Pr_1} \wedge Pr_2$
- $S_4 = \overline{Pr_1} \wedge \overline{Pr_2}$.

Предикаты Pr_1, \dots, Pr_4 в формализованном виде характеризуют качество рудного сырья — содержание в нем ценных компонентов (меди, цинка), содержание вредных компонентов (серы, мышьяка). С помощью предикатов S_1, \dots, S_4 определяется промышленный сорт рудного сырья.

Предлагаемый алгоритм предусматривает проектирование нескольких допустимых технологических процессов. Для выбора наиболее приемлемого варианта технологического процесса предусмотрена автоматизированная процедура. При необходимости выбор может быть выполнен специалистом без использования автоматизированной процедуры.

Рассмотрим предлагаемый алгоритм.

1. Определение значений предикатов Pr_1, \dots, Pr_4 .
2. Определение значений предикатов S_1, \dots, S_4 :
 - 2.1 Если $S_1 = True$, приступаем к проектированию двух технологических процессов — извлечения меди и извлечения цинка. Переход к шагу 3;
 - 2.2 Если $S_2 = True$, извлекаемыми компонентом является медь. Переход к шагу 3;
 - 2.3 Если $S_3 = True$, основным извлекаемым компонентом является цинк. Переход к шагу 4;
 - 2.4 Если $S_4 = True$, основные извлекаемые компоненты отсутствуют, рудное сырье является некондиционным. Переход к шагу 6;
3. Определение параметров флотационного процесса извлечения меди. Если $S_1 = True$, переход к шагу 4, в противном случае — переход к шагу 5;
4. Определение параметров флотационного процесса извлечения цинка, переход к шагу 5;
5. Для всех проектируемых технологических процессов определение параметров полученного концентрата, определение значения предиката $Q = PAsConc < PAsMax$:
 - 5.1 Цикл по проектируемым технологическим процессам;
 - 5.2 Если для очередного технологического процесса $Q = True$, переход к шагу 5.4;
 - 5.3 Если $Q = False$, необходима гидрометаллургическая доводка черного концентрата, переход к шагу 5.5;
 - 5.4 Проектируем варианты технологического процесса без гидрометаллургической доводки, с различными способами гидрометаллургической доводки.

Для вариантов с гидрометаллургической доводкой переход к шагу 5.5, для вариантов без гидрометаллургической доводки переход к шагу 6;

5.5 Определение параметров концентрата после гидрометаллургической доводки, переход к шагу 6;

6. Определение методов утилизации отходов (некондиционного сырья в случае $S_4 = True$).

Таким образом, на каждом шаге работы алгоритма увеличивается количество рассматриваемых вариантов технологического процесса. Выбор наиболее приемлемого варианта технологического процесса осуществляется в ситуации неустранимой неопределенности. Поэтому представляется логичным обратиться к нечеткологической парадигме. Для каждого из вариантов технологического процесса определяются функции принадлежности к нечеткому множеству «наиболее приемлемый по данному критерию». Затем находится пересечение рассматриваемых нечетких множеств. Элемент, имеющий максимальное значение принадлежности пересечению, признается наиболее приемлемым по совокупности критериев.

В качестве критериев выбраны экономический, экологический и технологический аспекты технологического процесса.

По каждому из критериев строится матрица Саати, в которую заносятся соотношения между рассматриваемыми вариантами V_i и V_j технологического процесса. Компоненты матрицы Саати принимают следующие значения:

- 1 — если преимущество V_i над V_j отсутствует;
- 3 — если преимущество V_i над V_j слабое;
- 5 — если преимущество V_i над V_j существенное;
- 7 — если преимущество V_i над V_j явное;
- 9 — если преимущество V_i над V_j абсолютное.

Также рассматриваются промежуточные соотношения: 2, 4, 6, 8.

Очевидно, что матрица Саати является квадратной. Компоненты матрицы Саати удовлетворяют следующим соотношениям:

$$a_{ii} = 1, i = 1, \dots, n,$$
$$a_{ji} = 1/a_{ij}, i, j = 1, \dots, n,$$

Доказано [8], что компоненты собственного вектора матрицы Саати, соответствующего максимальному собственному числу данной матрицы, могут служить значениями функции принадлежности нечеткому множеству.

Пример применения

Рассмотрим применение предложенной методики к реальным данным. Медно-цинковая руда верхнего яруса Узельгинского месторождения имеет характеристики, представленные в табл. 1.

В данном случае $S_1 = True$. В соответствии с принятым алгоритмом проектируются технологические процессы извлечения меди и извлечения цинка. На следующих этапах рассматриваются два варианта гидрометаллургической доводки черного концентрата с предварительным хлорирующим обжигом и без предварительного хлорирующего обжига. Таким образом, методом парных сравнений сопоставляются четыре варианта технологического процесса.

Таблица 1
Характеристики медно-цинковой руды верхнего яруса
Узельгинского месторождения

№	Элемент	Содержание (%)	Нормативное содержание (%)
1	Cu	1,39	0,6
2	Zn	2,25	1,8
3	S	38,9	38
4	As	0,80	0,15

Обозначим рассматриваемые варианты:

- V_1 — извлечение меди, доводка без предварительного хлорирующего обжига;
- V_2 — извлечение меди, доводка с предварительным хлорирующим обжигом;
- V_3 — извлечение цинка, доводка без предварительного хлорирующего обжига;
- V_4 — извлечение цинка, доводка с предварительным хлорирующим обжигом.

По каждому из критериев были построены матрицы Саати:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/4 & 3 \\ 2 & 4 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 4 \\ 1 & 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

После нахождения и нормирования собственных векторов, соответствующих максимальному собственному числу каждой из матриц Саати, были построены три нечетких множества, характеризующих приемлемость каждого из вариантов технологического процесса по каждому из критериев:

$$G_1 = \left(\frac{1,0}{V_1} \quad \frac{0,43}{V_2} \quad \frac{0,42}{V_3} \quad \frac{0,18}{V_4} \right);$$

$$G_2 = \left(\frac{0,56}{V_1} \quad \frac{0,41}{V_2} \quad \frac{1}{V_3} \quad \frac{0,27}{V_4} \right);$$

$$G_3 = \left(\frac{1,0}{V_1} \quad \frac{0,52}{V_2} \quad \frac{0,93}{V_3} \quad \frac{0,29}{V_4} \right).$$

Найдем пересечение построенных нечетких множеств:

$$G = G_1 \cap G_2 \cap G_3 = \left(\frac{0,56}{V_1} \quad \frac{0,41}{V_2} \quad \frac{0,42}{V_3} \quad \frac{0,18}{V_4} \right).$$

Наибольшее значение функция принадлежности имеет для элемента V_1 . Поэтому в качестве наиболее приемлемого выбран вариант извлечения меди с последующей гидрометаллургической доводкой чернового концентрата без предварительного хлорирующего обжига.

В табл. 2 и 3 приведены характеристики чернового и товарного медного концентрата, полученных в результате применения выбранного варианта технологического процесса.

Таблица 2
Характеристики чернового медного концентрата

№	Элемент	Содержание (%)	Нормативное содержание (%)
1	Cu	19,19	18
2	Zn	5,31	8
3	S	40,07	32
4	As	3,20	0,6

Таблица 3
Характеристики товарного медного концентрата

№	Элемент	Содержание (%)	Нормативное содержание (%)
1	Cu	26,9	18
2	Zn	0,6	8
3	S	32,0	32,0
4	As	0,4	0,6

Концентрат с полученными характеристиками удовлетворяет требованиям нормативных документов [9].

Выводы

Предложена структура базы знаний АСПП переработки рудного сырья. Выполнена формализация описания системы на основе онтологического подхода. Предложена гибридная модель принятия решений, сочетающая логические правила вывода для детерминированных ситуаций и метод парных сравнений для ситуаций неустранимой неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ягудин, Р.А. Технологические решения при переработке медно-колчеданных руд / Р.А. Ягудин, Ю.Р. Ягудина, Е.А. Емельяненко // Горный журнал, 2014. - №7. - С. 30 – 33
2. Вольдман, Г.М. Теория гидрометаллургических процессов / Г.М. Вольдман, А.Н. Зеликман – М.: Металлургия, 1993. – 400с.
3. Абрамов, А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых руд / А.А. Абрамов. – М.: МГГУ, 2004. – 311 с
4. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский – СПб.: Питер, 2000. – 384с.
5. Литвин, В.В. Технології менеджменту знань / В.В. Литвин – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010 – 260с.
6. Черняховская, Л.Р. Онтологический подход к разработке правил принятия решений в проектном менеджменте / Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова // Информационные технологии и системы: труды Второй междунар. конф. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2013. С. 111 – 114

7. Горбатова, Е.А. Онтологический подход к разработке гибридных экспертных систем в гидromеталлургии / Е.А. Горбатова, М.В. Зарецкий // Информационные технологии и системы: труды Третьей междунар. конф. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2014. С. 70 – 71.
8. Saaty, T. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process: the Organization and Prioritization of Complexity. RWS Publications, Pittsburgh, 2001.- 370 p.
9. ГОСТ Р 5998-208 Концентрат медный. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 5с.

KNOWLEDGE BASE OF COMPUTER-AIDED PROCESS PLANNING FOR PROCESSING OF ORE RAW MATERIALS*

E. Gorbatova¹, E. Emelianenko², M. Zaretckii³

¹All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky,
Moscow, Russia

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

Abstract. The development of Computer-Aided Process Planning (CAPP) for ore raw materials is considered. The set of parameters to define the quality of raw ore materials processing is identified. The ontological model of the knowledge base for CAPP is described. The system of logical conclusion for the decision support system (DSS) is elaborated.

Keywords: ore raw materials processing, computer-aided process planning (CAPP), ontology, logical conclusion, decision support system (DSS).

REFERENCES

1. Technological Solutions in the Processing of Copper-Pyrite Ores [Tekhnologicheskiye resheniya pri pererabotke medno-kolchedannykh rud] [Text] / R.A. Yagudin, Yu. R. Yagudina, E.A. Emelianenko // *Gornyi zhurnal [Mining Journal]*, 2014. - № 7. –S. 30-33
2. Voldman G.M. Theory of hydrometallurgical processes [Teoria gidrometallurgicheskikh protsessov] / G.M. Voldman, A.N. Zelikman. – М.: *Metallurgia [Metallurgy]*, 1993. – 400s.
3. Abramov A.A. Processing, Beneficiation and Complex Utilization of Mineral Ores [Pererabotka, obogaschenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopayemykh rud] / A.A. Abramov. – М.: *MSMU [MGGU]*, 2004. – 311s.
4. Gavrilova T.A. Knowledge Bases of Intellectual Systems [Bazy znaniy intellektual'nykh sistem] / T.A. Gavrilova, V.F. Khoroshevskiy. SPb.: *Piter*, 2000. – 384с.
5. Lytvyn V.V. Technologies of Knowledge Management [Tekhnologiyi menedzhmentu znan'] / V.V. Lytvyn. – L'viv: *Vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniky [The Publishing House of the National University "L'vivs'ka politekhnika"]*, 2010. – 260s
6. Cherniakhovskaia L.R. The Ontological Approach to the Development of Decision Making Rules in Project Management [Ontologicheskiiy podkhod k razrabotke pravil prinyatiya resheniy v proektnom menedzhmente] / L.R. Cherniakhovskaia, A.I. Malakhova // *Informatsionnye tekhnologii I sistemy: trudy Vtoroi mezhdunar. Konf. Chelyabinsk: Izd-vo Chelyab. Gos. Un-ta [The Publishing House of Chelyabinsk State University]*, 2013. – S 111-114
7. Gorbatova E.A. The Ontological Approach to the Development of Hybrid Expert Systems in Hydrometallurgy [Ontologicheskiiy podkhod k razrabotke gibridnykh ekspertnykh sistem v gidrometallurgii] / E.A. Gorbatova, M.V. Zaretckii // *Informatsionnye tekhnologii I sistemy: trudy Tretiey mezhdunar. Konf. Chelyabinsk: Izd-vo Chelyab. Gos. Un-ta [The Publishing House of Chelyabinsk State University]*, 2013– S 70-71
8. T. Saaty Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process: the Organization and Prioritization of Complexity. RWS Publications, Pittsburgh, 2001.- 370 p.
9. State Standard R. 5998-208. Copper Concentrate. Specifications. [GOST R. 5998-208. Koncentrat Medniy. Tekhnicheskie usloviia]. – М.: *Izd-vo standartov [Publishing House of Standards]*, 2008.- 5s.

* The work is performed under the state contract of the Russian Science Foundation № 14-37-00050

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ И НАПЛАВКИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ВЫЛЕТА ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ

В.А.Лебедев¹, С.В.Новиков²
^{1,2}ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

¹ valpaton@ukr.net

Аннотация. Рассмотрен процесс наплавки как периодический, где в первый полупериод происходит формирование капли, а во второй – процесс короткого замыкания. Аналитически рассчитаны зависимости силы тока от величины длины дугового промежутка и плотности тока от длины дуговой перемычки. Ключевой особенностью данной работы является переменное значение дугового промежутка, меняющееся по периодическому, наперёд заданному закону. Полученные зависимости должны помочь в разработке технологии и оборудования для контроля формирования структурных составляющих и размера кристаллитов в металле наплавляемого валика с применением внешних низкочастотных механических колебаний.

Ключевые слова: периодическое воздействие, наплавка, распределение тока, длина дугового промежутка, длина перемычки.

Процессы дуговой сварки и наплавки по-прежнему являются одними из ведущих технологий при создании различных металлоконструкций, придания ими необходимых служебных свойств, восстановлении изношенных узлов и деталей.

Для повышения технологической прочности в настоящее время широко применяются различные способы сварки и наплавки с периодическим тепловым или механическим воздействием на расплав сварочной ванны. К их числу относятся способы с механическими колебаниями ванны жидкого металла. Для изучения влияния механических колебаний ванны, их характеристик на свойства наплавленных валиков в ИЭС им. Патона НАНУ была разработана установка (рис. 1), где механические колебания ванны осуществляются в 2 – х плоскостях (рис.2). Здесь схема колебаний приводится для понимания принципа колебаний изделия, а, следовательно, и самой ванны расплавленного металла.

Осуществляя процесс наплавки на данной установке, можно добиться не только формирования желательной структуры металла шва, но и обеспечить необходимую ширину шва с минимальной глубиной проплавления основного металла.

Целью настоящей работы является получение зависимости силы тока дугового процесса от величины длины дугового промежутка и плотности тока от длины дуговой перемычки, которые дают основание для разработки технологии и оборудования для контроля формирования структурных составляющих и размера кристаллитов в металле наплавляемого валика с применением внешних низкочастотных механических колебаний с управляемыми параметрами.

Как известно, процесс наплавки представляет собой перенос металла сварочной проволоки посредством периодических замыканий между электродом и сварочной ванной. А значит, скорость и устойчивость процесса наплавки будет определяться скоростью формирования и плавления перемычки между электродом и сварочной ванны.

Данную величину можно представить зависимостью тока от длины дуги.

В случае колебаний сварочной ванны по вышеописанной схеме управлять формированием капли можно при увеличении длины дуги выше некоторого предельного значения (для наплавки в CO₂ это значение в 4 мм), когда запускается механизм саморегулирования длины дуги, т.е. увеличиваются скоростной и энергетический режимы подачи и плавления проволоки.

Пусть сварочная ванна движется по некоторой дуге вокруг точки *A* по некоторому периодическому, наперёд заданному закону – $\psi(t)$. Расстояние от сварочной ванны до точки *A* также задано и равно *a*. Тогда изменение длины дугового промежутка Δl_0 определится выражением [1] (рис. 3):

$$\Delta l_0 = \delta e^{\frac{t_0}{\theta}}, \quad (1)$$

где δ – величина превышения длины дуги выше 4 мм, t_0 – время горения дуги в процессе саморегулирования, θ – постоянная саморегулирования дуги.

Величина $\delta = atg(\Psi(t))$ задаётся через частотные характеристики колебания ванны (рис. 3), а величина θ – от вольт – амперной характеристики источника питания, и интенсивности плавления металла проволоки. Чем меньше эта величина, тем быстрее длина дуги принимает первоначальное значение.

Распределение тока по длине дуги до образования перемычки можно определить, считая дугу цилиндром радиуса *r*, а изменение напряжённости происходящим только вдоль дуги. Тогда значение определится из известного уравнения Гаусса, записанного в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial E}{\partial l_0} = \frac{1}{\pi r^2 l_0 \varepsilon_0} \int_0^{t_0} I_0 dt, \quad (2)$$

где t_0 [с] – время горения дуги; $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл/В·м – электрическая постоянная.

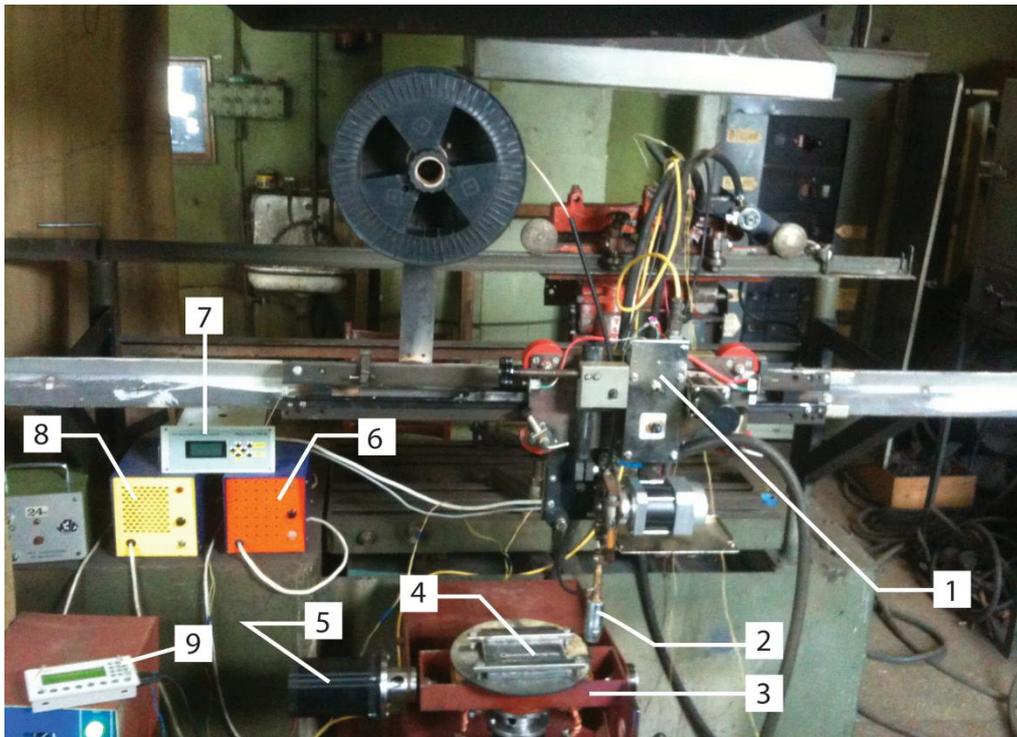


Рис. 1. Схема установки для наплавки с подвижной станиной:

- 1 – пульт управления перемещения горелки; 2 – горелка; 3 – станина; 4 – наплавляемая деталь; 5 – двигатель, сообщающий колебания станине; 6 – блок питания пульта управления поз.1; 7 – индикатор скорости перемещения горелки; 8 – блок питания двигателя поз.5; 9 – программируемый пульт управления режима работы двигателя поз.5

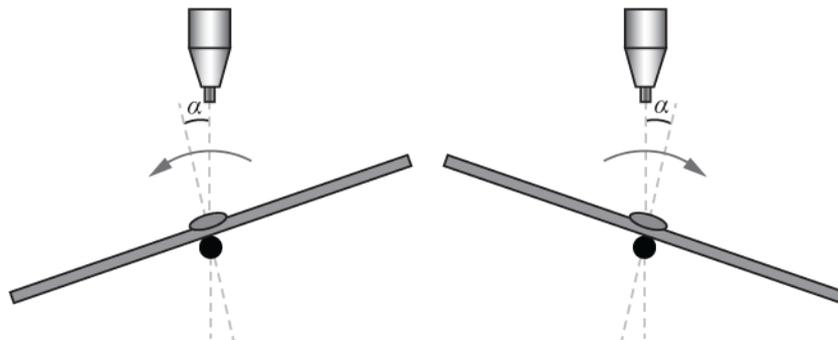


Рис. 2. Принципиальная схема перемещения станины (поз.3) в процессе колебаний

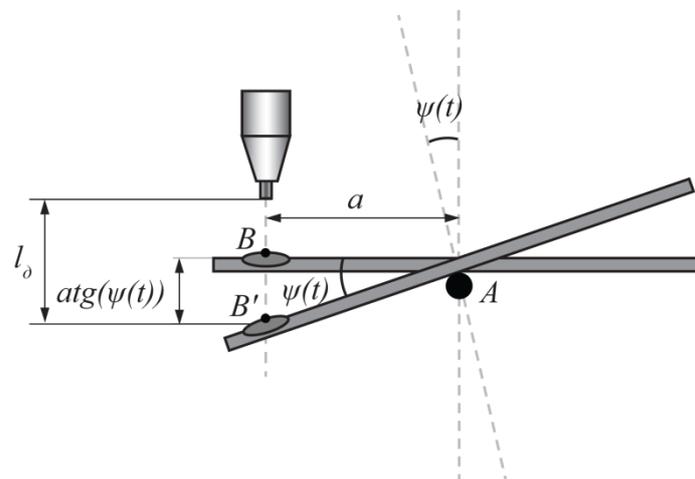


Рис. 3. Иллюстрация к определению изменения длины дуги по уравнению (1)

Производная по времени от обеих частей равенства преобразует выражение (2) к виду:

$$\frac{\pi r^2 l_0 \varepsilon_0 \partial \left(\frac{\partial E}{\partial l_0} \right)}{\partial t} = I_0. \quad (3)$$

Считая, что дуга горит при атмосферном давлении, напряжённость можно определить по формуле [1]:

$$E = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{29} g_e^{1/3}}{I_0^{1/3} a^{1/3}}, \quad (4)$$

где U_i [эВ] – потенциал ионизации атомов газа, a – отношение статистических весов ионов и атомов, g_e [м²] – сечение столкновения частиц с электронами (рамзауэровское сечение).

Тогда с учётом того, что сила тока является функцией времени и длины дуги, можно написать систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\pi r^2 l_0 \varepsilon_0 \partial \left(\frac{\partial E}{\partial l_0} \right)}{\partial t} = I_0 \\ E = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{29} g_e^{1/3}}{I_0^{1/3} a^{1/3}} \\ \frac{\partial I_0}{\partial t} = \frac{\partial I_0}{\partial l_0} \frac{\partial l_0}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

С учетом того, что параметры U_i , a , g_e являются характеристиками дуговой плазмы и постоянными величинами, можно ввести постоянную

$$G = 2,05 \cdot 10^8 \frac{U_i^{29} g_e^{1/3}}{a^{1/3}} \quad (\text{для CO}_2 \text{ [1]: } U_i = 14,3 \text{ эВ; } g_e = 25 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2).$$

При наплавке стальной проволокой: $a_{Fe} = 1,55$, тогда $G \approx 148,95$. Данная система преобразуется в следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{I_0}{\pi r^2 \varepsilon_0} = \frac{4 G l_0}{9 I_0^{7/3}} \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right) \left(\frac{\partial I_0}{\partial t} \right) - \frac{1 G l_0}{3 I_0^{4/3}} \frac{\partial \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right)}{\partial t} - \frac{G}{3 I_0^{4/3}} \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right) \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)$$

Или с учётом $\frac{\partial I_0}{\partial t} = \frac{\partial I_0}{\partial l_0} \frac{\partial l_0}{\partial t}$:

$$\frac{I_0}{\pi r^2 \varepsilon_0} = \frac{4 G l_0}{9 I_0^{7/3}} \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right)^2 \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right) - \frac{1 G l_0}{3 I_0^{4/3}} \frac{\partial \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right)}{\partial t} - \frac{G}{3 I_0^{4/3}} \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right) \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right) \quad (7)$$

Приведенный вид данного уравнения будет таким:

$$\left\{ \frac{\partial \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right)}{\partial t} - \frac{4}{3} \frac{\left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right)^2 \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)}{I_0} + \frac{1}{l_0} \left(\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \right) \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right) = - \frac{3 I_0^{7/3}}{G l_0 \pi r^2 \varepsilon_0} \right. \\ \left. 0 < t < t_0 \right. \quad (8)$$

Решение которого, определяющее зависимость

$\frac{\partial I_0}{\partial l_0} \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)$, будет иметь вид:

$$\frac{\partial I_0}{\partial l_0} = \sqrt{\left(\frac{3 I_0}{8 \Delta l_0} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_0^{10}}{G \pi r^2 l_0 \varepsilon_0} \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)^2} * \\ * \frac{1+e}{1-e} \left(\frac{\frac{8 \partial l_0}{3 \partial t} \frac{t_0}{I_0} \sqrt{\left(\frac{3 I_0}{8 \Delta l_0} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_0^{10}}{G \pi r^2 l_0 \varepsilon_0} \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)^2}}{\frac{8 \partial l_0}{3 \partial t} \frac{t_0}{I_0} \sqrt{\left(\frac{3 I_0}{8 \Delta l_0} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_0^{10}}{G \pi r^2 l_0 \varepsilon_0} \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)^2}} \right) \quad (9)$$

Данное выражение можно выразить через функцию гиперболического котангенса [2]:

$$\frac{\partial I_0}{\partial l_0} = - \sqrt{\left(\frac{3 I_0}{8 \Delta l_0} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_0^{10}}{G \pi r^2 l_0 \varepsilon_0} \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)^2} * \\ * \text{cth} \left(\frac{4}{3} \frac{\partial l_0}{\partial t} \frac{t_0}{I_0} \sqrt{\left(\frac{3 I_0}{8 \Delta l_0} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_0^{10}}{G \pi r^2 l_0 \varepsilon_0} \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)^2} \right) \quad (10)$$

Т.к. значения функции гиперболического котангенса при значениях аргумента, лежащего в пределах (1 ÷ 2), стремятся к 1, а в промежутке (2 ÷ ∞) - всегда равны 1 (при (2 ÷ -∞) - -1), то выражение (11) примет вид:

$$\frac{\partial I_0}{\partial l_0} = - \sqrt{\left(\frac{3 I_0}{8 \Delta l_0} \right)^2 + \frac{9}{4} \frac{I_0^{10}}{G \pi r^2 l_0 \varepsilon_0} \left(\frac{\partial l_0}{\partial t} \right)^2} \quad (12)$$

Из анализа данного выражения видно, что первое слагаемое под радикалом определяет изменение тока в зависимости от длины междугового промежутка за время роста капли, тогда можно определить зависимость силы тока от длины междугового промежутка из выражения:

$$\frac{\partial I_0}{\partial l_0} = \left(\frac{3 I_0}{8 \Delta l_0} \right). \quad (13)$$

Откуда:

$$I_{\partial} = I_{кз} - D\Delta l_{\partial}^{\frac{3}{8}}, \quad (14)$$

где $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, а Δl_{∂} определяется выражением (1). Коэффициент пропорциональности D [А/м] должен определяться экспериментально в зависимости от силы тока сварки.

Второе слагаемое представляет собой величину производной в момент электрического взрыва (газодинамического удара) металлической перемычки, откуда можно определить ток $I^{э6}$:

$$\frac{\partial I^{э6}}{\partial l_{\partial}} = \sqrt{\frac{9}{4} \frac{(I^{э6})^{\frac{10}{3}}}{G\pi r^2 l_{\partial} \varepsilon_0 \left(\frac{\partial l_{\partial}}{\partial t}\right)}}. \quad (15)$$

Откуда:

$$I^{э6} = H^4 \sqrt{\left(\frac{G\pi r^2 \varepsilon_0}{t_{раз} |\ln l_{раз}|}\right)^3}, \quad (16)$$

где $t_{раз}$ – момент разрыва перемычки (электрического взрыва), $l_{раз}$ – длина междугового промежутка в момент электрического взрыва перемычки, H – поправочный коэффициент.

Из чего видно, что в момент взрыва ток будет равен 0, хотя по данным работы [3] в момент предшествующий взрыву плотность тока через перемычку достигает значения в $(1-5) \cdot 10^7$ А/см².

Следует отметить, что максимальное значение скорости изменения тока $\left(\frac{\partial I_{\partial}}{\partial t}\right)$ определяется выражением

$$\text{ем [4]: } \left(\frac{\partial I_{\partial}}{\partial t}\right)^{\max} = \frac{k_{\partial} V_c}{R}, \text{ где } k_{\partial} \text{ [В/м]} - \text{градиент}$$

потенциала в столбе дуги, $V_c = \left(V_{нз} + \frac{\partial l_{\partial}}{\partial e}\right)(1 - k_{фк})$ –

скорость сокращения дугового промежутка, $k_{фк} = (0,2 \div 0,4)$ – коэффициент формы капли, R – эквивалентное сопротивление системы, Δl_{∂} – изменение длины дуги, определяемое уравнением (1). Данная формула позволяет рассчитывать сопротивление системы в зависимости от частотных характеристик процесса.

Зависимость силы тока, протекающего через перемычку от её длины можно определить при некоторых допущениях [5]: форма перемычки цилиндрическая, электрод и сварочная ванна неподвижны, физические свойства металла стационарны.

Т.к. перемычка представляет собой стержень цилиндрической формы, то в отсутствии дуги нагрев будет осуществляться за счёт джоулева тепла, тогда уравнение теплового баланса для единицы длины перемычки будет иметь вид [6]:

$$c\rho F \left(\frac{dT}{dt}\right) = \theta j^2 F, \quad (17)$$

где $c\rho$ [Дж/(м³·°К)] – объёмная теплоёмкость стали, F [м²] – площадь поперечного сечения перемычки, θ [Ом·м] – удельное сопротивление, $\frac{dT}{dt}$ [°К/с] – скорость изменение температуры, j [А/м²] – плотность тока.

Т.к. удельное сопротивление является функцией температуры, его можно выразить посредством закона Видемана – Франца [7]. Тогда, принимая материал перемычки изотропным, уравнение (17) примет вид:

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 \frac{T}{\lambda} j^2, \quad (18)$$

где k [Дж/°К] – постоянная Больцмана, λ [Вт/(м·°К)] – коэффициент теплопроводности, e [Кл] – заряд электрона.

Температура и её производная по времени определяется посредством уравнения теплопроводности для стержня [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda}{c\rho}\right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial l^2}\right) - b(T - T_c), \quad (19)$$

где b [Вт/(м²·°К)] – коэффициент эффективной теплоотдачи.

Т.к. время существования перемычки составляет примерно $(0,5 - 2,75) \cdot 10^{-3}$ сек. [5], то можно считать, что потери на теплоотдачу в окружающую среду пренебрежимо малы, тогда с учетом предельного условия, уравнение (19) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda}{c\rho}\right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial l^2}\right) \\ 0 < t < t_{кз} \\ 0 < l < l_n \end{cases} \quad (20)$$

где $t_{кз}$ – время короткого замыкания. l_n – длина перемычки, значение которой определяется выражением:

$$l_n = l_{\partial} + \delta e^{-\frac{t_{кз}}{\theta}}. \quad (21)$$

Решением данного уравнения будет выражение [8]:

$$T = C_n e^{-\left(\frac{\pi n}{l_n}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{c\rho}\right) t} \sin \frac{\pi n}{l_n} l, \quad (22)$$

а производная будет иметь вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left| -C_n \left(\frac{\pi n}{l_n}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{c\rho}\right) e^{-\left(\frac{\pi n}{l_n}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{c\rho}\right) t} \sin \frac{\pi n}{l_n} l \right|, \quad (23)$$

где n – любое натуральное число, C_n – константа.

Подставляя (22) и (23) в (18) и выражая j , получим выражение зависимости плотности тока, протекающего через перемычку, от её длины $j(l_n)$:

$$j = \sqrt{3} \frac{n e \lambda}{l_n k}, \quad (23)$$

где l_n определяется уравнением (21).

По мере плавления перемычки, величина n вообще является функцией времени и будет возрастать по мере роста j , т.е. по мере утонения перемычки.

Пример. Дано: $a = 20$ мм, $\omega = 50$ Гц, $\psi(t) = \omega t_{\partial}$. Тогда уравнение (1) для значений $t_{\partial} \approx 7,78 \cdot 10^{-4}$ с и $\theta \approx 2 \cdot 10^{-3}$ с примет вид: $\Delta l_{\partial} = 0,02 t g(100\pi 7,78 \cdot 10^{-4}) e^{\frac{7,78 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}}}$, откуда $\Delta l_{\partial} \approx 3,4$ мм.

Тогда при $I_{кз} = 500$ А, $D = 168$ А/м, по уравнению (14): $I_{\delta} = 500 - 168 \cdot 0,0034^{\frac{3}{8}} \approx 480$ А. При длине дуги $l_{\delta} = 4$ мм и $t_{кз} \approx 2 \cdot 10^{-3}$ с, длина перемычки составит величину $l_n = l_{\delta} + 0,02tg(100\pi 2 \cdot 10^{-3})e^{\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} \approx 9$ мм, тогда по выражению (23) плотность тока через перемычку в начальный момент при $n = 1$, $e = 1,60217662 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k = 1,380\ 648\ 52(79) \cdot 10^{-23}$ Дж/°К, $\lambda \approx 50$ Вт/(м·°К) будет равна: $j = \sqrt{3} \frac{1,60217662 \cdot 10^{-19} \cdot 50}{0,009 \cdot 1,38064852(79) \cdot 10^{-23}} \approx 6,47 \cdot 10^7$ А/м².

Выводы

1. Представлен аналитический вывод зависимости величины силы тока от длины дугового промежутка $I_{\delta}(l_{\delta})$ в процессе формирования капли и зависимость величины плотности тока от длины перемычки – $j(l_n)$. Приведен пример расчёта.
2. Величина тока дуги в процессе формирования капли пропорциональна величине длины дугового промежутка. Величина плотности тока, протекающего через металлическую перемычку обратнопропорциональна длине этой перемычки. Эта зависимость является более значительной, что видно по значениям показателей степеней длины (23) (приращения (14)) дуги. Отмечена необходимость проведения серии экспериментов по определению коэффициента пропорциональности в формуле (14).
3. Отмечена возможность влияния на эквивалентное электрическое сопротивление системы посредством частотных параметров процесса через скорость изменения силы тока.
4. Процесс наплавки с наложением внешних механических колебаний может быть эффективно управляемым в полупериод формирования капли посредством изменения силы тока обусловленного изменением величины дугового промежутка, которая регулируется с помощью частотных параметров процесса колебания ванны. Однако данная возможность появляется при значительном увеличении длины дуги, при котором задействуется механизм её саморегулирования.

5. В полупериод короткого замыкания происходит перенос количества металла сформированного за счёт тепла вложенного в первом полупериоде в каплю. Джоулево тепло определяет скорость расплавления дуговой перемычки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. – с. 178, 66, 68, 46-47.
2. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т1. М.: Наука, 1969. – с.107.
3. Заруба, И.И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла // Автоматическая сварка – №3. – 1970. – с. 14 – 18.
4. Дюргеров, Н.Г. Причины периодических замыканий дугового промежутка при сварке короткой дугой // Сварочное производство – №9. – 1974. – с. 1 – 3.
5. Дюргеров, Н.Г. О разрыве перемычки между электродом и сварочной ванной // Сварочное производство – №3. – 1972. – с. 4 – 6.
6. Волченко, В.Н. Теория сварочных процессов / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; под ред. Фролова В.В. – М.: Высшая школа, 1988. – с. 223, 151.
7. Физическая Энциклопедия. Гл. ред. А.М. Прохоров. – М. Советская Энциклопедия. 1998 г. Т1. – с.275.
8. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н.Тихонов, А.А. Самарский. – М.: «Наука», 1977. – с. 197 – 199.

MATHEMATICAL MODEL OF WELDING AND SURFACING WITH COMPUTERIZED WIRE STICKOUT

V.A. Lebedev, S.V. Novikov

Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine

Abstract. The paper considers the process of surfacing as periodic, where formation of drop is going in the first half of the period, and the process of short circuit is in the second half. The dependencies of the current from value of arc length interval and the current density from length of arc jumper have been calculated analytically. The key feature of this article is variable value of arc's interval which varies by a given periodic law. Obtained dependences must help in development of technology and equipment for a control of formation of structural components and crystallite size in the metal of surfacing bead, which has been obtained with use of the external low-frequency mechanical oscillations.

Keywords: periodic influence, surfacing, distribution of current, length of arc interval, length of bridge.

REFERENCES

1. Leskov G.I. Electric welding arc [Elektricheskaya svarohnaya duga], Moscow, Engineering [Mashinostroenie], 1970, pp. 178, 66, 68, 46-47.
2. Fihtengolts G.M. Course differential and integral calculus [Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya], Vol. 1, Moscow, Science [Nauka], 1969, p. 107.
3. Zaruba I.I. Electric blast as a Cause of Scattering [Elektricheskiy vzryiv kak prichina razbryizgivaniya metalla], Autowelding [Avtomaticeskaya svarka], 1970, no. 3, pp. 14 – 18.
4. Dyurgerov N.G. Causes of periodic arc bridging during short arc welding [Prichinyi periodicheskikh zamyikaniy dugovogo promezhutka pri svarke korotkoy dugoy], Welding industry [Svarochnoe proizvodstvo], 1974, no. 9, pp. 1 – 3.
5. Dyurgerov N.G. On bridge break between electrode and molten pool [O razryive peremyichki mezhdu elektrodom i svarochnoy vannoy], Welding industry [Svarochnoe proizvodstvo], 1972, no. 3, pp. 4 – 6.
6. Volchenko V.N., Yampolskiy V.M., Vinokurov V.A. and oth. Welding processes theory [Teoriya svarochnyih protsessov], Moscow, Higher School [Vysshaya shkola], 1988, pp. 223, 151.
7. Prohorov A.M. Physics encyclopedia [Fizicheskaya Entsiklopediya] Vol.1, Moscow, Soviet Encyclopedia [Sovetskaya Entsiklopediya], 1988, p. 275.
8. Tihonov A.N., Samarskiy A.A. Mathematical physics equations [Uravneniya matematicheskoy fiziki], Moscow, Science [Nauka], 1977, pp. 197 – 199.

МНОГОПОДХОДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

Б.Б. Зобнин¹, И.А. Ажипа²

^{1,2}ГОУ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

¹zobninbb@mail.ru

Аннотация. Для моделирования сложных технологических комплексов предложено использовать многоподходное моделирование, когда каждый агент распределенной мультиагентной модели интегрирует различные виды знаний о классе объектов, который он представляет. Предложенный подход использован для проектирования системы очистки пылегазовых потоков. При этом преследуются две основных цели: избавиться от мелкодисперсных частиц, содержащихся в аэрозолях и вернуть в производство или использовать для других полезных целей вещества, содержащиеся в выбросах и поступившие в них в результате ведения технологических процессов.

Ключевые слова: многоподходное моделирование, системы очистки пылегазовых потоков.

Введение (постановка проблемы)

Существует фундаментальная научная проблема управления слабоструктурированными динамическими ситуациями, возникающими в нестационарных сложных технологических комплексах с неполным аналитическим описанием.

Сложная нелинейная динамика управляемых объектов порождает большое разнообразие режимов их поведения, которое необходимо целенаправленно изменять.

Анализ и оптимизация систем управления сложными природными и технологическими комплексами представляют собой сложные и трудноформализуемые процессы.

В настоящее время отсутствует научная постановка и методы решения задачи синтеза систем управления и развития сложных природных и технологических комплексов в условиях неопределенности. Неопределенность вызвана рядом факторов: невозможностью точных измерений характеристик информационных потоков, так как используются усредненные значения, в то время как мгновенные значения передаваемых потоков могут иметь значительный разброс относительно среднего значения; влиянием факторов внешней среды на структуру и параметры технологических комплексов. Таким образом, параметры сложных технологических комплексов не могут быть определены на детерминированном уровне.

Декомпозируя систему на составные части, мы выделяем и анализируем как детерминированные, так и статистические составляющие. Детерминированные составляющие связаны с такими фундаментальными законами природы, как ньютоновские закономерности (законы переноса вещества, энергии, импульса). Стохастические составляющие необходимо учитывать на макро- и миниуровнях. К важнейшим стохастическим особенностям следует отнести характер распределения элементов фаз по времени пребывания в аппарате, вид распределения включений дисперсных фаз по размерам, эффекты взаимодействия между фазами, приводящие к дроблению и коалесценции включений.

Например, физико-химическую систему (ФХС) следует рассматривать как многокомпонентную, многофазную, неоднородную сплошную среду, распределенную в пространстве и переменную во времени, в каждой точке гомогенности которой и на границе раздела фаз имеет место перенос массы, энергии, импульса, момента импульса, заряда (электрического, магнитного) при наличии их источников и стоков [1].

На этапе идентификации ФХС рассматривается совместно с измерительной системой.

С точки зрения используемой технологии, моделирование может проводиться на трех уровнях: уровне гиперструктуры, физической (ФФС) и конструктивной (КФС) функциональной структур. Под гиперструктурой (ГС) понимается некоторая модель технической системы (ТС) в терминах составляющих ее функциональных элементов, характеризующих преобразования вещественных, энергетических и (или) информационных потоков и соответствующих связей между ними. При синтезе ГС осуществляется логическое моделирование, обеспечивающее необходимое соответствие элементов по качественным признакам входных и выходных потоков энергии, вещества и информации [2]. В процессе синтеза ТС модель цели отображается и формулируется на уровне ГС нечеткими отношениями интенсивности потоков, на уровне ФФС - количественными диапазонами величин, на уровне КФС - конкретными значениями величин. Оптимальность каждой структуры понимается в смысле нечеткого соответствия функциональным требованиям и ограничениям на соответствующем иерархическом уровне представления модели цели. В процессе моделирования ТС для представления семантической информации используется метод семантических сетей с нечеткими отношениями между семантическими категориями. Степень разработанности темы исследования определяется тем, что проблематика интеллектуальных агентов (ИА) и мультиагентных систем (МАС) формируется на основе результатов, полученных в рамках таких направлений как «распределенный искусственный интеллект» (DAI – Distributed Artificial Intelligence), «параллельный искусственный интеллект» (PAI – Parallel Artificial Intelligence), «распределенные системы поддержки принятия решений» (DPS - Distributed Problem Solver).

Обоснование подхода к моделированию сложных технологических комплексов на примере устройств очистки пылегазовых потоков

Традиционно в моделировании ФХС используются математические модели, основанные на «физике процессов» и описывающие физические процессы и явления, происходящие при функционировании объекта, сложными дифференциальными уравнениями в частных производных с граничными условиями (например, краевые задачи для усредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса в аэродинамике). Для таких уравнений зачастую неизвестны ни теоремы о существовании и единственности решения, ни характер зависимости решения от параметров и граничных условий. Программные пакеты для анализа таких моделей реализуют различные численные методы решения соответствующих уравнений (например, методы вычислительной аэрогидродинамики - Computational Fluid Dynamics, CFD).

Используемые численные методы имеют значительную вычислительную трудоемкость как самих расчетов, так и подготовки исходных данных, описывающих вариант построения объекта, и расчетных сеток. Это существенно сокращает возможности использования моделей, основанных на «физике процессов», особенно на стадии предварительного (концептуального) проектирования, на которой рассматривается очень большое количество вариантов решений и высока цена неправильного выбранного решения.

При многоподходном моделировании используется более одного из перечисленных ниже подходов: молекулярной динамики, системной динамики; дискретно-событийного, или процессного моделирования; агентного моделирования.

Рассмотрим устройства очистки пылегазовых потоков с позиций извлечения наночастиц из промышленных газовых выбросов.

При этом преследуются две основных цели:

- первая цель заключается в том, чтобы избавиться от мелкодисперсных частиц, содержащихся в аэрозолях;

- вторая цель заключается в том, чтобы возвратить в производство или использовать для других полезных целей вещества, содержащиеся в выбросах и поступившие в них в результате ведения технологических процессов.

Первая цель обусловлена тем, что мелкодисперсные частицы, содержащиеся в аэрозолях, способны проникать в лимфатические узлы, кровяную систему, задерживаться в легких, засорять слизистые оболочки, являясь причиной многих заболеваний и нанося тем самым, непоправимый ущерб здоровью человека.

Вторая цель стимулируется тем, что при обжиге руд и при других металлургических процессах происходит испарение летучих металлов и их соединений с последующей конденсацией и образованием дыма. В результате содержащаяся в отходящих газах тонкая пыль нередко обогащается этими металлами настолько, что становится выгодным их извлечение. Такой побочный концентрат в виде пыли является единственным промышленным сырьем для получения многих редких элементов (селен, теллур, индий и др.), так как при очень

низком содержании этих элементов в полиметаллических рудах прямое их извлечение экономически невыгодно.

Таким образом, общая цель создания технологии извлечения наночастиц из промышленных газовых выбросов заключается в том, чтобы исключить попадание в атмосферу мелкодисперсных частиц и обеспечить их утилизацию. Модель дерева целей может быть описана с помощью связанного ориентированного древовидного графа, вершины которого являются целями различной степени детализации, а ребра - связями между ними.

Применительно к мониторингу загрязнения атмосферного воздуха семантическая сеть объединяет алгоритмические, структурные и производственные знания о загрязнении воздуха в городской агломерации. Основой здесь являются алгоритмические знания, представленные в виде снабженной спецификациями библиотеки подпрограмм, работающих над полем структурированных данных. В спецификации включаются сведения о языке программирования, имени и назначении подпрограмм, списки формальных параметров, типе, семантике, способе передачи параметров и т.д.

Для моделирования устройств очистки пылегазовых потоков предлагается многоуровневый подход, сочетающий методы молекулярной динамики с другими моделями, описывающими объект как целое, например, методом конечных элементов, который делает расчеты более быстрыми. Этот подход основан на методологии многомасштабного моделирования и прототипирования процессов и структур в нанотехнологиях. При создании системы структурно-параметрического синтеза следует придерживаться такой же схемы, когда каждый агент распределенной мультиагентной модели интегрирует различные виды знаний о классе объектов, который он представляет. Тогда мультиагентная система в целом, может представлять практически неограниченное число областей знаний, что было бы невозможно, оставаясь в рамках традиционных (не мультиагентных) технологий инженерии знаний. Предложенная мультиагентная модель распределенной системы структурно-параметрического синтеза образует единое информационное пространство для исследования и проектирования различных систем. Агенты имеют слабую связанность, в виду чего система может легко расширяться за счет добавления новых агентов. Такая мультиагентная модель может быть положена в основу архитектуры перспективных систем автоматизации проектирования, ориентированных на автоматизированный и автоматический структурно-параметрический синтез [3].

Актуальность проблемы описания процесса очистки промышленных газовых потоков от дисперсной примеси определяется тем, что это описание является основой выбора системы газоочистки и режимов ее работы. Построение модели запыленности сводится к установлению по априорным данным причинно-следственных связей между внешними и внутренними стабилизирующими факторами и эффективностью работы системы, а количественные оценки этих связей конкретизируются путем проведения экспериментов на объекте. Тем самым гарантируется общность полученных результатов для всего класса объектов, их непротиворе-

чивость по отношению к ранее полученным знаниям и обеспечивается уменьшение объема экспериментальных исследований.

Для решения задачи построения модели в качестве основополагающей принята концепция функционально-логического анализа вещественных, энергетических и информационных потоков в моделируемой технической системе очистки промышленных газовых потоков. При этом процесс моделирования разделяется на следующие этапы: формирование модели цели, синтез концептуальной модели и интерпретация результата моделирования.

Для построения автоматизированной системы концептуального моделирования в качестве основной принята методология многоагентных систем, основанных на знаниях - интеллектуальных многоагентных систем. Использование многоагентной системы позволит построить распределенную систему параллельного проектирования с возможностью переноса на различные аппаратно-программные платформы.

Существует большое количество определений понятия "агент" в зависимости от взгляда на обработку знаний. С точки зрения распределенных вычислений, агент - это "самостоятельный процесс, выполняемый параллельно, имеющий определенное состояние и способный взаимодействовать с другими агентами посредством передачи сообщений" [4]. Наибольшей информативностью при работе со сложным объектом обладает именно **многомерный подход** – одновременное рассмотрение всех свойств (или, по крайней мере, групп свойств) сложного объекта в совокупности;

Единственным инструментом, который объединяет системную динамику, агентное и дискретно-событийное моделирование является многоподходное имитационное моделирование. Априорная неясность уровня детализации математических моделей, описывающих сложный технологический комплекс, определяется тем, что из-за большого числа взаимосвязей свойств объекта как между собой, так и с внешней средой, построение полностью адекватной модели практически невозможно. При построении математической модели необходим компромисс между ожидаемой точностью результатов и сложностью модели. Точность модели полностью определяет достоверность тех результатов, которые получаются в процессе оптимизации.

Обоснование вида модели технологического комплекса очистки пылегазовых потоков

При исследовании возможностей извлечения наночастиц из промышленных газовых выбросов приходится сталкиваться с моделированием большого количества разнообразных физических процессов: тепломассообмена дисперсной фазы с несущим газом, дробления капель под действием аэродинамических сил, их коагуляции/дробления при взаимных столкновениях. Преобразование спектра частиц дисперсной фазы в процессе очистки промышленных газовых выбросов в значительной мере определяется коагуляцией - процессом слияния частиц в результате их столкновений.

Газовый поток с дисперсными частицами представляет собой многофазную многокомпонентную среду, распределенную в пространстве и времени.

Существенной особенностью процесса движения дисперсных частиц в газовом потоке является его детерминированно-стохастический характер, определяемый наложением стохастических особенностей гидродинамической обстановки на процессы массо- и теплопереноса. Вследствие этого параметры математической модели отражают стохастические особенности протекания процесса движения дисперсных частиц и определяются статистическими методами.

Технологический комплекс очистки пылегазовых потоков, осуществляющий преобразование входного процесса (запыленного газового потока) $X(t)$, в выходной процесс (газовый поток, очищенный от дисперсных частиц) $Y(t)$ может быть описан оператором A :

$$y(t) = A[x(t)]. \quad (1)$$

Оператор A ставит в соответствие каждой функции $x(t)$ входного процесса $X(t)$ функцию $y(t)$ выходного процесса $Y(t)$.

Полагаем, что оператор A является детерминированным, в том смысле, что его свойства при многократном повторении наблюдений за системой остаются неизменными.

Кривые, характеризующие дисперсный состав пыли, принято представлять в вероятностно-логарифмической координатной сетке, тогда экспериментальные точки, определяющие дисперсный состав большинства образцов промышленной пыли, располагаются близко к прямой линии [5]. Наиболее широко применяются в практике исследования промышленных пылей закон логарифмически нормального распределения, а также формулы Розина — Раммлера — Беннета, Ромашова и Годэна — Андреева (экспоненциальный закон). В этом случае дисперсный состав пыли характеризуется двумя параметрами: медианой распределения и дисперсией (или показателем полидисперсности).

Весовая дифференциальная функция распределения частиц по размерам $g_0(\delta)$, для описания которой используется логарифмически нормальный закон:

$$g_0(\delta) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln \delta - \ln \delta_{50})^2}{2 \ln^2 \sigma}\right), \quad (1)$$

где δ – текущий размер частиц, мкм; σ – дисперсия; δ_{50} – масс-медианный размер частицы, мкм.

Для решения задач численного моделирования двухфазных течений широкое распространение получили методы, построенные на сочетании эйлера описания несущей среды и лагранжевого описания дисперсной фазы [6,7].

Частицы примеси считаются однородными твердыми шарами, уравнения движения и теплообмена частиц имеют вид:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = f_p, I_p \frac{d\omega_p}{dt} = T_{\omega}, c_{pm} * m_p \frac{dT_p}{dt} = q_c + q_{\tau}, \quad (2)$$

где $m_p, I_p, v_p, T_p, c_{pm}, T_{\omega}$ – масса, момент инерции, скорость, температура, и угловая скорость частицы, теплоемкость материала частиц, вращающий момент.

На каждом шаге расчета (t^n, t^{n+1}) производится интегрирование уравнений движения и теплообмена всех моделирующих частиц методом Рунге-Кутты. Строится аппроксимация траектории каждой частицы пространственным полиномом второй степени:

$$r(t) = r_2 t^2 + r_1 t + r_0$$

Условие столкновения пары частиц i и j выражается алгебраическим уравнением:

$$|r_i(t) - r_j(t)|^2 = (r_{pi} - r_{pj})^2,$$

где r_{pi}, r_{pj} – радиусы частиц.

На основе полученной аппроксимации траекторий производится расчет параметров соударения пар частиц, а также столкновений частиц с поверхностью преграды.

Обработка столкновений в очереди производится последовательно.

Устанавливаем следующие пространственные и временные границы объекта исследования.

Пространственными границами объекта являются технологические агрегаты – источники пылегазовых потоков, с одной стороны, и атмосферный воздух с другой стороны. Полагаем, что характеристики компонентов пылегазовых потоков задаются внешней системой. Временные границы объекта характеризуются диапазоном частот от 0 до частоты среза ω_c , существенных с точки зрения управления функционированием и развитием технологического комплекса.

Сложность построения модели состава системы состоит в ее неоднозначности. Очевидно, что для отличающихся целей один и тот же объект может потребовать разбиения на различные части. Главным при структурном моделировании является установление функциональных связей между входными, внутренними и выходными параметрами.

Ориентация модели на прогнозирование величины технико-экономических потерь требует оценки чувствительности свойств газового потока, очищенного от дисперсных частиц, к изменениям характеристик запыленного газового потока, выявления технологических операций, являющихся источниками потерь эффективности очистки газового потока, и технологических операций, непосредственно воспринимающих дестабилизирующее влияние источников потерь эффективности.

Анализ структуры технологического комплекса выполним в следующем порядке:

Для пылеулавливания применяют большое число аппаратов, отличающихся друг от друга как по конструкции, так и по принципу осаждения взвешенных частиц. Производственная пыль, как правило, полидисперсная, т.е. в воздухе встречаются одновременно пылевые частицы различных размеров. В любом образце пыли обычно число мелких частиц больше, чем крупных. В большинстве случаев до 60÷80% частиц пыли имеют диаметр до 2 мкм, 10÷20% — от 2 до 5 мкм и до 10% — свыше 10 мкм. Однако общий вес пылевых частиц от 2 мкм весьма незначителен и обычно не превышает 1÷3% веса всего образца пыли. Зная химический состав пыли, можно обоснованно выбрать мокрый или сухой способ очистки газа. Если пыль содержит компоненты, способные образовывать с водой или другой жидкостью,

подаваемой на орошение аппаратов, соединения, которые при оседании на стенках аппаратов и газоходов трудно удалить, применять мокрый способ очистки газов нельзя. По способу улавливания пыли различают аппараты механической и электрической очистки газов [8]. Очистка промышленных газовых потоков от дисперсной примеси может быть описана преобразованием функции распределения дисперсной примеси в образующихся дымовых газах в функцию распределения дисперсной примеси в газах, выбрасываемых в атмосферу.

Требуется достичь эффективности улавливания коксовой пыли, превышающей 90%. Приоритетом обладают сухие методы пылеулавливания, так как уловленная коксовая пыль является сырьем для производства анодной массы.

Структура системы очистки пылегазовых потоков определяется основными свойствами пыли, содержащейся в технологических и вентиляционных газах: химическим составом, плотностью, углом естественного откоса, удельным электрическим сопротивлением, структурой частиц, дисперсностью, токсичностью, воспламеняемостью, смачиваемостью и способностью коагулировать.

Поставленная цель реализуется с использованием системы очистки пылегазовых потоков, которое представляет собой множество взаимосвязанных и взаимодействующих элементов любой природы, объединенных единством цели или общими целенаправленными правилами взаимоотношений.

Знания предметного специалиста об условиях применения объекта того или иного класса в процессе вычислений представляются в виде набора продукций, который является и объектом определенного класса модели [9].

Состояние модели Grid-системы задается в виде структуры $s = \langle C, O, P, T \rangle$.

Рассматриваемый язык представления знаний о Grid-системе включает синтаксические конструкции вида: $\langle \text{Имя базового оператора} \rangle (\langle \text{Параметр 1} \rangle, \langle \text{Параметр 2} \rangle, \dots, \langle \text{Параметр } n \rangle)$.

Данный язык позволяет представить любые действия с моделью Grid-системы как последовательность базовых операторов. В результате выполнения базового оператора происходит переход из исходного состояния модели $s = \langle C, O, P, T \rangle$ в результирующее. На выполнение базовых операторов могут быть наложены ограничения двух видов: встроенные в транслятор языка описания модели Grid-системы и дополнительные, определяемые разработчиком модели. К первому виду относятся блокировки дублирования и уничтожения классов или объектов, проверка соответствия типов и другие подобные ограничения целостности модели. Ограничения второго вида определяют специфику объектов модели и взаимосвязей между ними. Они формируются разработчиком с помощью специальной подсистемы транслятора.

Различают задачи идентификации в широком (структурная идентификация) и узком смысле (параметрическая идентификация) соответственно. В первом случае неизвестна структура и параметры оператора \hat{A} , во втором – лишь параметры этого оператора.

Задача структурной идентификации для данного примера заключается в выборе структуры устройства газоочистки.

Максимальная эффективность системы газоочистки от дисперсной примеси достигается при условии согласования параметров системы очистки пылегазовых потоков с параметрами потока газов от источника их образования.

В результате решения задачи оптимизации с использованием построенной модели получена структура устройства газоочистки, удовлетворяющая заданным ограничениям и обеспечивающая требуемую степень очистки.

Задача оптимизации решается при следующих условиях.

Известно множество объектов (модулей) Q системы W очистки пылегазовых потоков:

$$Q = \{Q_k \mid k \in N^Q\}, \quad (4)$$

где Q_k – собственное подмножество множества Q объектов k -го типа; N^Q – множество индексов типов объектов.

Множество отмеченных свойств объекта k -го типа:

$$R_k(Q_k) = \{r_{k,v} \mid k \in N^Q, v \in V(k)\}, \quad (5)$$

где $r_{k,v}$ – v -ое свойство объекта k -го типа; $V(k)$ – множество обозначений свойств объектов k -го типа.

К модулям системы очистки относятся: пылеосадительные камеры, циклоны, электрофильтры и т.д.

К предикатам, характеризующим отношения между объектами, относятся: статистические характеристики распределения частиц по размерам и удельное электрическое сопротивление пыли.

Например, при медианном диаметре пыли, равным 32 мкм, в качестве первого звена в системе газоочистки будем использовать циклон, так как пылеосадительная камера применяется при медианном диаметре свыше 40 мкм; по значению удельного электрического сопротивления слоя пыли (УЭС) пыль относится к третьей группе (пыли с УЭС = $10^{10} \dots 10^{13}$ Ом·см), т.к. в данном варианте значение УЭС = $4 \cdot 10^{12}$ Ом·см при температуре 50 °С, а пыли с высоким УЭС наиболее трудно улавливаются в электрофильтре, то используем тканевый рукавный фильтр с импульсной продувкой.

Заключение

Обоснован подход к моделированию сложных технологических комплексов на примере устройств очистки пылегазовых потоков на стадии концептуального проектирования. Используется методология многоагентных систем, основанная на знаниях. На основе методологии многомасштабного моделирования и прототипирования процессов строится дерево целей, описываемое связным ориентированным графом. Рассмотрен пример решения задачи оптимизации структуры очистки пылегазового потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976-499с.
2. Заболевая-Зотова, А. В. Применение агентно-ориентированной технологии к синтезу новых технических систем / А. В. Заболевая-Зотова, М. В. Набока // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2004. – № 5.
3. Зобнин, Б.Б. Мультиагентные системы. Управление сложными технологическими комплексами / Б.Б. Зобнин, А.В. Вожегов // LAP, Saarbrücken, Deutschland, 2014
4. Смирнов, А. В. Многоагентная технология проектирования сложных систем / А. В. Смирнов, Л. Б. Шереметов // Автоматизация проектирования, 1998. – № 3.
5. Справочник по пыли и золоулавливанию / Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
6. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press LLC, 1998, 471 p.
7. Tsirkunov Yu. M. Gas-particle flows around bodies – key problems, modeling and numerical analysis. // Proc. Fourth International Conference on Multiphase Flow (Ed.: E. Michaelides), May 27 – June 1, 2001, New Orleans, LA, USA. – CD ROM Proc. ICMF'2001, paper No. 609, 31 p.
8. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков. – М.: Химия, 1981. – 320 с.
9. Опарин, Г.А. Входной язык объектно-ориентированной базы знаний GRID-системы / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, Э.К. Вартанян // Программные продукты и системы, 2012. – №1. – С.3-6.

MULTIAPPROACH MODELING FOR CLEANING STREAMS OF DUST AND GAS

B.B.Zobnin, Y.A. Azhipa
Ural state Mining University

Abstract. For modeling of difficult technological complexes it is offered to use multiapproach modeling when each agent of the distributed multiagent model integrates different types of knowledge of a class of objects which he represents. The offered approach is used for design of system of cleaning streams of dust and gas. This has two main objectives: to get rid of fine particles contained in aerosols and return to production or be used for other purposes beneficial substances contained in emissions and received by them as a result of conducting the technological processes.

Keywords: multiapproach modeling of cleaning streams of dust and gas.

REFERENCES

1. Kafarov V. V., Dorokhov I. N. System analysis of chemical engineering processes. Fundamentals of strategy – M.: Science, 1976-499 p.
2. A. V. Zabalueva-Zotov, M. V. Naboka. The use of agent-oriented technology to the synthesis of new technical systems// proceedings of the Volgograd state technical University, No. 5 / 2004
3. Zobnin B. B., Vozhegov A.V. multi-agent systems. Management of complex technological systems // LAP,Saarbrucken, Deutschland, 2014.
4. Smirnov A.V., Sheremetov L. B. multi-agent technology for complex systems design // design automation - 1998. - No. 3.
5. Reference pile and ash removal Under the General editorship of A. A. Rusanov. – M.: Energy, 1975. – 296 p.
6. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press LLC, 1998, 471 p.
7. Tsirkunov Yu. M. Gas-particle flows around bodies – key problems, modeling and numerical analysis. // Proc. Fourth International Conference on Multiphase Flow (Ed.: E. Michaelides), May 27 – June1, 2001, New Orleans, LA, USA. – CD ROM Proc. ICMF'2001, paper No. 609, 31 p.
8. Uzhova V. N., Valdberg, A. J., Myagkov B. I. Purification of industrial gases from dust. – M.: Chemistry, 1981.-320 with
9. G. A. Oparin, A. G. Feoktistov, A. K., Vartanian. The input language for object - oriented knowledge base GRID – system // Software products and systems, 2012, N1, pp. 3-6.

