

ISSN (Print) 2306-3173

ISSN (Online) 2413-1601

№ 1 (15), 2017

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

AUTOMATION  
OF TECHNOLOGIES AND  
PRODUCTION



# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№1 (15) март 2017 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 и вёрстка:** 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 3.2017. Тираж 500 экз. Цена свободная.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

**Автоматизированные системы управления**

- М.Ю. Рябчиков, Р.Э. Бурнашев,  
Е.С. Рябчикова, А.П. Берестов**  
Современные тенденции проектирования  
автоматизированных систем управления  
дробильно-сортировочным комплексом..... 4  
**А.И. Божков**  
Человеческий фактор в системах управления  
качеством..... 13  
**Е.Е. Диденко**  
Способы снижения динамических нагрузок  
трансмиссий рабочих валков при входе полосы  
в клетки чистой группы стана горячей  
прокатки..... 25  
**Р.Р. Загидуллин**  
Теоретические основы планирования процессов  
предприятия..... 28

**Математическое моделирование технологи-  
ческих систем и объектов управления**

- В.В. Жихаревич,  
Л.М. Шумиляк, С.Э. Остапов**  
Автоматизация управления процессом  
выращивания кристаллов при вертикальной  
зонной плавке..... 36  
**М.Ю. Пустоветов, А.В. Чубукин**  
Влияние индуктивности Г-образного фильтра в  
звене постоянного напряжения преобразователя  
частоты на потребляемый из сети ток..... 43  
**С.В. Стельмашук**  
Моделирование в среде simulink рулевой  
машины судна с математическим описанием  
силы давления воды по модели жуковского..... 50  
**О.М. Пигнастый, Р.О. Корсун**  
Построение модели одноузловой конвейерной  
линии с постоянной скоростью..... 55

**Автоматизация контроля и испытаний**

- Ю.Н. Чуднов, А.В. Гурьянов, А.В. Шукhalov,  
И.Э. Шультайс, М.А. Трушкин**  
Применение опто-электронных технологий для  
управления бортовым средством индикации..... 65  
**Г.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин**  
Обзор методов калибровки инструмента  
промышленных роботов..... 71  
**М.С. Бундур, Н.А. Пелевин,  
В.А. Прокопенко**  
Анализ критериев оценки динамического  
качества при корректировании гидростати-  
ческих подшипников шпиндельных узлов..... 75

**Обработка данных, информационное и  
программное обеспечение**

- автоматизированных систем управления**  
**В.Д. Тутарова, И.Г. Зорина, Т.О. Скачков,  
О.А. Турбина, И.О. Кожевников**  
Автоматизированная информационная система  
«Паспортизация учебных помещений»..... 81

**Automatic control systems**

- M.Yu. Ryabchikov, R.Je Burnashev,  
E.S. Ryabchikova, A.P. Berestov**  
Actual guidelines of crushing and screening complex  
automated control system developing..... 4  
**A.I. Bozhkov**  
The human factor in quality management systems..... 13  
**E.E. Didenko**  
The ways of relief of dynamic loadings of  
transmissions of working rolls at the entrance of strip  
into stands of finishing group of the hot rolling mill... 25  
**R. R. Zagidullin**  
Theoretical bases of planning of processes of the  
enterprise..... 28

**Mathematical simulation  
of control systems and objects**

- V.V. Zhikharevich,  
L.M. Shumylyak, S.E. Ostapov**  
Automation of control of the vertical zone melting  
crystal growth process..... 36  
**M.Yu. Pustovetov, A.V. Chubukin**  
The influence of the inductance of L-filter in the DC  
link of the VVVF converter on the consumption of  
network current..... 43  
**S.V. Stelmashchuk**  
Modeling in the simulink of the ship's steering gear  
with a mathematical description of the water pressure  
force according to zhukovsky's model..... 50  
**O.M. Pihnastyi, R.O. Korsun**  
Building a single-node conveyor line model with a  
constant speed..... 55

**Automated Inspection and Testing**

- Yu.N. Chudnov, A.V. Gurianov, A.V. Shukhalov,  
I.E. Shultays, M.A. Trushkin**  
The optical-electronics technologies application for  
the flight instruments handling..... 65  
**G.N. Krakhmalev, D.I. Petreshin**  
Overview of calibration methods  
for industrial robots..... 71  
**M.S. Bundur, N.A. Pelevin,  
V.A. Prokopenko**  
The analysis of criteria for evaluation of dynamic  
quality by a correcting of hydrostatic bearings of  
spindle units..... 75

**Data processing,  
automated control systems software**

- V.D. Tutarova, I.G. Zorina, T.O. Scachkov,  
O.A. Turbina, I.O. Kogevnikov**  
Automated information system  
«The certification of classrooms»..... 81



УДК: 004.415.25

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНЫМ КОМПЛЕКСОМ**

**М.Ю. Рябчиков<sup>1</sup>, Р.Э. Бурнашев<sup>2</sup>, Е.С. Рябчикова<sup>3</sup>, А.П. Берестов<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Россия

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

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются основные тенденции проектирования автоматизированных систем управления дробильно-сортировочными комплексами. Приведены примеры исследований в данной области, а также описан опыт проектирования модульной системы управления дробильно-сортировочным комплексом на предприятии ЗАО «Урал-Омега».

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления; дробильно-сортировочный комплекс; центробежные дробилки; модульная структура; техническое решение.

Современное производство железобетонных изделий и дорожных покрытий на данный момент требует использования высококачественных заполнителей, от свойств которых зависят как эксплуатационные характеристики конечной продукции, так и расход дорогостоящих вяжущих компонентов. Для получения заполнителей с требуемыми качественными показателями проектируются и используются линии на основе дробильных агрегатов центробежно-ударного принципа действия с горизонтальным или вертикальным ротором, а также модифицированных конусных дробилок [1].

Процесс производства строительных заполнителей является энергоемким и его эффективность во многом зависит от системы управления, корректная работа которой может существенно снизить затраты энергетических и трудовых ресурсов, а также обеспечить требуемые качественные показатели.

Таким образом, существует актуальная задача разработки автоматизированных систем управления дробильно-сортировочными комплексами (далее АСУ ДСК) высокой эффективности, обеспечивающих максимально возможный коэффициент использования оборудования, а также заданные показатели качества продуктов дробления. В данной работе рассмотрены некоторые современные тенденции в проектировании АСУ ДСК, а также опыт нескольких последних реализаций АСУ ДСК предприятия ЗАО «Урал-Омега».

Сравнение систем автоматизации ДСК различного уровня и производителей показывает наличие четырех типовых уровней автоматизации [2]:

1. Релейная система с органами управления и индикации, расположенными на лицевой панели шкафа автоматики или на выносном пульте оператора;
2. Система на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) с панелью управления;
3. Система на базе ПЛК с возможностью связи и передачи информации на верхний уровень;

4. Трёхуровневая система на базе ПЛК и персонального компьютера, обеспечивающего хранение архивов данных о ходе технологического процесса.

Первый вариант в современном проектировании уже не используется и является устаревшим. Такие системы можно встретить на производствах, где длительное время не проводилась модернизация.

Второй вариант встречается довольно часто при продаже агрегатов с системой управления и является локальной системой, которую сложно интегрировать в системы управления верхнего уровня. Преимущества такого варианта – простота и сравнительно низкая стоимость. Однако построить на основе таких систем высокотехнологическое автоматизированное производство весьма сложно. Следует отметить, что такие системы могут обладать весьма широким функционалом, включая удобный человеко-машинный интерфейс (панели оператора и сенсорные контроллеры, например, ОВЕН СПК1xx) и сохранение данных (внешние архиваторы, например, ОВЕН МСД200)

Третий вариант представляет собой усовершенствованную версию второго. В этом случае организуется подготовка данных для обмена с системой верхнего уровня. Такой подход предполагает возможность передачи данных технологического процесса и получения управляющих команд от внешнего источника. Таким образом, возникает потребность в ОПС-сервере и разработке дополнительных управляющих алгоритмов, что повышает сложность и стоимость разработки программного обеспечения. Разумеется, данные затраты целесообразны только при интеграции разрабатываемой системы в имеющуюся систему верхнего уровня.

Четвертый вариант представляет собой наиболее сложное и дорогостоящее, но вместе с тем наиболее функциональное решение. Данный вариант больше всего подходит для высокопроизводительных стационарных линий, но для небольших производств, зачастую, оказывается слишком затратным.

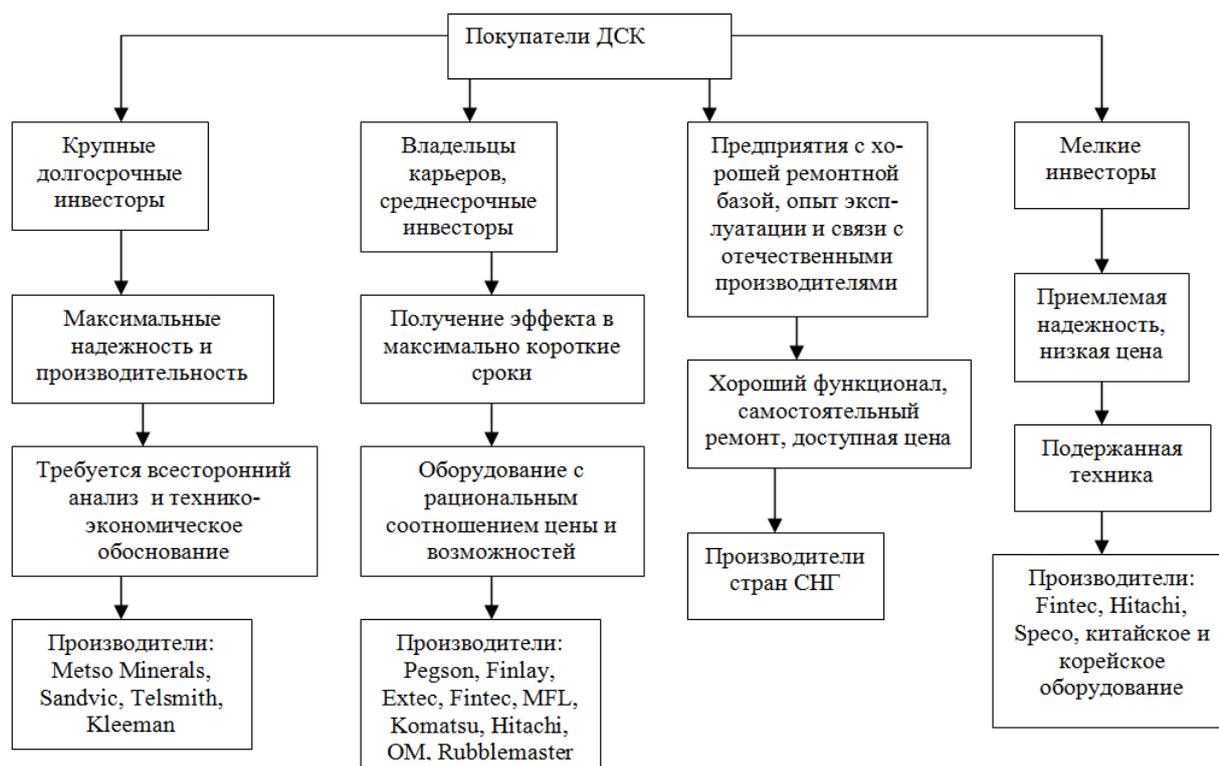


Рис. 1. Группировка производителей и покупателей ДСК

Таким образом, функционал проектируемой АСУ ДСК определяется не только возможностями производителя, но и возможностями покупателя. Группы покупателей руководствуются различными критериями при покупке оборудования и предъявляют разные требования к функционалу оборудования и систем автоматизации. Производителей и покупателей ДСК можно подразделить на ряд групп, представленных на рис. 1. Более подробно с особенностями продукции различных Российских и Украинских производителей ДСК можно ознакомиться в работе [3].

ДСК следует разделить на два основных типа: стационарные и мобильные. Здесь необходимо отметить, что понятие мобильных ДСК в настоящий момент целесообразно подразделить на транспортабельные (передвижные) и интегрированные-самоходные. Последние представляют собой высокотехнологичные, достаточно надежные, но и дорогостоящие агрегаты, срок развертывания которых может составлять 1-2 дня. Российские компании обычно делают акцент на производстве транспортабельных ДСК, что позволяет использовать некоторые преимущества стационарных ДСК [4].

Основными критериями выбора типа ДСК являются: требуемая производительность; продолжительность разработки месторождения, удаленность места добычи от места отгрузки материала.

Считается [1], что стационарное оборудование эффективно при разработке месторождений прочных горных пород, с производительностью от 300 т/ч, в случае если есть выделенная электрическая сеть.

Для работы стационарного оборудования необходимо наличие выемочно-погрузочной и транспортировочной техники, ремонтной базы, наличие бетонных площадок. Последующий разбор подобного комплекса затруднен. Согласно [5] общие временные затраты на

разработку и внедрение автоматизированной системы управления стационарной ДСК составляют порядка 240 дней.

Основной отличительной особенностью мобильной технологической установки от стационарной является отсутствие необходимости в возведении фундаментов и производственных помещений. В то же время, для мобильных ДСК сроки выполнения электро-монтажных и пусконаладочных работ могут находиться в пределах до четырех недель с обучением персонала [6].

Для крупных инвесторов большой интерес представляют стационарные ДСК, т.к. данный тип заведомо может обеспечить более высокий уровень производительности, нежели мобильные ДСК. Для среднесрочных и мелких инвесторов большой интерес представляют мобильные ДСК, т.к. данный тип требует существенно меньших стартовых капиталовложений и в случае закрытия производства, например, по причине выработки карьера, такое оборудование существенно проще продать.

Таким образом, для проектной организации необходимо иметь гибкое техническое решение, позволяющее оптимизировать физическую и логическую структуру АСУ ДСК в соответствии с потребностями конкретного заказчика.

Ряд исследователей [7-9] в своих работах делают вывод о том, что целесообразно строить структуру АСУ ДСК по агрегатно-модульному принципу. При этом основу производственной системы должны составлять стандартные модули, интегрирующие в себе устройства дробления и сортировки, микропроцессоры системы управления, а также устройства, обеспечивающие выполнение вспомогательных производственных операций. Также известно, что автоматизация процесса технологической подготовки ДСК, включая монтажные работы, является актуальной задачей. Ряд исследователей



**Рис.2. Открытые переходы на кабельной трассе**

[10] предлагает учитывать особенности ее решения при выборе функциональной структуры мобильных ДСК совместно с решением основной задачи дробления. В то же время, отсутствуют рекомендации по реализации такого подхода на практике.

Типовое решение предполагает централизованную структуру аппаратного обеспечения АСУ ДСК, т.е. все основное оборудование АСУ (ПЛК, модули ввода-вывода, пусковая аппаратура) расположено в модуле управления. Многие проектные организации [11-14] строят системы управления по такому принципу, поскольку такая организация оборудования АСУ ДСК имеет ряд достоинств:

- Все основное электрооборудование находится в модуле управления, что упрощает его обслуживание и обеспечивает оптимальные условия эксплуатации.
- Минимальное количество клеммных соединений: шкаф управления – переходная клеммная коробка на агрегате – нагрузка агрегата (двигатель, датчик и т.д.).
- Каждый кабель подключается только к одной нагрузке, поэтому в случае его повреждения остальные элементы не будут повреждены.

Однако есть также недостатки, основным из которых является большая длина силовых и контрольных кабелей, что помимо материальных затрат влечет за собой большие трудовые и временные затраты при прокладке кабелей. На больших линиях, где осуществляется несколько стадий дробления и грохочения, организация кабельных трасс при таком принципе организации электрооборудования представляет собой довольно сложную и трудоемкую задачу. Зачастую ее решение и реализация далеки от идеала, особенно в полевых условиях (рис.2).

На рис.2 красными прямоугольниками показаны открытые переходы кабелей между конвейерами. Очевидно, что такой способ прокладки не лучшим образом осуществляет защиту изоляции кабелей от внешних воздействий. Гибкие гофрированные трубы в

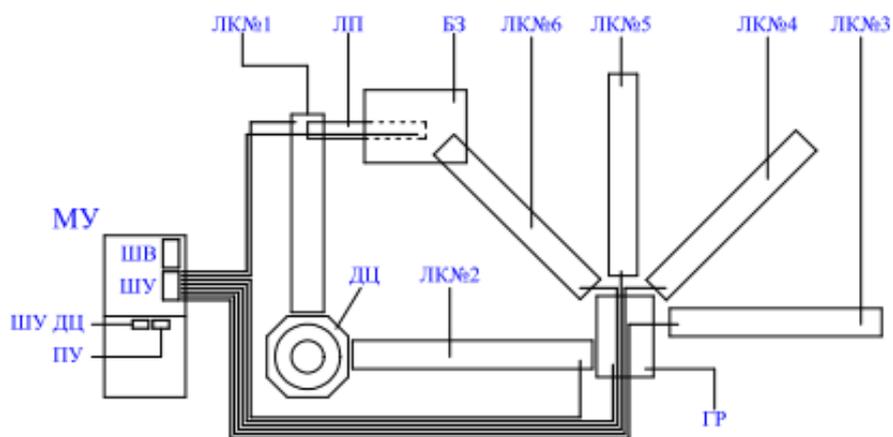
данной ситуации прослужат недолго, т.к. присутствуют длинные незакрепленные участки. Применение высококачественной полиамидной трубы или металлических рукавов увеличивает срок эксплуатации такого перехода, однако существенно повышает стоимость трассы.

Таким образом, прокладка цельных кабелей для электроприводов и датчиков (переходных клеммных коробок) агрегатов существенно осложняет монтаж и демонтаж кабельной продукции, повышает временные затраты, а также вероятность повреждения кабеля, особенно при работе в зимнее время. И если в случае со стационарным ДСК эти работы необходимо провести лишь один раз, то в случае с мобильным ДСК предполагается неоднократное проведение монтажа и демонтажа, как кабельной продукции, так и частей кабельной трассы.

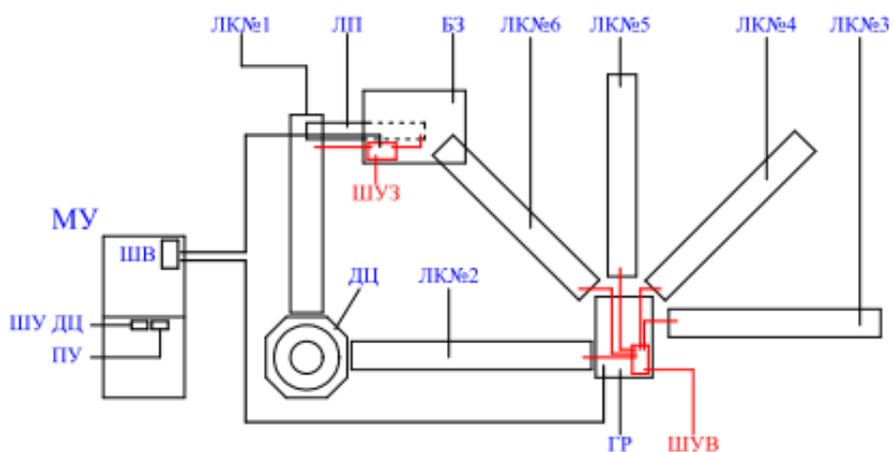
Одним из способов решения данной проблемы является реализация универсального технического решения, на основе которого можно реализовать как стационарный, так и передвижной ДСК. В ЗАО «Урал-Омега» [15] был разработан вариант такого технического решения для блочного построения структуры АСУ ДСК. После анализа целесообразности различных вариантов объединения технических блоков, было решено разбить систему на следующие три основных блока: управления загрузкой; управления дробилкой; управления выгрузкой.

Такое деление позволяет локализовать основные силовые и оперативные цепи в трех точках: шкаф управления загрузки, располагающийся на бункере загрузки; модуль управления, располагающийся рядом с центробежной дробилкой (в модуле управления находятся помещение оператора и электро-помещение); шкаф управления выгрузки, располагающийся на грохоте. На рис.3. приведена условная схема, иллюстрирующая различия между типовой и разработанной структурами.

Предложенная структура АСУ ДСК помимо прочих преимуществ реализации модульного подхода позволила снизить затраты на кабельную продукцию и значительно упростить ее монтаж, что дало возможность



а)



б)

**Рис.3. Типовой (а) и предлагаемый (б) варианты структуры оборудования АСУ ДСК:**  
**МУ – модуль управления; ШВ – шкаф ввода; ШУ ДЦ – шкаф управления ДЦ; ПУ – пульт управления; ЛК – ленточный конвейер; ЛП – ленточный питатель; БЗ – бункер загрузки; ГР – грохот; ДЦ – центробежная дробилка; ШУЗ – шкаф управления загрузкой; ШУВ – шкаф управления выгрузкой**

существенно сократить трудовые и временные затраты. При прочих равных условиях, затраты на кабельную продукцию для транспортной системы снижаются на 9-11%.

Как отмечалось, при типовом подходе к построению АСУ ДСК все основное оборудование сконцентрировано в одной точке. Управление дробильно-сортировочным комплексом осуществляется с помощью двух программируемых логических контроллеров ОВЕН ПЛК110-60Р, к которым через последовательный интерфейс RS485 посредством протокола Modbus RTU подключены дополнительные модули ввода-вывода ОВЕН серии МХ110 и частотные преобразователи. На модули ввода-вывода приходят сигналы с датчиков, пусковой аппаратуры, светосигнальной аппаратуры, а также включается подсветка светосигнальной аппаратуры, световая и звуковая сигнализация.

В качестве преобразователей частоты используются преобразователи фирмы Danfoss серии FC302 и FC51, что обусловлено многолетним сотрудничеством и опытом эксплуатации этих частотных преобразователей на предприятии ЗАО «Урал-Омега». В качестве пусковой аппаратуры для неуправляемых приводов используются

изделия фирмы АВВ, которые также зарекомендовали себя в процессе эксплуатации. Датчики противоаварийной автоматики выбраны отечественного производителя – ТЕКО, в виду того что обеспечивают необходимую надежность и долгий срок службы.

При реализации модульной концепции построения ДСК АСУ также строится на двух контроллерах, которые расположены в шкафу управления ДЦ и пульте управления ДСК, находящихся в помещении оператора (т.е. в модуле управления). Для контроля и управления технологическим оборудованием транспортной системы используются модули ввода-вывода RealLab серии NL, которые обладают расширенным диапазоном рабочих температур (от -400С до +700С), что позволяет устанавливать их в шкафах загрузки и выгрузки, располагающихся непосредственно на оборудовании (т.е. вне оборудованных помещений). При этом осуществляется обогрев шкафов до температуры, близкой к нулю, что способствует более благоприятному режиму эксплуатации.

Для организации эргономичного человеко-машинного интерфейса используется сенсорный панельный контроллер ОВЕН СПК207, который помимо



**Рис.4. Фотографии АСУ ДСК ЗАО «Урал-Омега», поставленной для ООО «ОКС»**

организации взаимодействия АСУ с оператором реализует часть управляющих функций. Кроме того, осуществляется архивация аварийных событий и основных технологических параметров с помощью модуля сбора данных ОВЕН МСД200.

Для монтажа и демонтажа электрооборудования ДСК было решено использовать водонепроницаемые силовые разъемы АВВ и разъемы оперативных цепей Revos Basic фирмы Wieland, которые обеспечивают: быструю и качественную коммутацию; надежность и высокую степень защиты (IP67); конструктивную защиту от неправильного подключения. Таким образом, достаточно промаркировать кабели и разъемы, а также составить таблицу подключений, и коммутацию сможет произвести быстро и качественно любой технический персонал, даже не имеющий опыта работы с электротехнической продукцией. Чтобы максимально сократить время коммутации, шкафы загрузки и выгрузки, а также переходные коробки на конвейерах и питатели оборудованы вышеуказанными разъемами. При транспортировке часть кабелей можно будет оставлять непосредственно в кабельной трассе, что также сократит время монтажа/демонтажа, а также снизит вероятность повреждения кабелей.

Такое решение приводит к существенному удорожанию системы управления в виду того, что стоимость разъемов достаточно велика. Однако оно позволяет заказчику отказаться от привлечения сторонней электромонтажной организации и осуществить монтаж кабельной продукции своими силами, что существенно экономит средства.

Значительные изменения, основанные на опыте эксплуатации предыдущих дробильно-сортировочных комплексов, претерпели программы управления, как центробежной дробилкой, так и транспортной системой, особенно в области повышения безопасности и удобства проведения пуско-наладочных и ремонтных работ. На рис.4 приведены фотографии реализованной АСУ мобильного ДСК.

Анализ результатов разработки и внедрения данной системы показал, что при разделении электрооборудования ДСК на модули целесообразно в качестве основного агрегата модуля выбирать грохот, или же бункер (для системы загрузки, если отсутствует предварительное грохочение).

Установка шкафа управления на грохоте или в непосредственной близости от него позволяет организовать кабельную трассу наиболее эффективным образом (рис.5, а). При этом от модуля управления необходимо привести всего два кабеля: силовой и кабель связи. Длина кабелей силовых и оперативных цепей управления конвейерами выгрузки грохота будет минимальной, а их длину несложно просчитать заранее. Данный факт позволяет предоставить заказчику набор готовых кабелей с соответствующими разъемами (рис.5, б), что снизит уровень сложности электромонтажа оборудования АСУ до бытового пользования («розетка-вилка»).

За период эксплуатации с июня 2016 года по настоящее время, разработанная АСУ ДСК показала свою работоспособность. Главным подтверждением тому может служить новый контракт между ЗАО «Урал-Омега» и ООО «ОКС» на разработку и реализацию дробильно-сортировочной линии среднего дробления.

Однако, следует отметить, что некоторые технические сложности интеграции модулей сбора данных фирмы RealLab в АСУ на основе сложившейся аппаратной и алгоритмической базы ЗАО «Урал-Омега» привели к отказу от дальнейшего использования данных модулей в составе проектируемых систем, даже несмотря на успешную реализацию двух проектов.



а)



б)

**Рис.5. Расположение оборудования модульной АСУ ДСК:**

**а) шкаф управления выгрузкой на грохоте;**

**б) шкаф подключения силовых и оперативных цепей электрооборудования ленточного конвейера**

### **Заключение**

Таким образом, разработка модульной структуры АСУ ДСК позволила решить ряд важных задач и повысить эффективность работы системы управления. Разработанная структура оборудования АСУ обеспечила следующие преимущества:

- высокая скорость и простота монтажа электрооборудования и организации кабельных трасс;
- снижение затрат на кабельную продукцию, а также на элементы кабельных трасс;
- возможность организации монтажных работ без привлечения высококвалифицированного персонала (в случае комплектации соответствующими кабельными разъемами).

Кроме того, разработанные технические решения заложили основы для возможности создания математических моделей процесса и разработке, в перспективе, новых интеллектуальных алгоритмов управления.

Учитывая, что размеры компонентов мобильных ДСК во многом ограничены проблемами транспортировки, представляется, что основными перспективными

направлениями совершенствования АСУ являются вопросы дальнейшей унификации модульных компонентов ДСК, а также разработка новых систем контроля качества продукции, основанных, например, на системах компьютерного зрения, которые интенсивно развиваются в течение последнего десятилетия [16-19].

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Вопросы круглого стола по дробильно-сортировочному оборудованию [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.hammerrus.ru/articles/voprosykruglogostolapodrobilnosortirovochnomuoborudovaniyu>, свободный. – Заглавие с экрана.
2. Новые дробильно-сортировочные комплексы Sandvik UH320 и Sandvik UV320 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.integra.spb.ru/articles/article-novye-drobilno-sortirovochnye-kompleksy-sandvik-uh320-2009-02-24.html>, свободный. – Заглавие с экрана.

3. Обзор рынка дробильно-сортировочного оборудования (мобильного и стационарного) в России и на Украине. Режим доступа к демонстрационной версии: [www.infomine.ru](http://www.infomine.ru), свободный. – Заглавие с экрана.
4. Мобильные и стационарные дробильносортировочные комплексы – что выбрать? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://maxiexkavator.ru/articles/crusher/~id=1824>, свободный. – Заглавие с экрана.
5. Автоматизация дробильно-сортировочных, обогажительных фабрик [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ametex.ru/news/Avtomatizatsiya-drobnosortirovochnykh-obogatitelnykh-fabrik/>, свободный. – Заглавие с экрана.
6. Автоматизация дробильно-сортировочных установок и комплексов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.shela71.ru/product/sistemi-upravleniya-konveierami-avtomatizaciya-poto/avtomatizaciya-drobnosortirovochnih-ustanovoki/>, свободный. – Заглавие с экрана.
7. Чеботаева Е. М. Синергетический эффект модульной структуры автоматизированной системы управления дробильно-сортировочным производством / Е.М. Чеботаева, Е.Н. Фокина, С.В. Зинченко // Межотраслевой институт «Наука и образование». Ежемесячный научный журнал. 2014. № 5. С. 66-69.
8. Гаврилова Н.Г. Актуальность применения модульной структуры САУ дробильно-сортировочным производством / Н.Г. Гаврилова // Сборник трудов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов НИУ МГСУ за 2014-2015 учебный год. Москва: НИУ МГСУ, 2015. С. 259-263.
9. Васильев Ю.Э. Принципы формирования структуры автоматизированной системы управления строительным производством / Ю.Э. Васильев, А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, В.И. Марсов, Динь Ан Нинь // Промышленное и гражданское строительство. М.: Изд-во ПГС, №6 / 2014. – 13-16 с.
10. Гимадетдинов М.К. Определение перечня и последовательности решения задач автоматизированного дробильно-сортировочного производства / М.К. Гимадетдинов, А.В. Остроух // Автоматизация и управление в технических системах. 2014. – №4. – С. 55-61.
11. Автоматизация ДСЗ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kitsite.ru/services/Automat/%3Fprint%3Dtrue>, свободный. – Заглавие с экрана.
12. Система управления дробильно-сортировочным комплексом [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pwda.ru/solutions/crushing>, свободный. – Заглавие с экрана.
13. ООО «Комплексные системы и компоненты автоматизации - Винница» [Электронный ресурс]: страница содержит сведения обо всех видах оборудования, поставляемого данной компанией. Режим доступа: <http://www.kska.com.ua/>, свободный. – Заглавие с экрана.
14. ЗАО «Регион-Автоматика» [Электронный ресурс]: страница содержит сведения обо всех видах оборудования, поставляемого данной компанией. Режим доступа: <http://www.ra-nn.ru/>, свободный. – Заглавие с экрана.
15. ЗАО «Урал-Омега» [Электронный ресурс]: страница содержит сведения обо всех видах оборудования, поставляемого данной компанией. – Электрон. дан. – М., [2016]. – Режим доступа: <http://www.uralomega.ru/>, свободный. – Заглавие с экрана.
16. Изучение возможных подходов к управлению дробилками центробежного типа производства ЗАО «УРАЛ-ОМЕГА» с учетом качества получаемого продукта / Р.Э. Бурнашев, М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1. С. 122-128.
17. Бурнашев Р.Э., Рябчиков М.Ю. Алгоритмическое обеспечение системы контроля и управления лещадностью продуктов дробления // Автоматизированные технологии и производства. 2015. №1(7). С. 4-8.
18. Екимов Д.А. Информативные признаки изображений хаотично расположенных однотипных упорядоченных структур различного фракционного состава // Фундаментальные исследования. 2016. №9-2. С. 258-262.
19. Рябчиков, М.Ю. Исследование влияния угла освещения на качество определения контуров зерен щебня, расположенных в несколько слоев / М.Ю. Рябчиков, Р.Э. Бурнашев, Е.С. Рябчикова, Н.В. Богданов, А.И. Сунаргулова // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 3 (9). С. 18-20.

# ACTUAL GUIDELINES OF CRUSHING AND SCREENING COMPLEX AUTOMATED CONTROL SYSTEM DEVELOPING

M.Yu. Ryabchikov<sup>1</sup>, R.Je Burnashev<sup>2</sup>, E.S. Ryabchikova<sup>3</sup>, A.P. Berestov<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** In this paper describes guidelines of crushing and screening complexes automated control system developing. Examples of researches in this area had been provide, also experience of crushing and screening complex automated control system developing in CJSC “Ural-Omega” had been describe.

**Keywords:** automated control system; crushing and screening complex; centrifugal crushers; modular structure; technical solution.

## REFERENCES

1. Questions Roundtable on crushing and screening equipment [Voprosy kruglogo stola po drobilno-sortirovochnomu oborudovaniyu]. Available at: [http://www.hammerrus.ru/articles/voprosy\\_kruglogostola\\_po\\_drobnosortirovochnomu\\_oborudovaniyu](http://www.hammerrus.ru/articles/voprosy_kruglogostola_po_drobnosortirovochnomu_oborudovaniyu)
2. The new crushing and screening equipment Sandvik UH320 and Sandvik UV320 [Novye drobilno-sortirovochnye komplekсы Sandvik UH320 i Sandvik UV320]. Available at: <http://www.integra.spb.ru/articles/article-novye-drobnosortirovochnye-komplekсы-sandvik-uh320-2009-02-24.html>
3. Market Overview of crushing and screening equipment (mobile and landline) in Russia and Ukraine [Obzornyya drobilno-sortirovochnogo oborudovaniya (mobilnogo i statsionarnogo) v Rossii i na Ukraine]. Available at: [www.infomine.ru](http://www.infomine.ru)
4. Mobile and stationary crushing and screening equipment – what to choose? [Mobilnye i statsionarnyye drobilnosortirovochnyye komplekсы – chto vybrat?]. Available at: <http://maxiexkavator.ru/articles/crusher/~id=1824>
5. Automation of crushing and screening, coal preparation plants [Avtomatizatsiya drobilno-sortirovochnyykh, obogatitelnykh fabrik]. Available at: <http://ametex.ru/news/Avtomatizatsiya-drobnosortirovochnyykh-obogatitelnykh-fabrik/>
6. Automation of crushing and screening plants and complexes [Avtomatizatsiya drobilno-sortirovochnyykh ustanovok i kompleksov]. Available at: <http://www.shela71.ru/product/sistemi-upravleniya-konveierami-avtomatizatsiya-poto/avtomatizatsiya-drobnosortirovochnyykh-ustanovki/>
7. Chebotaeva Ye.M., Fokina Ye.N., Zinchenko S.V. The synergistic effect of the modular structure of the automated sorting, crushing and production management systems [Sinergeticheskiy effekt modulnoy struktury avtomatizirovannoy sistemy upravleniya drobilno-sortirovochnym proizvodstvom]. Mezhotraslevoyy institut «Nauka i obrazovanie» [Interdisciplinary Institute «Science and Education»]. 2014, no. 5, pp. 66–69.
8. Gavrilova N.G. The urgency of the application of the modular structure of the ACS crushing and screening production. Proceedings of the scientific conference on the results of research works of students of the Higher MSUCE for 2014-2015 academic year [Aktualnost primeneniya modulnoy struktury SAU drobilno-sortirovochnym proizvodstvom. Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov NIU MGSU za 2014–2015 uchebnyy god]. M.: NIU MGSU [Moscow: Publishing House of the MSUCE]. 2015, pp. 259–263.
9. Vasiliev Yu. E. Principles of Structure Formation of Automatic Control System of Construction [Printsipy formirovaniya struktury avtomatizirovannoy sistemy upravleniya stroitel'nykh proizvodstvom] / Vasiliev Yu. E., Ilyukhin A. V., Kolbasin A. M., Marsov V. I., Din An Nin // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering], 2014, no. 6, pp. 13–16.
10. Gimadetdinov M.K., Ostroukh A.V. Definition list and sequence solving automated crushing and screening production [Opredelenie perechnyykh i posledovatelnosti resheniya zadach avtomatizirovannogo drobilno-sortirovochnogo proizvodstva]. Avtomatizatsiya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh [Automation and Control in Technical Systems]. 2014, no. 4, pp. 55–61.
11. DSS Automation [Avtomatizatsiya DSZ]. Available at: <http://www.kitsite.ru/services/Automat/%3Fprint%3Dtrue>
12. Crushing and screening plant control system [Sistema upravleniya drobilno-sortirovochnym kompleksom]. Available at: <http://pwda.ru/solutions/crushing>
13. LLC «Complex systems and automation components – Vinnitsa» [OOO «Kompleksnyye sistemy i komponenty avtomatiki – Vinnitsa»]. Available at: <http://www.kska.com.ua/>
14. JSC «Region-Automatic» [ZAO «Region-Avtomatika»]. Available at: <http://www.ra-nn.ru/>
15. CJSC «Ural-Omega» [ZAO «Ural-Omega»]. Available at: <http://www.uralomega.ru/>
16. Burnashev R.E., Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova Ye.S. The study of possible approaches to the management of the centrifugal type crushers manufactured by JSC «Ural-Omega» with regard to the quality of the product [Izuchenie vozmozhnykh podkhodov k upravleniyu drobilkami tsentrobezhnogo tipa proizvodstva ZAO «URAL-OMEGA» s uchetom kachestva poluchaemogo produkta]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov]. 2015, no. 1, pp. 122–128.
17. Burnashev R.E., Ryabchikov M.Yu. Algorithmic support monitoring and control system of cleavage products [Algoritmicheskoe obespechenie sistemy kontrolya i upravleniya leshchadnostyu produktov

- 
- drobleniya]. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technology and production]. 2015, no. 1(7), pp. 4–8.
18. Yekimov D.A. Informative signs images randoml distributed the same type of ordered structures of different fractional composition [Informativnye priznaki izobrazheniy khaotichno raspolozhennykh odnotipnykh uporyadochennykh struktur razlichnogo fraktsionnogo sostava]. Fundamentalnye issledovaniya [fundamental research]. 2016, no. 9-2, pp. 258–262.
19. Ryabchikov M.Yu., Burnashev R.E., Ryabchikova Ye.S., Bogdanov N.V., Sunargulova A.I. Investigation of the effect of the angle of illumination on the quality of the definition of contours of grains of gravel arranged in several layers [Issledovanie vliyaniya ugla osveshcheniya na kachestvo opredeleniya konturov zeren shchebnya, raspolozhennykh v neskolko sloev]. Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva [Automated technology and productio]. 2015, no. 3 (9), pp. 18–20.

## ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

А.И. Божков

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,  
г. Липецк, Россия

mailbox@stu.lipetsk.ru

**Аннотация.** Рассмотрены и проанализированы вопросы влияния и роли человека как субъекта на эффективность функционирования системы управления качеством на промышленном предприятии. В качестве примера выбран металлургический комбинат с полным замкнутым циклом производства разнообразных видов продукции. Очередной раз подтверждена целесообразность максимально возможной автоматизации процедур обработки и анализа данных измерений, формализации описания процессов контроля, управления, принятия и исполнения решений в системе качества. Представлена оригинальная методика поиска и выбора оптимальных вариантов производственных и технологических процессов из множества альтернативных в функции вектора локальных критериев. С помощью методики можно существенно снизить роль субъекта в процессах принятия и исполнения решений по выбору наилучших управляющих воздействий в системах качества предприятия. В настоящее время элементы системы управления качеством реализованы и успешно работают в прокатных цехах металлургического комбината.

**Ключевые слова:** качество управления, субъект управления, объект управления, система качества, математическое моделирование, методы принятия решений, оптимизация управления.

### Введение

Интерес к роли человека при решении задач управления проявился в значительной мере в конце 60-х годов прошлого столетия в связи с развитием и широким использованием человеко-машинных систем во всех сферах деятельности человека [1]. Роль человека в системах управления качеством является на наш взгляд главным фактором, определяющим их эффективность. Цитирование японского доктора Каору Исикава можно сказать, что «качество дают не оборудование, механическое оснащение, системы и пр., а люди». Если речь идет об управлении качеством или в целом об управлении, то здесь велика роль человеческих и социальных факторов [2]. Это подтверждает вся история эволюции методов и систем управления качеством, основные этапы которой представлены ниже.

### 1. Эволюция управления качеством

Зарождение современного управления качеством можно отнести к началу 20-х годов 20 века, когда доктор У.А. Шухарт разработал и предложил использовать в промышленности контрольные карты, на которых в виде диаграмм разброса представлены диапазоны изменения технологических факторов и выходных параметров качества [3]. Термин «управление» подразумевал контроль за технологическим процессом, выявление и отбраковку дефектной продукции. Для этого на предприятиях создавались специализированные группы качества, в которые включали наиболее квалифицированных работников. Мотивация их деятельности сводилась, как правило, к экономическому стимулу – повышению уровня заработной платы, дополнительным премиальным выплатам за улучшение качества выпускаемой продукции.

Ко второму этапу развития управления качеством можно отнести период начала 30 гг. по 50 гг. прошлого столетия (за исключением времени второй мировой

войны) [2-4], когда в промышленности нашли широкое применение статистические методы управления, объединяющие методы математико-статистического анализа результатов контроля выходных параметров и выявления причин их отклонения от задания. Центральным объектом управления становится производственный процесс, выход которого представляет поток измерений показателей качества отдельных единиц продукции. В этот период во многих отраслях промышленности в различных странах использовался метод Тэйлора, который требовал от рабочих строгого выполнения инструкций, разработанных специалистами. Управление качеством базировалось на контроле, но при этом не вся продукция подвергалась достаточной проверке [2].

На практике использование статистических методов выявило ряд проблем, связанных с неоднозначным отношением к ним различных категорий персонала. Квалифицированные рабочие считали эти методы бесполезными из-за их сложности и в результате отрицательно относились к управлению качеством. Отсутствие необходимой информации вызывало трудности у инженеров при анализе процессов и принятии решений при управлении.

Однако при всем своем неприятии статистических методов управление качеством оставалось движением среди инженеров и рабочих. Руководители высшего и среднего звена на предприятиях не проявляли к нему должного интереса, считая, что мероприятия по внедрению управления качеством потребуют больших дополнительных капиталовложений. Решению возникших проблем в этой области помогли разработки ученых Э. Деминга, К. Исикавы, М.Джурана и др. Их работы по улучшению деятельности персонала в управлении качеством на предприятиях послужили основой для создания так называемой «Системы тотального контроля качества» (ТКК) Этот период (60-е – 80-е гг.) можно отнести к третьему этапу развития методов управления качеством.

Наметился переход от решений чисто технических вопросов рабочими и инженерами в рамках предприятий к участию в этой деятельности всего руководящего состава. В этот же период произошел качественный скачок в развитии управления качеством, связанный с предложенным А.В. Фейгенбаумом понятием «Комплексное управление качеством».

Такое управление предполагает участие всех подразделений в разработке параметров качества, поддержании достигнутого уровня и повышения качества для обеспечения производства и эксплуатации изделий на самом экономичном уровне при полном удовлетворении требований потребителя [2,3].

Впервые стали применяться на практике, разработанные К. Исикавой японские методы управления качеством, когда на первое место поставлен человеческий фактор. Борьба за качество стало делом не только специалистов и консультантов в этой области, а всех и каждого работника предприятия. Однако при этом возникает проблема – как бы дело нужное всем не стало ненужным никому. Наряду с экономическим стимулированием работников руководство предприятий использует психологический аспект для повышения заинтересованности в результатах их труда. Проводятся семинары и симпозиумы по управлению качеством, осуществляется подготовка кадров и обучение методам управления, на предприятиях создаются кружки качества и пр. [2].

Четвертый этап (80гг. – 2000гг.) К этому периоду развития управления качеством можно отнести разработку системных методов и методологии управления на основе стандартизации процессов и сертификации продукции. Наиболее наглядный пример – повсеместное использование международных стандартов ISO, которые приняты в качестве национальных стандартов более чем в 90 странах, в том числе и в России [4 - 6].

Производственные процессы и параметры качества регламентированы и введены в определенные рамки. На предприятиях совершенствуется строгая дисциплина производства и введены общие требования к качеству для производителей и потребителей.

Каждый работник обязан четко соблюдать установленные нормы и следовать требованиям стандартов. Однако, как показал опыт, стандарты и регламенты не всегда совершенны. Даже если им строго следовать, не вся продукция будет отвечать требованиям потребителя. Компенсировать несовершенство стандартов можно с помощью опытных и квалифицированных работников [2].

Пятый этап (начало 21 века – по настоящее время) – переход к системам качества в широком смысле [4]. Под системой качества следует понимать совокупность организационных мер, методов, методик, процессов, ресурсов и пр., приводящих к производству продукции требуемого качества.

Усложнение статистических методов и становление системных методов управления вызвало необходимость их автоматизации и создания автоматизированных систем управления качеством (АСУК) [4,7 - 11]. Появилась возможность снижения влияния человеческого фактора на процесс за счет включения в системы качества дополнительных средств автоматизации деятельности субъекта управления. При создании и включении АСУК в существующие системы качества

промышленных предприятий возникают специфические задачи связанные с определением места и роли человека в иерархии системы, а также с разделением персонала: по уровню и приоритету принятия решений при выборе варианта управления; по координации различных исполнителей и контролю за правильностью исполнения заданий; по степени ответственности различных категорий исполнителей и конкретизации их действий при управлении качеством.

Учитывая при этом, что система, выполняя общепринятые функции управления качеством, одновременно попадает под понятие «автоматизированная система», целесообразно значительно расширить круг лиц, ответственных за эффективность ее работы и в различной мере участвующих в процессах управления.

С психологической точки зрения важно, чтобы специалисты, занятые в производственной сфере и в сфере управления качеством, не видели в АСУК альтернативу своей профессиональной деятельности, а видели инструмент, помогающий им в работе и существенно расширяющий возможности по контролю, управлению и совершенствованию технологических процессов производства продукции требуемого качества при минимальных затратах.

Особо в практическом использовании системы должны быть заинтересованы руководители различного уровня, так как повышается прозрачность и контролируемость производственных и технологических процессов, появляется возможность управления процессами формирования качества продукции в режиме реального времени (в такте, а не «во след» процессу).

При этом так же существенно расширяются возможности всех лиц принимающих решение (ЛПР), среднего и нижнего уровней, в особенности, производственного персонала за счет автоматизации и, как следствие, упрощения процедур выбора режимов обработки металла на агрегатах, обусловленного введением элементов так называемой «гибкой технологии» производства продукции. В отличие от существующих моделей управления, когда все технологические операции на каждом агрегате жестко регламентируются и не зависят от режимов обработки на предыдущих, «гибкость» предполагает возможность изменения технологических факторов на текущем агрегате в зависимости от результатов предыдущей обработки и прогнозируемого качества продукции.

Другими словами, любое изменение технологического фактора (режима обработки) на предыдущем агрегате, которое может оказать влияние и вызвать отклонение характеристик качества от задания, следует компенсировать соответствующими корректирующими воздействиями и изменением режима на последующих агрегатах. Это изменение должно оказать влияние на качество той же величины, но обратного знака, тем самым обеспечить производство продукции требуемого уровня качества [5]. При этом жестко нормируются все издержки и затраты на производство различных видов продукции в соответствии с принятыми регламентами. Тем самым, в управление качеством включаются специалисты в области экономики.

В рамках АСУК технико-экономические показатели, в том числе, наиболее важные статьи расходов калькуляции могут быть приняты в качестве дополнительных критериев при выборе оптимальных вариантов технологии производства каждого вида продукции цеха.

Управление качеством на современном этапе требует соответствующего информационного обеспечения и привлечения к управлению специалистов этого профиля. Развитие информационных технологий способствует установлению взаимосвязей между процессами управления и основной производственной деятельностью предприятия, повышению оперативности, точности и экономичности обработки и анализа данных. Это позволяет всем службам своевременно получать информацию, необходимую для принятия и использования решений по управлению производственным процессом на предприятии.

Подводя итог сказанному, можно утверждать, что на современном этапе развития управление качеством охватывает всю сферу деятельности любого промышленного предприятия, все основные и вспомогательные производства. Управлением качеством должны заниматься не только специально подготовленные работники, а в это движение должен включиться весь руководящий состав и производственный персонал предприятия. Только в этом случае можно решить все задачи, связанные с практической реализацией системы качества, и достичь поставленной цели – выпуска востребованной на рынке продукции высокого качества на самом экономичном уровне.

## **2. Принципы автоматизации управления на различных уровнях системы качества**

При проектировании и создании сложных систем к каким, безусловно можно отнести комплексную автоматизированную систему управления качеством промышленного предприятия, следует пройти основные этапы, представленные в предыдущем разделе, и разработать все виды обеспечения, необходимые и достаточные для промышленного внедрения и эффективного функционирования системы. В качестве примера рассмотрен металлургический комбинат с полным замкнутым циклом производства разнообразных видов продукции.

По аналогии с работой [4, рис. 5.15], иерархию функциональной структуры КАСУК можно представить в виде трех отдельных взаимосвязанных уровней: общекорпоративного – стратегического; отдельных структурных подразделений (производств, цехов, управлений и пр.) – тактического и агрегатного – оперативного (см. рис.1.)

На рис. 1 приняты следующие обозначения: КАСУК – комплексная автоматизированная система управления качеством; АСУСП – автоматизированная система управления сбытом продукции; АСУПСМ – автоматизированная система управления поставками сырья и материалов; ПУСМ – подсистема управления свойствами металла; ПУГП – подсистема управления геометрическими показателями; ПАТЭП – подсистема анализа технико-экономических показателей; ЛСАУ(Р) – локальные системы автоматизированного управления

(регулируемая).

На каждом уровне решаются специфические функциональные задачи с помощью АСУ определенных типов.

На стратегическом уровне должны решаться задачи общего и всеобщего руководства качеством (задачи планирования), которые включают все стороны «жизненного» цикла продукции.

Для их решения используются современные информационные технологии, обеспечивающие прохождение электронных версий различных видов текстовой документации через все подразделения комбината, участвующие в деятельности по управлению качеством.

Задачи стратегического уровня целесообразно решать после формирования массивов данных, охватывающих полный цикл от производства до выпуска и реализации каждого вида продукции.

Роль человека при решении стратегических задач можно считать ключевой. Высшее руководство комбината вырабатывает и (или) корректирует долгосрочные программы и планы, т.е. стратегию (политику) развития комбината.

Изменение долгосрочных планов может быть связано и вызвано изменениями номенклатуры выпускаемой продукции, технического оснащения и материальной базы. По заданию высшего руководства специалисты профильных подразделений анализируют тенденции развития родственных металлургических предприятий и предприятий – потребителей, возможные тренды изменения потребностей рынков металла и изделий из него. Результаты анализа могут служить гарантией правильного прогнозирования необходимых изменений, вносимых в долгосрочные и среднесрочные планы развития комбината.

Решения на стратегическом уровне принимаются обычно на основе определенной информации (профили и портфели заказов, состояния запасов сырья, результаты исследования рынков и т.п.) по основным критериям: конкурентоспособность продукции

(качество + цена); состояние рынков сбыта (спрос на объемы и вид продукции); потребности потенциальных и постоянных потребителей. Эта информация должна накапливаться и храниться в центральной базе данных (ЦБД), которая через глобальную информационно-вычислительную сеть комбината, охватывающую все основные и вспомогательные производства может обмениваться данными с базами технологической, производственной и др. информации [4, 8 - 9].

Реализация разработанных высшим руководством на стратегическом уровне долгосрочных перспективных планов неразрывно связана с тактическим уровнем, на котором реализуются среднесрочные производственные планы и решаются функциональные задачи (задачи проектирования), основные из которых приведены ниже: сбор и анализ данных о технологии, состоянии оборудования, уровне качества выпускаемой продукции и технико-экономических показателях работы цеха за конкретные промежутки времени; прогнозирование уровня качества и обеспечивающих его диапазонов изменения технологии производства; прогнозирование технико-экономических показателей работы цеха; принятие решений по выбору диапазонов изменения

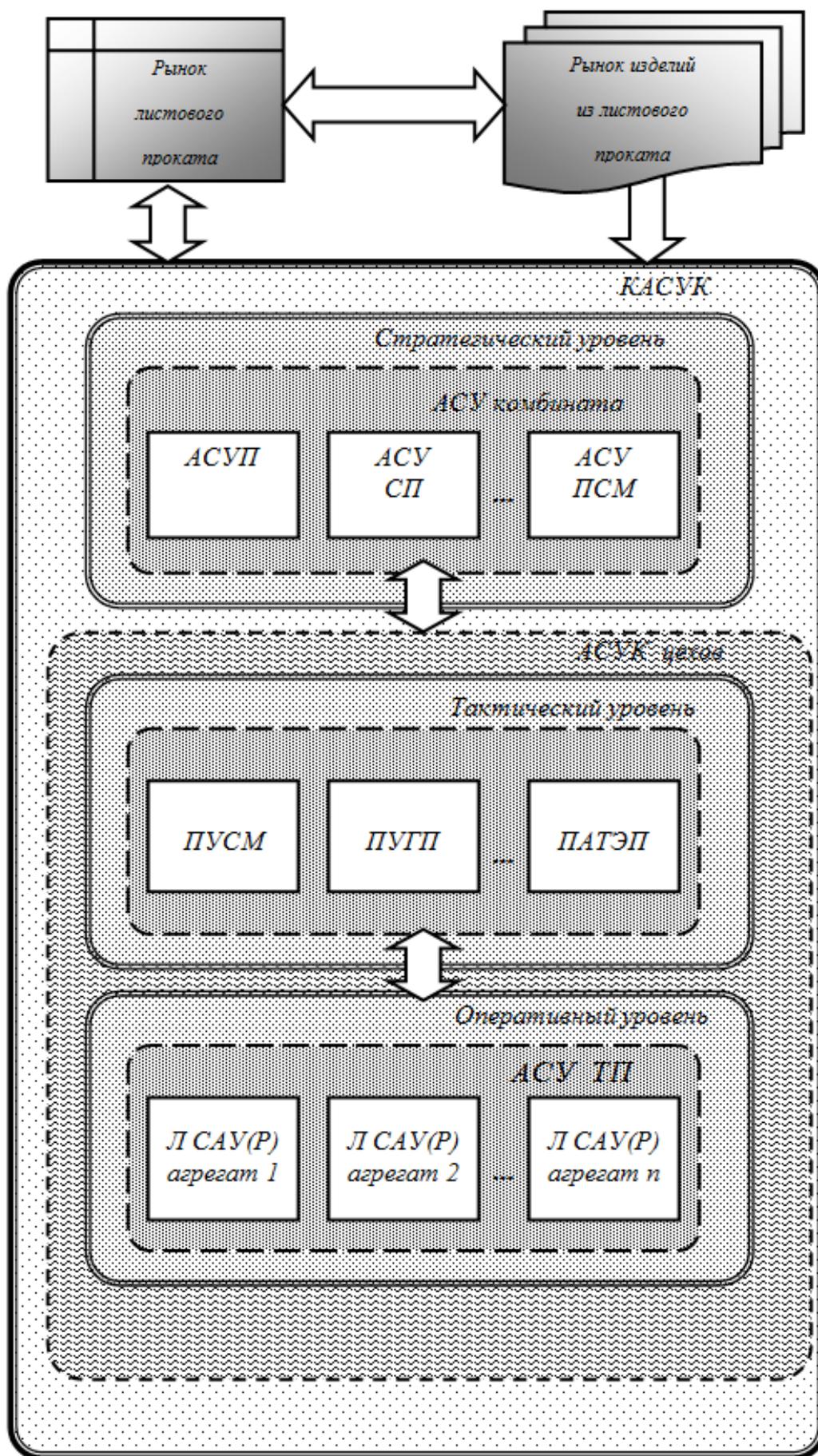


Рис. 1. Схема функциональной структуры комплексной автоматизированной системы управления качеством металлургического комбината

технологии и по оптимальному использованию оборудования для производства различных видов продукции заданного уровня качества при заданных технико-экономических показателях (минимизация себестоимости).

Решения, принимаемые на общецеховом (тактическом) уровне, реализуются на агрегатном (оперативном) уровне с помощью локальных систем автоматизированного и автоматического управления (регулирования). На этом уровне решаются краткосрочные функциональные задачи (задачи управления): сбор и анализ данных о технологии обработки металла на агрегатах цеха, состоянии оборудования агрегатов, качестве заготовки, полупродукта и продукции, технико-экономических показателях работы отдельных агрегатов (статьи затрат калькуляции и пр.); прогнозирование качества полупродукта, продукции и затрат на их производство при заданных в соответствии с регламентом технологических режимах обработки; прогнозирование режимов обработки на отдельных агрегатах в функции заданных качества полупродукта (продукции) и технико-экономических показателей: принятие решений о выборе наилучших управляющих воздействий на агрегатах по критериям заданного уровня качества продукции и минимума затрат на его производство.<sup>1</sup>

Другими словами руководители среднего звена (тактический уровень системы) принимают решения, позволяющие реализовать стратегию развития комбината за счет четкой организации и эффективного управления производственными, технологическими и пр. процессами в своих структурных подразделениях (управлениях, производствах, цехах и пр.) Производственный персонал выполняет принятые решения с помощью соблюдения регламентов на ведение технологических процессов, обслуживание оборудования агрегатов, систем автоматизации, состояние технического оснащения, качество основных и вспомогательных материалов и т.п., а так же следит за соответствием качества полупродукта и выпускаемой продукции требованиям стандартов.

Понятно, что одной из основных целей автоматизации управления качеством продукции наряду с известными и часто обсуждаемыми во многих литературных источниках (см. например, [4,7-11] и др.)<sup>2</sup> является снижение влияния человеческого (субъективного) фактора на объективность и правильность принимаемых решений на всех уровнях системы качества.

В данном случае речь идет о целесообразности максимально возможной формализации и математического описания процессов и объектов в рамках АСУК.

Для того, чтобы автоматизировать функции человека на каждом иерархическом уровне системы, необходимо формализовать перечисленные выше функциональные задачи решить их, а затем в форме математических моделей и алгоритмов управления включить в математическое обеспечение АСУК.

Такой подход может обеспечить лиц принимаю-

щих решение (ЛПР) на каждом уровне системы необходимой и достаточной информацией для выбора наилучших вариантов решения из множества альтернативных.

Один из упрощенных вариантов алгоритма вычислений [4], представленный ниже, обеспечит ЛПР первоначальной информацией для правильного принятия решений.

### 2.1 Стратегический уровень (рынок изделий из проката)

1. За заданные промежутки времени  $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N$  вычисляются  $\Pi_{u.n.}^{(\kappa)}$  – показатели эффективности реализации различных изделий из листового проката:

$$\Pi_{u.n.}^{(\kappa)} = \frac{W_{u.n.(i)}^{(\kappa)}}{\bar{W}_{u.n.}^{(\kappa)}} \cdot \frac{\Pi_{u.n.(i)}^{(\kappa)}}{\bar{\Pi}_{u.n.}^{(\kappa)}}, \quad (2.1)$$

где  $\kappa=1, 2, \dots, K$  – вид изделия (автомобили, холодильники, трансформаторы и т.д.);  $W_{u.n.(i)}^{(\kappa)}$  – объем продаж  $\kappa$ -го изделия из  $i$ -го вида (типоразмера) листового проката,  $i=1, 2, \dots, I$ ;  $\bar{W}_{u.n.}^{(\kappa)}$  – среднее значение объемов продаж  $\kappa$ -го

изделия:  $\bar{W}_{u.n.}^{(\kappa)} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I W_{u.n.(i)}^{(\kappa)}$ ;  $\Pi_{u.n.(i)}^{(\kappa)}$  – цена  $\kappa$ -го изделия из  $i$ -го вида;  $\bar{\Pi}_{u.n.}^{(\kappa)}$  – средняя цена  $\kappa$ -го изделия:

$$\bar{\Pi}_{u.n.}^{(\kappa)} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \Pi_{u.n.(i)}^{(\kappa)}. \quad (2.2)$$

2. Для каждого промежутка времени  $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N$  выбираются максимальные значения  $\Pi_{u.n.}^{(\kappa)}$  и определяются наиболее эффективные виды листовой продукции металлургического комбината, пользующиеся наибольшим спросом на рынке проката.

### 2.2 Стратегический уровень (рынок листового проката)

3. За заданные промежутки времени  $t_1, t_2, \dots, t_n, t_N$  предшествующие промежуткам для определенных в п.2 видов проката, вычисляются показатели эффективности производства прокатного цеха того или иного уровня качества:

$$\Pi_{\Pi(j)}^{(i)} = \frac{W_{n(j)}^{(i)}}{\bar{W}_n^{(i)}} \cdot \frac{\Pi_{n(j)}^{(i)}}{\bar{\Pi}_n^{(i)}}, \quad (2.3)$$

где  $W_{n(j)}^{(i)}$  – объем продаж  $i$ -го вида проката  $j$ -го уровня качества;  $\bar{W}_n^{(i)}$  – среднее значение объемов продаж  $i$ -го вида проката;  $\Pi_{n(j)}^{(i)}$  – рыночная цена  $i$ -го вида листового проката  $j$ -го уровня (группы) качества;  $\bar{\Pi}_n^{(i)}$  – средняя рыночная цена  $i$ -го вида проката.

<sup>1</sup> Более полный перечень функциональных задач всех уровней АСУК приведен в работе [10, 30-31 с.].

<sup>2</sup> Любая АС создается для повышения эффективности производства (снижения себестоимости и улучшения качества продукции), повышение производительности и облегчения условий деятельности работников.

4. Далее реализуется долгосрочный прогноз объемов производства наиболее выгодной для комбината номенклатуры продукции. Прогноз может осуществляться на заданный предстоящий временной промежуток (квартал, полугодие, год, пятилетка и т.д.). Для этого представлена формула расчета вероятности получения наибольшей прибыли от реализации определенных (см. п.2) типоразмеров определенных (см. п.3) групп качества:

$$P_m \left[ \Pi_{\Pi(j)}^{(i)}(\hat{t}_N + \Delta t) \right] = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta \Pi_{\Pi(j)}^{(i)}(t_{n+1} - t_n)}{N} \quad (2.4)$$

где  $\Delta \Pi_{\Pi(j)}^{(i)}(t_{n+1} - t_n) = \Pi_{\Pi(j)}^{(i)}(t_{n+1}) - \Pi_{\Pi(j)}^{(i)}(t_n)$ ;

$m=1, 2, \dots, M=I \times J$ .

Максимальные величины вероятностей ( $\max P_m$ ) позволяют выбирать наиболее прибыльные виды продукции цеха оптимальных с технико-экономической точки зрения групп качества.

5. На основе анализа результатов исследований и расчетов по п.1-4 разрабатываются новые перспективные виды продукции листопрокатных цехов в функции наилучших показателей качества и технико-экономических показателей (максимальная цена реализации за счет высокого уровня качества при минимальной себестоимости за счет оптимизации производственного и технологических процессов).
6. Для практической реализации результатов по п.5 разрабатываются перспективные планы, а на их основе конкретные технические задания по реконструкции, модернизации и замене оборудования, технических средств и средств автоматизации.

### 2.3 *Тактический уровень*

7. В АСУК цехов определяются оптимальные диапазоны изменения технологических режимов обработки металла на основных агрегатах, обеспечивающие максимальную вероятность производства любого заданного вида продукции с заданными показателями качества при условии наилучших технико-экономических показателей работы агрегатов и цеха в целом:

$$\Delta X_i^{(l)} = F(Y^{(zad)}_{m(i)}, C^{min}_i), \quad (2.5)$$

где  $\Delta X_i$  – вектор диапазонов изменения технологических факторов на  $l$ -м агрегате при производстве  $i$ -го вида продукции;  $Y^{(zad)}_{m(i)}$  – вектор заданных  $m$  показателей качества проката  $i$ -го вида продукции;  $C^{min}_i$  – минимальное значение себестоимости  $i$ -го вида проката. Результаты передаются в группы качества для анализа и корректировки.

### 2.4 *Оперативный уровень*

8. На основе результатов п.7 вырабатываются диапазоны управляющих воздействий для каждого агрегата и каждого показателя качества для  $i$ -го вида продукции с учетом выбранных диапазонов изменения технологических факторов  $\square X^{(l)}$  и возможных случайных возмущений  $E^{(m)}$  на агрегате  $l$ :

$$\Delta U_m^{(l)} = P(\Delta X_i^{(l)}, \Delta Y^{(zad)}_{m(i)}, E^{(m)}), \quad (2.6)$$

где  $\Delta U_m^{(l)}$  – диапазон управляющих воздействий на агрегате  $l$  при обработке  $i$ -го вида продукции и получения заданного значения показателя качества  $\Delta Y^{(zad)}_{m(i)}$ .

Результаты передаются технологам на агрегаты и в службы АСУ ТП для анализа и корректировки. После проверки результатов в локальные системы вводятся соответствующие поправочные коэффициенты и корректируются задаваемые параметры.

В ходе процессов постоянно производится адаптация регулировочных значений на основе информации, циркулирующей в АСУК цеха между различными уровнями управления. При изменениях, произошедших в любом из перечисленных пунктов, осуществляется корректировка результатов вычислений и после соответствующего анализа выдаются новые результаты. При стабильных процессах анализ, корректировка, пересчет и т.д. производятся в АСУК периодически в задаваемых промежутках времени.

Таким образом, можно обеспечить решение перечисленных выше функциональных задач и осуществить взаимодействие АСУК различного иерархического уровня, что, в свою очередь, может с достаточной точностью и надежностью способствовать повышению эффективности управления качеством продукции металлургического комбината.

## 3. Математическое обеспечение КАСУК МК

Все задачи по управлению качеством целесообразно разделить на четыре укрупненные группы: обработки и анализа данных; прогнозирования; принятия решений (выбора управлений) и исполнения решений (реализации управлений). Методы решения указанных задач и будут составлять основу математического обеспечения АСУК, функционирующих в основных структурных подразделениях комбината и включенных в состав комплексной системы.

### 3.1 *Обработка и анализ данных*

Для решения задач первой группы чаще всего используются классические методы и вычислительные процедуры математической статистики [4 (с. 73-82) и др.]. Мы не будем очередной раз описывать их, а приведем только общую схему сбора, обработки и анализа данных измерений, приведенную на рис. 2.

### 3.2 *Прогнозирование переменных*

Для решения задач второй группы – прогнозирования формирования выходных переменных (функций отклика)  $y_1, \dots, y_J$  (где  $J$  – число выходных переменных) под действием входных переменных  $x_1, \dots, x_I$  (где  $I$  – число входных переменных) используются математические модели исследуемых объектов и процессов в системе управления качеством. При этом входы рассматриваются как причины, а выходы как следствия.

При решении задач математического моделирования, к которым можно отнести задачи проектирования, математического описания технологических процессов, систем, объектов, выбора оптимальных величин, пара-



Рис. 2. Обобщенная схема сбора, обработки и анализа данных измерений

метров и т.д., используются различные методы. Условно их можно разделить на две группы: аналитические и эмпирические, в зависимости от того, с помощью каких закономерностей описываются процессы: однозначно определенных (детерминированных) или находящихся в условиях неопределенности.

При построении математических моделей, экономических, плановых, организационных и других процессов, которые можно отнести к детерминированным, лучше применять аналитические методы.

При построении математических моделей процессов, протекающих в АСУ и в системах автоматического управления (САУ) лучше опираться на комбинированные методы и использовать методы теории автоматического управления. При построении математических моделей технологических процессов, протекающих в условиях неопределенности, связанной с нелинейностью, нестационарностью, наличием случайных помех, ошибок измерений, износа оборудования, дрейфа во времени качества исходных заготовок, сырья и пр., целесообразно использовать эмпирические методы или разумно сочетать их (комбинировать) с аналитическими [4, с.21].

Традиционный подход к построению математических моделей формирования показателей качества продукции основан, как правило, на применении статистического описания, в частности, многомерного регрессионного анализа (МРА). С его помощью строят многомерные (многофакторные) зависимости показателей качества готовой продукции от технологических факторов и режимов обработки металла на различных переделах и агрегатах [4]. В любом случае при построении математической модели с помощью того или иного метода следует различать два аспекта: формальный и содержательный.

К формальному можно отнести выбранные методы структурного синтеза и идентификации параметров модели (методы построения), от которых в значительной мере зависят качество математической модели, ее адекватность реальному процессу. Не менее важным для построения адекватной модели является содержательный аспект, к которому можно отнести: выбор функций отклика и факторов, включаемых в качестве независимых переменных; правильный выбор соответствующих допущений и ограничений; выбор критериев оптимизации и пр.

Классический МРА, в основе которого лежит МНК, позволяет максимально просто и с достаточной долей достоверности найти по данным  $N$  опытов статистические оценки для неизвестных параметров  $a_i$  с оценкой их значимости по критерию Стьюдента. Метод также включает в себя обязательную оценку достоверности и адекватности выбранной модели по минимуму остаточной дисперсии и максимуму критерия Фишера.

На независимые (факторы модели) и зависимую (функция отклика) переменные накладываются определенные условия, отражающие особенности МРА и область возможных применений. Наиболее существенные из них приведены ниже.

1. Число наблюдений должно быть не менее, чем в 10 раз больше числа неизвестных факторов.
2. Диапазон изменения каждого независимого фактора должен быть максимальным.
3. График остатков для модели должен иметь гауссовское распределение (что подтвердит правильность выбора вида математической модели для описания закономерной составляющей случайного процесса).
4. Наблюдения по каждому фактору стохастически независимы.

### 3.3 Методы принятия решений по выбору управлений

Задачи управления качеством третьей группы (принятия решений) решаются с помощью хорошо проработанных методов оптимизации.

Математическое описание различных методов принятия решений в многокритериальных оптимизированных задачах исследования, прогнозирования, проектирования и управления сложными объектами и процессами приведено во многих отечественных и зарубежных публикациях (см., например, [4, 8-11 и др.]).

При большом разнообразии и разной степени сложности методы принятия решений, как правило, имеют похожую структуру построения и содержание логических процедур решения задач этого класса, которые позволяют использовать их на практике при управлении как сложными детерминированными процессами, так и процессами, протекающими в условиях различной степени неопределенности. К первым можно отнести планируемые производственные процессы, ко вторым – технологические процессы.

На первом этапе любого процесса принятия решений (ПР) по определенным правилам выделяется множество альтернативных вариантов и выбирается конечное их число. На втором этапе устанавливаются критерии выбора наилучшей альтернативы.

Эта информация в первую очередь включает желаемые количественные или качественные значения и вес (важность) каждого критерия, а также ограничения, накладываемые на них.

Задачи, третьей группы целесообразно разделить по уровням (см. рис. 1):

- тактический - задачи проектирования;
- оперативный - задачи управления.

При решении задач тактического уровня в отсутствие дефицита времени и жестких временных границ ЛПР может проанализировать новую информацию, сравнить ее с подобной информацией, полученной ранее, и принять правильное решение при выборе технологических режимов обработки металла на том или ином агрегате листопрокатного производства. Разумеется, ЛПР должно иметь достаточный объем опыта и знаний. В качестве него в данном случае может выступать какой-либо ответственный работник цеха: заместитель начальника по технологии; начальник группы (отдела) качества и т.п.

При решении задач оперативного уровня в режиме реального времени (время прохождения партии металла через агрегат), зачастую сопровождающегося острым дефицитом времени, в качестве ЛПР может выступать представитель руководства среднего или нижнего звена технологического персонала цеха.

Совместное решение задач обоих уровней обеспечивает не только максимальную формализацию и, как следствие, максимально возможную автоматизацию процедур принятия решений, но и существенное сужение круга ЛПР. При этом информация, на основе которой они будут принимать соответствующие решения, должна быть представлена в удобной для восприятия форме и удовлетворять ЛПР с точки зрения полноты, точности, надежности и достоверности.

В качестве одного из вариантов, реализующих на

практике описанные выше процедуры ПР, предложена комбинированная методика, включающая и сочетающая методы теории вероятностей, теории планирования эксперимента, математической статистики (в частности, многомерный регрессионный анализ) и классификации альтернатив. Элементы методики в различных модификациях представлены в работах [4, 8-10 и др.].

В статье мы попытались логически увязать различные вычислительные процедуры и элементы методики, придать ей достаточно простую форму, более доступную для восприятия и практической реализации.

#### 3.3.1 Описание методики

Любой процесс, в том числе, протекающий в условиях неопределенности, характеризуется вектором  $\bar{X}$  входных переменных (назовем их факторами) и оценивается вектором  $\bar{Y}$  выходных переменных (назовем их откликами). Совокупность наблюдений (измерений) факторов и откликов образуют массив данных  $M(\bar{X}, \bar{Y})$  объема  $N$ .

Каждый фактор изменяется в каких-то конечных зачастую, достаточно широких, диапазонах значений (интервалах):

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max} \quad (i = 1, \dots, I).$$

Методика предусматривает разбиение каждого диапазона на более узкие поддиапазоны (группы) значений. Число поддиапазонов и их величина может задаваться например, на основе анализа эмпирических распределений каждого фактора. Разбиение производится двумя способами:

- 1) границы поддиапазонов (участков) выбираются из условия их равномерного заполнения данными измерений;
- 2) диапазон изменения каждого фактора делится на заданное число участков равной длины.

Каждый поддиапазон (участок) кодируется числом  $k_i$  ( $k_i = 1, \dots, K$ ,  $i$  - число участков для  $i$ -го фактора), а комбинация (сочетание) участков по всем факторам – строкой  $\langle k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i \cdot \dots \cdot k_I \rangle$ .

В результате производится сжатие массива исходных данных до объема  $M$  ( $M < N$ ).

Рассмотрим простой пример. Пусть в анализ включены три фактора  $x_1, x_2, x_3$ . Объем выборки  $N = 100$ . Первый и второй факторы имеют количественные значения, третий – качественные (давление: низкое, среднее, высокое). Диапазон изменений численных значений первого фактора разбиваем на 3 поддиапазона (участка) ( $k_1 = 3$ ), диапазон  $x_2$  - на два ( $k_2 = 2$ ), исходя из первого способа разбиения.

В итоге получаем 18 ( $k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 3 \cdot 2 \cdot 3$ ) альтернативных варианта (сочетаний факторов), которые имеют различную степень повторяемости, оцениваемую абсолютной частотой  $n_m$  ( $m = 1, \dots, 18$ ) возникновения конкретной альтернативы. При этом:

$$\sum_{m=1}^{M=18} n_m = N = 100.$$

Результат реализации каждого альтернативного варианта оценивается определенным сочетанием выходных переменных (откликов) -  $y_j^{(m)}$  ( $j = 1, \dots, J$  - число откликов, например, показателей качества продукции).

Каждый отклик  $y_j$  также изменяется в диапазоне значений. Для упрощения решения произведем разбиение указанных диапазонов на  $L$  поддиапазонов (участков, групп), получая при этом совокупность значений:

$$y_j^{(l_j)} \quad (l_j = 1, \dots, L, j = 1, \dots, J).$$

Базовые значения каждой группы задаются (на практике могут выбираться из стандартов на соответствующий вид продукции).

Решение задачи сводится к правильному выбору такого альтернативного варианта, который дает максимальное совпадение фактических (измеренных) показателей качества  $y_j^{(m)}$  с желаемыми (заданными)  $y_j^*$ .

Разработано два способа решения задачи: первый позволяет определить степень близости  $y_j^{(m)}$  к  $y_j^*$  из условия совпадения максимального числа откликов, второй учитывает важность показателей, т.е. поиск и выбор производится в соответствии с установленным приоритетом каждого отклика.

Выбор наилучшей альтернативы основан на расчете, оценке и выборе наибольшего значения условной относительной частоты:

$$\text{для первого решения} - P_m^H = P_m \left[ n_m / \sum_{m=1}^{M^L} n_m \right], \quad (3.1)$$

$$\text{где } n_m = \sum_{j=1}^J C_{jm}, P_m = \sum_{j=1}^J P_{jm} (j/J), P_{jm} = \frac{C_{jm}}{n_m}, \sum_{m=1}^M n_m = N,$$

где  $C_{jm}$  – абсолютная частота реализаций  $m$ -го альтернативного варианта, при которых совпали фактические значения показателей качества  $y_j^{(m)}$  с заданными  $y_j^*$ ;

$P_{jm}$  – соответствующая относительная частота;  $j=1, \dots, J$  – число показателей качества;  $M^L$  – число лучших альтернатив (см. [11]);

для второго решения –

$$P_m^{(l_j)} = \left[ \frac{1}{j} \sum_{j=1}^J P_{j(m)}^{(l_j)} \right] \cdot \left[ n_m / \sum_{m=1}^{M^L} n_m \right], \quad (3.2)$$

где  $P_{j(m)}^{(l_j)} = v_{j(m)}^{(l_j)} / n_m$ ,  $v_{j(m)}^{(l_j)}$  – абсолютная частота реализаций  $m$ -го альтернативного варианта, при которых каждый фактический показатель  $y_{j(m)}^{(l_j)}$  совпал с каждой заданной группой  $y_j^{(l_j)}$ . Величины  $v_{j(m)}^{(l_j)}$  рассчитывают для того, чтобы определить какие именно показатели качества совпали с заданными (попали в заданную группу) и реализовать их по важности.

В результате решения получаем наилучший вариант сочетания поддиапазонов (участков) всех технологических факторов, включенных в анализ, с точки зрения получения заданных значений выходных переменных (показателей качества).

Для определения количественных значений факторов в выбранных поддиапазонах используются математические модели (Подробно эта операция рассмотрена ниже (см. алгоритм решения).

### 3.3.2 Алгоритм принятия решения по выбору управлений

Алгоритм решения (блок-схема алгоритма приведена в приложении 2 работы [4]):

Алгоритм представлен в текстовой форме. При разработке алгоритма предусмотрены все основные ситуации, которые могут возникнуть в процессе решения задачи поиска и выбора наилучшей производственной ситуации (варианта технологи) из множества альтернативных при заданных показателях качества продукции и технико-экономических показателей производства.

1. Задание групп металла (выбирается в зависимости от размеров полос, химического состава стали и марки назначения готовой продукции).

2. Выбор выходных переменных - показателей качества готовой продукции и значений статей расходов калькуляции (согласно норм, ГОСТ, ТУ потребителя и т.п. – в зависимости от производственного задания).

3. Разбиение на поддиапазоны диапазонов изменения каждого показателя качества готовой и значений статей расходов калькуляции продукции и задание приоритетного поддиапазона.

4. Задание технологического маршрута обработки.

5. Выбор входных переменных - производственных и технологических факторов обработки на каждом агрегате.

6. Разбиение на поддиапазоны диапазонов изменения каждой из выбранных входных переменных.

6.1. Задание количества поддиапазонов для каждой входной переменной.

6.2. Задание метода разбиения на поддиапазоны для выбранных переменных.

6.3. Задание конкретной входной переменной.

6.4. Расчет границ поддиапазонов переменной либо из условия их

равной длины, либо из условия их равномерного заполнения.

6.5. Запоминание значений границ поддиапазонов переменной.

6.6. Повторяем п. 6.3 для каждой из выбранных переменных.

7. Выбор наилучших поддиапазонов из диапазонов изменения каждой входной переменной.

7.1. Кодирование выделенных поддиапазонов каждой переменной.

7.2. Построение строки сочетаний поддиапазонов входной переменной (производственная ситуация) -  $\langle k_1 k_2 \dots k_i \dots k_1 \rangle$ .

7.3. Поиск одинаковых ситуаций и вычисление их абсолютной частоты  $n_m$ .

7.4. Выбор пути решения задачи многокритериальной оптимизации:

Из условия совпадения максимального числа выходной переменной

7.4.1. Вычисление  $C_{jm}, P_{jm}, P_m$ .

7.4.2. Вычисление порогового значения  $\psi$  (см. (4.8) [4]).

7.4.3. Нахождение числа лучших альтернатив  $M^L$ .

7.4.4. Вычисление условной относительной частоты  $P_m^H$ .

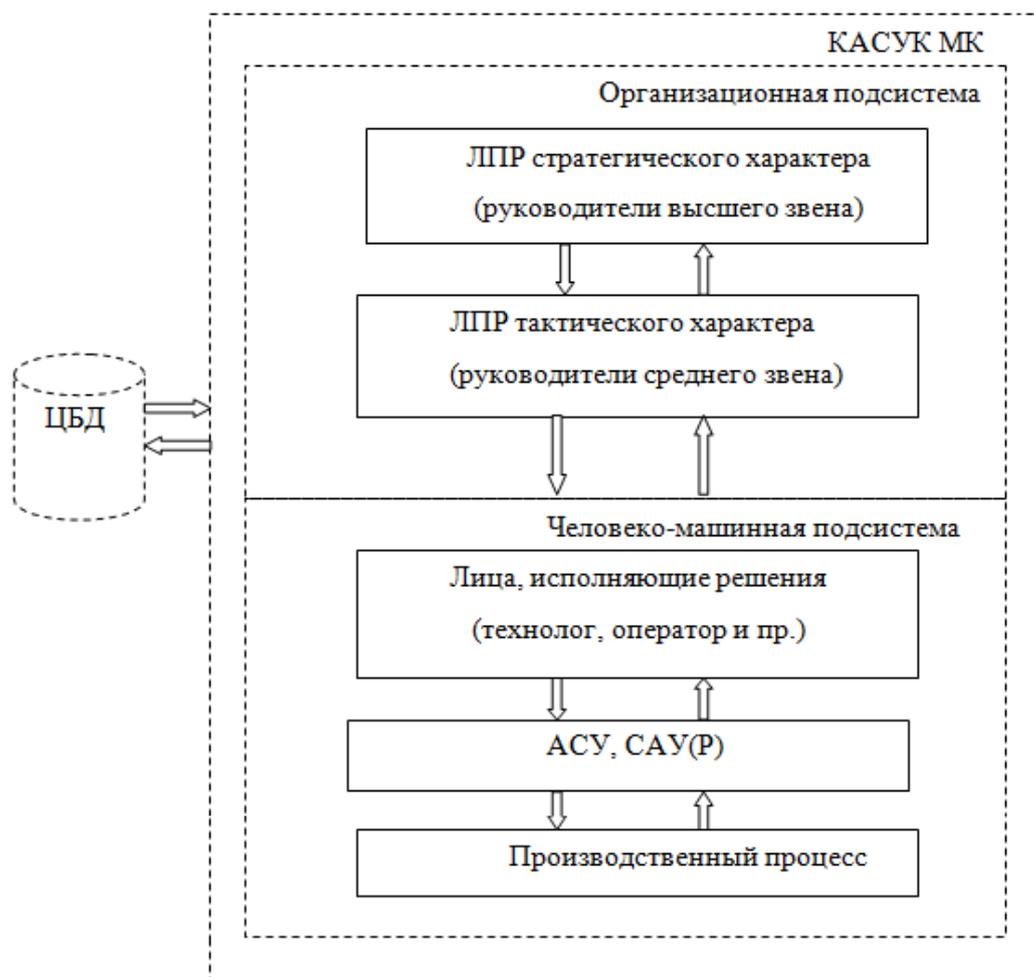


Рис. 3. Структура КАСУК МК с учетом места и роли субъекта в реализации управлений

7.4.5. Нахождение соответствующих наилучших поддиапазонов изменения входных переменных.

Из условия важности выходных переменных (показателей качества)

7.4.6. Вычисление  $V_{j(m)}^{(l_j)}$ ,  $P_{j(m)}^{(l_j)}$ .

7.4.7. Вычисление порогового значения  $\psi$ .

7.4.8. Нахождение числа лучших альтернатив  $M^l$ .

7.4.9. Вычисление относительной частоты  $P_m^{(l_j)}$ .

7.4.10. Нахождение соответствующих наилучших поддиапазонов изменения входных переменных (факторов).

8. Выбор количественных значений факторов из определенных в п. 7.4.5 или п. 7.4.10 поддиапазонов.

8.1. Средние значения поддиапазонов подставляются в математические модели и вычисляются количественные значения  $y_j$  выходных переменных (функций отклика).

8.2. Вычисленные значения сравниваются с нижней и верхней границами поддиапазонов каждого показателя качества.

8.3. Проверка условия

$$y_j^{* (\min)} \leq y_j \leq y_j^{* (\max)}. \quad (3.3)$$

8.4. Выполнение условия (3.3). Вычисления завершаются.

Невыполнение условия (3.3). Из поддиапазонов значений входных переменных выбираются другие количественные значения по методу половинного деления (может также использоваться метод золотого сечения).

8.5. Выбор производится до выполнения условия (3.3).

Таким образом, определяется и формализуется информация для ЛПР на тактическом и оперативном уровнях КАСУК МК.

#### 4. Методы исполнения решений

Наибольшие трудности возникают при алгоритмизации процедур исполнения принятых решений (реализации управлений).

Если на агрегатном уровне воздействия могут быть реализованы с помощью управляющих устройств и исполнительных механизмов (двигатели, натяжные станции, гидроцилиндры и пр.), то на верхних уровнях КАСУК (стратегическом и тактическом) автоматизировать процедуры исполнения решений достаточно проблематично из-за возрастающей роли субъекта в управлении качеством.

В соответствии с местом и ролью человека, систему управления качеством металлургического комбината можно представить в виде совокупности двух разновидностей подсистем (рис. 3).

Первую объединяющую верхний (стратегический) и средний (тактический) иерархические уровни (см. рис. 1), следует отнести к активным или организационным системам, в которых человек, согласно классической трактовке, одновременно является и субъектом, и объектом управления [15].

Вторая подсистема, включающая нижний (оперативный) уровень (см. рис. 1), относится к человеко-машинным системам, в которых человек является субъектом управления, а объектом управления является техническая система (технологический процесс, производственный участок, отделение цеха, агрегат и пр.).

Под организационной системой, как правило, подразумевают сообщество людей, объединенных для реализации некоторых программ (решения задач), позволяющих достичь поставленных целей и действующих на основе определенных правил и процедур [15].

Основными проблемами эффективного функционирования первой подсистемы является разработка адекватных моделей и методов принятия решений на стратегическом уровне в условиях постоянно изменяющейся конъюнктуры рынков продукции металлургического комбината и изделий из неё, а также выбор ЛПП оптимальных управляющих воздействий на объект управления, в качестве которого выступают представители среднего (тактического) уровня системы управления качеством (руководители среднего звена).

Как уже отмечалось ранее, снизить влияние субъективного фактора на стадии принятия решений можно за счет автоматизации процедур сбора, обработки соответствующих данных (см. выше по тексту) и представления информации в форме, необходимой и достаточной для правильного принятия решения. В этом случае субъекту (ЛПП) предлагается результат решения – наилучший вариант (альтернативу) из множества существующих в соответствии с заданным им критерием оптимизации (например, формулы (2.3) – (2.4)). Формализовать процедуры исполнения решений анализа и синтеза управляющих воздействий в рамках организационной подсистемы намного сложнее.

В настоящее время для этого чаще всего используется базовая модель мотивационного управления [15]. В практике металлургического производства хорошо зарекомендовали себя отработанные методы управления персоналом, заключающиеся в передаче соответствующих руководящих директив (управляющих воздействий) посредством плановых, оперативных, селективных и пр. совещаний по состоянию производства, оборудования, технологии и отгрузки всех видов продукции.

### Заключение

Изложенные в статье идеи и тезисы предназначены в первую очередь специалистам соответствующего профиля, а также всем заинтересованным читателям. Надеемся, что результаты анализа влияния человеческого фактора на эффективность систем управления качеством металлургического комбината будут полезны при проектировании, создании и эксплуатации подобного рода систем в реальном производстве и при разработке прогрессивных методов управления качеством на различных предприятиях с многооперационной технологией, производящих массовые виды продукции.

1. Человеческий фактор в управлении / Под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. М.: Ком Книга, 2006. – 496 с.
2. Исикава, К. Японские методы управления качеством: Сокр. перевод с англ. / научный редактор и автор предисловия А.В. Гличев. М.: Экономика, 1998. – 215 с.
3. Фейгенбаум, А. Контроль качества продукции Сокр. Перевод с англ. / Автор предисловия и научный редактор А.В. Гличев. М.: Экономика, 1986. – 471 с.
4. Настич, В.П., Скороходов, В.Н., Божков, А.И. Управление качеством тонколистового проката / под ред. А.И. Божкова. М.: «Интернет Инжиниринг», 2001. – 296 с.
5. Крылова, Г.Д. Зарубежный опыт управления качеством. М.: Изд. Стандартов, 1992. – 140 с.
6. Круглова, Н.Ю. Система качества продукции: новые подходы (вопросы и ответы): Справочное пособие. М.: Легпромбытиздат, 1991. – 176 с.
7. Орлов, А.Б. Анализ направлений создания автоматизированных систем управления качеством // Изд. ТулГУ. Технические науки. Выпуск 1. 2012. – с. 428 – 433.
8. Божков, А.И. Принципы построения автоматизированной системы управления качеством продукции в листопрокатных цехах металлургических предприятий // Изд. Вузов. Черная металлургия, 2000. № 9. – с. 38 – 42.
9. Божков, А.И., Настич, В.П. Принципы автоматизации управления качеством продукции металлургического комбината // Производство проката, 2009. № 8. – С.38 – 42.
10. Божков, А.И. Научное обоснование и создание систем автоматизации управления качеством продукции листопрокатных цехов предприятий черной металлургии. Сообщение 1. Комплексная автоматизированная система управления качеством продукции металлургического комбината // Производство проката, 2014. № 7. – С.27 – 33.
11. Божков, А.И. Научное обоснование и создание систем автоматизации управления качеством продукции листопрокатных цехов предприятий черной металлургии. Сообщение 2. Функциональная структура и основные этапы создания автоматизированной системы управления качеством листопрокатного цеха металлургического комбината // Производство проката, 2014. №8. – С.35 – 40.
12. ISO8402 – 94. Управление качеством и обеспечение качества. Словарь. Введ. 1994 – 04 – 01. – М.: Изд. Стандартов, 1994. – 15 с.
13. ГОСТ 34.601 – 90. Автоматизированные системы. Стадии создания Введ. 1992 – 01 – 01. М.: Изд. Стандартов, 1991. – 6с.
14. ГОСТ Р ИСО 9001 – 2008. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2009 – 01 – 01. – М.: Стандартформ, 2008. – 31 с.
15. Новиков, Д.А. Современные проблемы теории управления организационными системами. В кн. «Человеческий фактор в управлении»/ Под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. – М.: КомКнига. 2006. – с.391 – 407.

# THE HUMAN FACTOR IN QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS

A.I. Bozhkov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

**Abstract.** In this work reviewed and analyzed the questions of influence and the role of human as a subject on the efficiency of functioning of the quality management system in an industrial plant. As an example was selected metallurgical plant with the full closed production cycle of various kinds of products. Appropriateness of the maximum possible automation of processing and analysis procedures of measurement data, formalizing the description of management processes, decision making and execution on the selection and implementation of the control actions has been confirmed once again. The original method of searching and selecting of the best options industrial and technological processes from a variety of alternative variants in the function of the vector of local criteria is presented in this work. With the help of this method the role of the subject in the process of making and implementing decisions on the choice of the best control actions in the quality systems of the plant can be significantly reduced. At present the elements of quality management system are realized and successfully work in rolling mills of metallurgical plant..

**Keywords:** the quality management, the subject of management, the object of management, the quality system, the mathematical modeling, the methods of decision-making, the optimization of management.

## REFERENCES

1. *Chelovecheskiy faktor v upravlenii* [The human factor in management] / Ed. N.A. Abramova, K.S. Ginsberg, D.A. Novikov. Moscow: Com Book, 2006. - 496 p.
2. Ishikawa, K. *Yaponskie metody upravleniya kachestvom: Sokr. perevod s ang.* [Japanese methods of quality management: Sh. translation from Eng.]/ Scientific editor and author of the preface A.B. Glichev. Moscow: Economics, 1998. - 215 p.
3. Feigenbaum, A. *Kontrol' kachestva produktsii. Sokr. perevod s ang.* [Quality control of products. Sh. translation from Eng.]/ The author of the preface and the scientific editor A.V. Glichev. Moscow: Economics, 1986. - 471 p.
4. Nastich, V.P., Skorokhodov, V.N., Bozhkov, A.I., *Upravlenie kachestvom tonkolistovogo prokata* [Quality management of thin-rolled products]/ Ed. A.I. Bozhkov. Moscow: "Internet Engineering", 2001. - 296 p.
5. Krylova, G.D. *Zarubezhnyy opyt upravleniya kachestvom.* [Foreign experience in quality management.] M.: Publishing house of Standards, 1992. - 140 p.
6. Kruglova, N.Yu. *Sistema kachestva produktsii: novye podkhody (voprosy i otvety).* [Product quality system: new approaches (questions and answers)]: A reference book. Moscow: Legprombytizdat, 1991. - 176 p.
7. Orlov, A.B. *Analysis of directions of creation of automated quality control systems.* [Analiz napravleniy sozdaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya kachestvom.] // Publishing house of Tula State University. Technical science. Issue 1. 2012. - with. 428-433.
8. Bozhkov, *Printsipy postroeniya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya kachestvom produktsii v listoprokatnykh tsekhakh metallurgicheskikh predpriyatii* [A.I. Principles of constructing an automated quality management system in sheet rolling mills of metallurgical enterprises] // Publishing of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy, 2000. № 9. - with. 38 - 42.
9. Bozhkov A.I. Nastich V.P. *Principles of Automation of Quality Management of Products of the Iron and Steel Works* [Printsipy avtomatizatsii upravleniya kachestvom produktsii metallurgicheskogo kombinata]// Rolled Products Production, 2009. № 8. - P.38 - 42.
10. Bozhkov, A.I. Scientific substantiation and creation of automation systems for quality management of sheet rolling mill of ferrous metallurgy enterprises. Message 1. Integrated automated system for managing the quality of products of the Iron and Steel Works [Nauchnoe obosnovanie i sozdanie sistem avtomatizatsii upravleniya kachestvom produktsii listoprokatnykh tsekhov predpriyatii chernoy metallurgii. Soobshchenie 1. Kompleksnaya avtomatizirovannaya sistema upravleniya kachestvom produktsii metallurgicheskogo kombinata] // *Proizvodstvo prokata [Production of rolled products]*, 2014. № 7.- P.27-33.
11. Bozhkov, A.I. Scientific substantiation and creation of automation systems for quality management of sheet rolling shops of ferrous metallurgy enterprises. Message 2. Functional structure and the main stages of the creation of an automated quality management system for the sheet rolling mill of the Iron & Steel Works [Nauchnoe obosnovanie i sozdanie sistem avtomatizatsii upravleniya kachestvom produktsii listoprokatnykh tsekhov predpriyatii chernoy metallurgii. Soobshchenie 2. Funktsional'naya struktura i osnovnye etapy sozdaniya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya kachestvom listoprokatnogo tsekha metallurgicheskogo kombinata] // *Proizvodstvo prokata [Production of rolled products]*, 2014. № 8.- P.35-40.
12. ISO8402 - 94. Quality management and quality assurance. Dictionary. Introduction [ISO8402 – 94. Upravlenie kachestvom i obespechenie kachestva. Slovar'. Vvedenie] 1994 - 04 - 01. - Moscow: Publishing House of Standards, 1994. - 15 p.
13. GOST 34.601 - 90. Automated systems. Stages of creation. Introduction [GOST 34.601 – 90. Avtomatizirovannye sistemy. Stadii sozdaniya. Vvedenie] 1992 - 01 - 01. Moscow: Publishing House of Standards, 1991. - 6s.
14. GOST RISO 9001 - 2008. Quality management systems. Requirements. Introduction [GOST RISO 9001 – 2008. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya. Vvedenie] 2009 - 01 - 01. - Moscow: Standardform, 2008. - 31 p.
15. Novikov, D.A. *Sovremennye problemy teorii upravleniya organizatsionnymi sistemami. V knige «Chelovecheskiy faktor v upravlenii»* [Modern problems of the theory of management of organizational systems. In the book "The Human Factor in Management"] / Ed. N.A. Abramova, K.S. Ginsberg, D.A. Novikov. - M.: KomKniga. 2006. - p.391 - 407.

## СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ТРАНСМИССИЙ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРИ ВХОДЕ ПОЛОСЫ В КЛЕТИ ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

**Е.Е. Диденко**  
ПАО «НЛМК»,  
г. Липецк, Россия

didenko\_ee@mail.ru

**Аннотация.** В статье описывается способ регулирования скоростей электроприводов первых клетей чистовой группы, реализующий закрытие люфтов трансмиссий приводов рабочих валков и обеспечивающий снижение динамических ударов при заходе металла. Рассматриваемый способ касается работы системы автоматического управления скоростью и натяжением полосы (САУСН) чистовой группы клетей непрерывного широкополосного стана горячей прокатки.

**Ключевые слова:** электропривод прокатной клетки, суммарный зазор в главной линии клетки, динамическая нагрузка, ускорение главного электропривода, инерционный момент.

### Актуальность работы

Трансмиссии главных приводных линий клетей чистовой группы стана горячей прокатки достаточно сложны, их кинематические схемы имеют большое количество сосредоточенных масс, упругих связей, а также зазоров (люфтов). Пример эквивалентной схемы приводной линии чистовой клетки с сосредоточенными параметрами приведён на рис. 1 [1,2].

Как при исследовании динамических процессов прокатки, так и при эксплуатации механического оборудования прокатных клетей требуется учитывать зазоры в линии привода прокатной клетки. В результате исследований, выполненных на многих отечественных и зарубежных прокатных станах, установлена отрицательная роль зазоров (люфтов) в формировании нагрузок. При захвате металла рабочими валками (при входе полосы в клетку) в момент закрытия зазоров происходит ударное нагружение элементов привода, что усиливает возникающие упругие колебания. Динамические нагрузки при этом могут превосходить статические в 2-6 раз, что, естественно, приводит к резкому снижению сроков службы деталей трансмиссии и валков. Особенно подвержены износу в следствии ударных нагрузок шарниры шпиндельных устройств. Наличие большого количества сочленений в трансмиссии, а также наличие быстроизнашивающихся элементов, таких как вкладышей шпинделей, приводит к тому, что суммарный люфт моторного вала главного электропривода чистовой прокатной клетки при неподвижных рабочих валках может достигать нескольких градусов. Например, на одной из клетей черновой группы стана 2000 ПАО «НЛМК» в результате измерений подобный люфт достиг  $12^\circ$  [1]. Здесь следует заметить, однако, что количество сосредоточенных масс и сочленений в главной линии привода рабочих валков черновой прокатной клетки больше чем чистовой, за счёт наличия редуктора.

### Основные проблемы и решения

Способами снижения динамических нагрузок (ударов) при заправке полосы в клетки являются следующие

(это справедливо и для других любых механизмов обладающими кинематическими схемами с распределёнными массами, элементами с упругостями и зазорами).

Во-первых, своевременное техническое обслуживание узлов и сочленений трансмиссий, чтобы не допускать чрезмерного износа деталей и увеличение люфтов выше допустимых значений по условиям технической эксплуатации. Во - вторых, используя возможности АСУТП и систем управления электроприводами, обеспечивать такое оптимальное управление приводами, чтобы перед приложением ударной нагрузки (входа металла в прокатную клетку) обеспечить плавное и максимально полное закрытие зазоров в трансмиссиях, что позволит снизить на них динамическую нагрузку. Подобные способы разработаны и описаны во многих работах. [3,4,5].

Одним из них является способ, описанный в работах [1,6]. Данный способ реализован на стане 2000 горячей прокатки ПАО «НЛМК» для первых двух клетей чистовой группы (клетки №6 и 7) и чистового окалинатора. Здесь следует заметить, что данное решение имело целью не только закрытие зазоров в главных линиях первых клетей перед заправкой полосы, но и сокращение пауз между полосами в чистовой группе, и было выяснено, что наибольшее время заправки полосы в группу тратится при прохождении первых промежутков (от окалинатора до 6 и 7 клетей). Поэтому этот способ был применён именно к первым клетям.

Суть предложенного и реализованного способа заключается в следующем (рис. 2 (а)). На холостом ходу в требуемое число раз ( $k$ ) увеличивают скорость окалинатора, заправляют в него полосу и транспортируют её к первой клетке чистовой группы (она же №6 если считать клетки с начала стана при пяти клетях черновой группы). При подходе переднего концевого участка полосы к клетке №6 (время  $t_{пр1}$ ) начинают разгон электродвигателя этой клетки так, чтобы в момент захвата полосы валками  $t_6$  скорость клетки увеличилась в то же число раз ( $k$ ), что и скорость окалинатора, а зазоры в главной линии были выбраны инерционным моментом, возникающим на валках при их ускорении. Дальнейшую прокатку в клетки

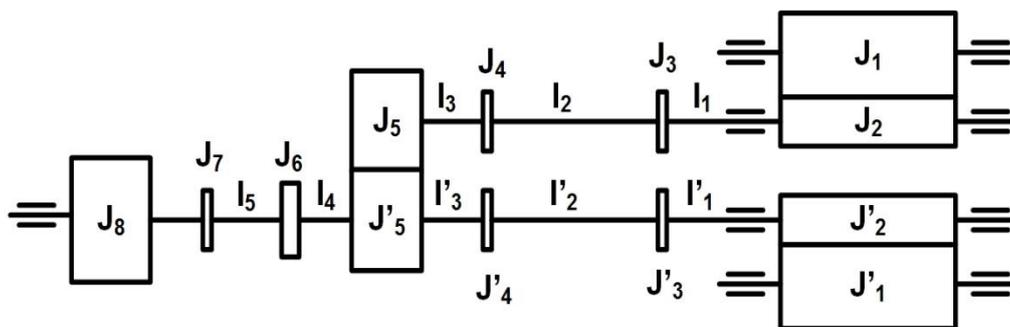


Рис. 1. Эквивалентная схема приводной линии клетки чистовой группы с сосредоточенными параметрами: масса №1 – опорный валок; масса №2 – рабочий валок; масса №3 – валковая головка шпинделя; масса №4 – шестерённая головка шпинделя; масса №5 – шестерённый валок; масса №6 – коренная муфта; масса №7 – моторная муфта; масса №8 – электродвигатель

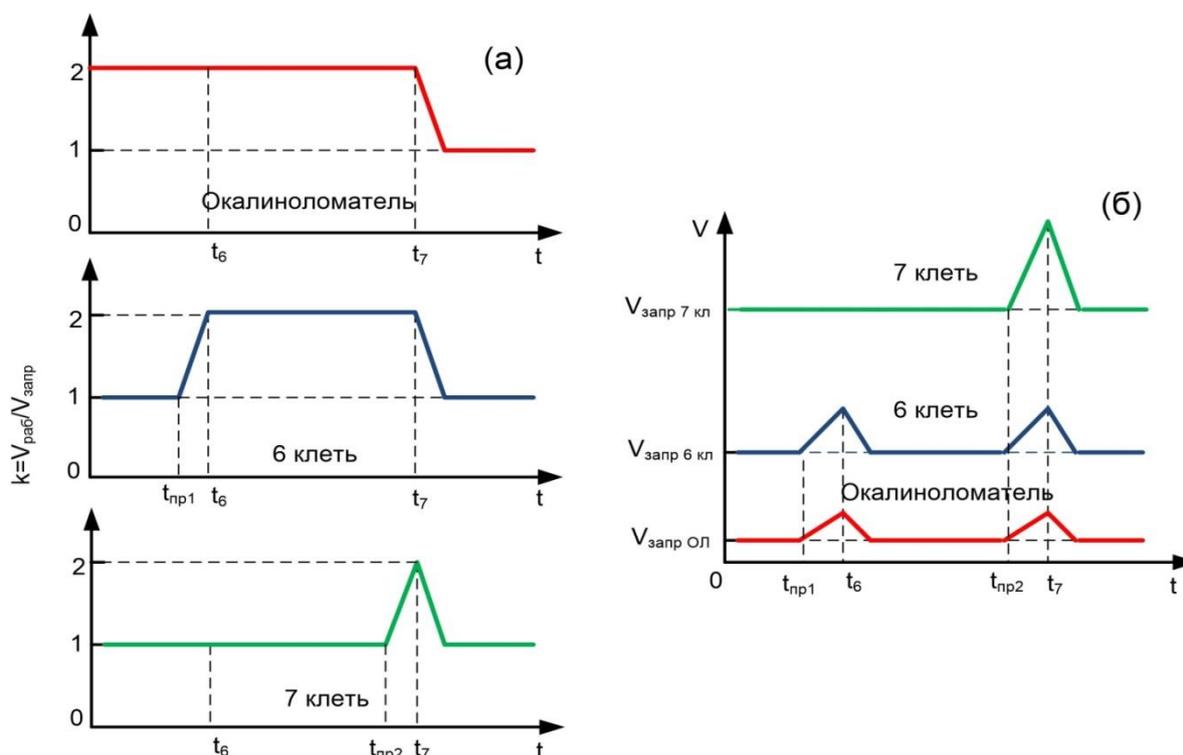


Рис. 2. Тахограммы «предразгона» окалиноломателя, 6 и 7 клетки по первому (а) и по второму (б) способам

№6 ведут на этой увеличенной скорости. Аналогично заправляют полосу в следующую клетку (время  $t_{пр2}$ ), после чего в момент  $t_7$  одновременно «сажают» скорость окалиноломателя, 6 и 7 клеток до заправочных, после чего прокатку продолжают в обычном режиме. Такой способ называется «Предварительный разгон» или «Предразгон» клеток. Тахограммы скоростей ОЛ, 6 и 7 клеток, соответствующие такому способу управления показаны на рис. 2 (а). В данном случае  $k=2$ . Величина ускорений предварительного разгона и его длительность подбирается практически и должны обеспечивать быстрое и полное закрытие зазоров в главных линиях. Для условий первых клеток стана 2000 ПАО «НЛМК» величина ускорений выбрана в пределах  $0,5 - 1 \text{ м/с}^2$ , продолжительность ускорения 1-2 с.

Следует отметить, что изложенный способ требует очень точного определения момента начала ускорения электропривода, так как нагрузку валкового узла инерционным моментом необходимо поддерживать до момента захвата полосы валками, иначе зазоры вновь

откроются. С другой стороны, в момент входа полосы в клетку соотношение рабочей и заправочной скоростей должно строго соответствовать значению  $k$ , в противном случае будет наблюдаться или петлеобразование в межклетевом промежутке или утяжка полосы вследствие нарушения секундных объёмов металла.

Следующий способ лишён вышеописанного недостатка. Данный способ заключается в следующем (см. рис. 2 (б)). Полоса входит в окалиноломатель на его заправочной скорости. Затем в момент, определяемый временем  $t_{пр1}$ , синхронно разгоняются (в соответствии с выражением (1)) окалиноломатель и 6 клетка, затем, после приёма полосы 6 клеткой, окалиноломатель и 6 клетка тормозятся до своих заправочных скоростей, и полоса транспортируется до 7 клетки. Причём в момент времени  $t_{пр2}$  синхронно разгоняются окалиноломатель, 6 и 7 клетки, далее процесс происходит аналогично предразгону на первом участке. При этом способе приём полосы происходит всегда на разгоне электропривода, что обеспечивает предварительное закрытие зазоров в главных линиях. В случае неточного

определения момента начала разгона клетей нештатной ситуации не возникнет.

Т.к. если, например, время разгона будет несколько позднее, то сам предразгон будет короче и зазоры закроются не полностью, если предразгон начнётся раньше, разгон будет длиться дольше, зазоры гарантировано закроются, но сами клетки достигнут большей скорости до момента приёма полосы. Это, однако, не является неординарной ситуацией. Здесь, главное, чтобы ускорение торможения после захода металла в клеть было значительно больше, чем ускорение предварительного разгона, что бы скорости клетей до захода полосы в следующую клеть успели достичь первоначальных заправочных значений.

Задания на скорость электроприводов окалиноломателя, 6 и 7 клетей определяются по выражению:

$$V_{кл} = k_{кл} \cdot (V_{запр} + a_{пр} \cdot t), \quad (1)$$

где,  $V_{кл}$  – скорость клетки с предразгоном (окалиноломатель, 6 или 7 клетки);  $V_{запр}$  – заправочная скорость чистой группы;  $a_{пр}$  – ускорение предварительного разгона;  $k_{кл}$  – коэффициент «клины скоростей» для данной клетки,  $t$  – время.

Тахограммы, показанные на рис. 2 (б) соответствуют выражению (1). Следует заметить, что (как указано ранее) для работы предварительного разгона по второму способу необходимо, что бы ускорение  $a_{пр}$  было меньше ускорения торможения после входа полосы в последующую клеть и что бы скорости клетей успели

стать равными по значению первоначальным заправочным скоростям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика процессов прокатки: Учебное пособие/ Коцарь С.Л., Третьяков В.А., Цупров А.Н., Поляков Б.А. – М.: Metallurgy, 1997. – 225 с.
2. Проектирование параметров и режимов работы оборудования листопркатных цехов: Учебное пособие / В.С. Зайцев, В.А. Третьяков – Липецк: ЛГТУ, 2009 – 660 с.
3. Ограничение динамических нагрузок обжимного стана средствами электропривода / А. В. Светличный [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*. – Донецк. 2013. - № 1. - С. 28-37.
4. Динамика и прочность прокатного оборудования / Ф.К.Иванченко, П.И.Полухин, М.А.Тылкин и др. – М.: Metallurgy, 1970.– 487 с.
5. Храмшин В.Р. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андриюшин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев, А.А. Радионов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2013. №2. – С. 69-77.
6. А.С. 718192 СССР / С.Л. Коцарь, Б.А. Поляков, А.Н. Цупров, М.Я. Ройзен // *Открытия. Изобретения*, 1980. №8.

## THE WAYS OF RELIEF OF DYNAMIC LOADINGS OF TRANSMISSIONS OF WORKING ROLLS AT THE ENTRANCE OF STRIP INTO STANDS OF FINISHING GROUP OF THE HOT ROLLING MILL

E.E. Didenko  
NLMK Group

**Abstract.** In article the way of regulation of speeds of electric drives of the first stands of finishing group realizing closing of gaps of transmissions of working rolls and providing the relief of dynamic blows at the entrance of strip is described. The considered way concerns the work of system of automatic control of speed and a tension of a strip (SAUSN) of finishing group of hot rolling mill.

**Keywords:** the electric drive of a rolling stand, a total gap in the main line of a rolling stand, dynamic loading, acceleration of the main electric drive, the inertial torque.

### REFERENCES

1. Kotsar S.L., Tretyakov V.A., Tsuprov A.N., Polyakov B.A. *Dinamika processov prokatki: uchebnoye posobiye*. [Dynamic of processes of rolling: study guide], Moscow, Metallurgy, 1997, 225 p.
2. Zaytsev V.S., Tretyakov V.A. *Proektirovanie parametrov i rezhimov raboty oborudovaniya listoprokatnih zechov: uchebnoye posobiye*. [Designing of parameters and operation modes of the equipment of rolling manufactories: study guide], Lipetsk, Lipetsk State Technical University, 2009, 660 p.
3. Svetlichny A.V. and other, Limiting of dynamic loads of crimping mill by means of electrodrive [Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok obzhimnogo stana sredstvamy elektroprivoda], *Metallurgicheskiye processy i oborudovanie [Metallurgy processes and equipments]*, 2013, №1, pp 28-37.
4. Kotsar S.L., Polyakov B.A., Tsuprov A.N., Rojzen M. Ya., Certificate of Authorship: 718192 USSR [Avtorskoje svidetelstvo: 718192 SSSR], *Otkrytiya. Izobreteniya. [Discovery. Invention]*, 1980, №8.
5. Hramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S., Radionov A.A. Dynamic loads reduction of mechanical and electrical equipment of the hot rolling mill roughing train [Snizhenie dinamicheskikh nagruzok mekhanicheskogo i ehlektricheskogo oborudovaniya chernovoj podgruppy kletej stana goryachej prokatki], *Mashinostroenie setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Russian internet journal of industrial engineering]*, 2013, №2, pp 69-77.
6. А.С. 718192 USSR. S.L. Kocar, B.A. Polyakov, A.N. Cuprov, M.Y. Rojzen. *Otkrytiya. Izobreteniy [Opening. Inventions]*. 1980. № 8.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ****Р. Р. Загидуллин**ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,  
г., Уфа, Россия

polysoft@list.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются основы планирования процессов машиностроительного предприятия. При этом принимается во внимание, что учитываются не только технологические процессы, но также все процессы, которые в настоящее время принято называть «бизнес-процессами».

**Ключевые слова:** планирование, процессы, единицы планирования, бизнес-процессы, жизненный цикл предприятия.

**Актуальность работы**

Планирование работ на предприятиях с помощью корпоративных систем управления направлено на повышение производительности, фондоотдачи и качества выпускаемой продукции. В то же время в большинстве работ процесс планирования рассматривается только с точки зрения планирования технологических процессов (ТП). Учет всех остальных процессов, которые, при отсутствии анализа, обозначаются общим термином «бизнес-процессы», отсутствует. Отсутствуют также методы их определения в общем множестве процессов. В то же время без их учета невозможно построить расписания для ТП. Поэтому в данной статье рассматриваются базовые принципы и подходы, позволяющие учесть все виды процессов при построении плана работ на машиностроительном предприятии.

**Основные проблемы и решения**

Под процессами будем понимать любые процессы целенаправленной деятельности, которые протекают во времени на предприятии и которые так или иначе связаны с выпуском продукции и обеспечением этой возможности.

В последние годы в литературе под процессами чаще всего понимают, так называемые бизнес-процессы (БП). При этом под БП в большинстве случаев понимаются процессы, имеющие некую потребительскую ценность. При таком подходе значимыми процессами могут являться только те процессы, в которых происходит непосредственное качественное изменение свойств полуфабриката по пути его превращения в готовую продукцию – это технологические процессы изготовления деталей и сборки готовых узлов и машин. Но это лишь малая часть процессов, которые мы наблюдаем на предприятии. Не менее важными являются процессы транспортировки деталей и машин между позициями ТП, процессы конструирования изделия и разработки его технологии изготовления, процессы контроля, изготовления требуемого инструмента и оснастки, и многие другие, и даже, как ни странно это звучит – процессы ожидания, если это процесс ожидания изготовления и соответствующей поставки предприятию неких комплектующих изделий другим предприятием или торговораспределительной сетью.

Кроме того, существуют процессы, на первый взгляд вообще не связанные с конкретным изделием, например, процессы подачи тепла, воды и электричества на рабочие места, процессы уборки рабочих помещений, процессы ремонта и техосмотра оборудования, процессы строительства и ремонта заводских зданий и коммуникаций и пр. И может так получиться, что, оставив без внимания один или два несущественных, с точки зрения выпуска какого-либо изделия, процесса, мы можем получить ситуацию, когда выполнение ТП изготовления продукции станет невозможным.

С точки зрения управления и планирования все процессы, включая ТП, равнозначны между собой, поскольку любой процесс можно представить в виде множества операций (стадий), каждой операции можно сопоставить тот или иной ресурс для выполнения, для каждой операции любого процесса можно определить длительность выполнения, для всех операций каждого процесса можно указать отношения предшествования. Все эти перечисленные выше действия – это ни что иное, как действия по регламентации того или иного процесса. Регламентация процессов в настоящее время наиболее полно представлена только для ТП в машиностроении. В отношении остальных видов процессов попытки управления и планирования только еще предпринимаются на уровне регламентации процессов [1 и др.].

Управление любыми процессами должно подчиняться той же парадигме управления, что и управление ТП – планированию во времени и заключается в последовательном решении трех задач: 1) составление полного перечня всех процессов на предприятии; 2) регламентация процессов; 3) планирование всех процессов во времени.

При анализе процессов нас, прежде всего, будут интересовать процессы, которые протекают на предприятии, т.е. мы рассмотрим вопрос с точки зрения жизненного цикла продукции (ЖЦП). Из всего множества процессов нам в полной мере известен состав ТП и неизвестен состав всех остальных процессов (рис.1). Тем не менее, знание этого состава процессов позволит нам управлять во времени не только частью системы – производственными участками, а всем предприятием, т.е. более полно и более точно. Кроме того, это позволит сократить длительность всего ЖЦП.

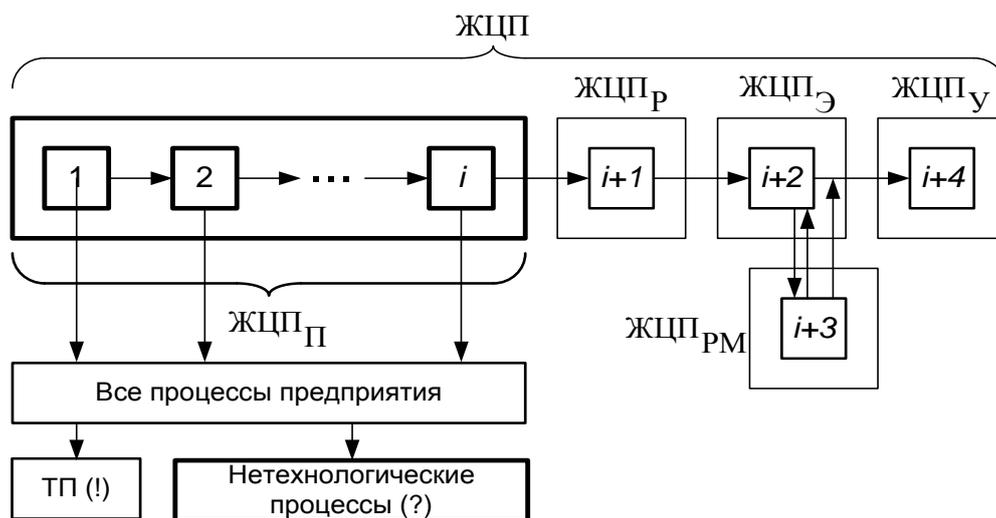


Рис.1. Состав процессов, требуемых для определения:

ЖЦП<sub>П</sub> – ЖЦП производства; ЖЦП<sub>РМ</sub> – ремонта; ЖЦП<sub>Р</sub> – ЖЦП распределения; ЖЦП<sub>Э</sub> – эксплуатации; ЖЦП<sub>У</sub> – утилизации

Больше всего в общей концепции CALS [2, 3 и др.] нас интересуют процессы цикла ЖЦП<sub>П</sub> с основной задачей сокращения ЖЦП на этапе производства. Отметим тот факт, что длительность практически всех остальных этапов ЖЦП, которые мы не будем учитывать, так или иначе, сокращается из года в год. При этом в общей цепочке ЖЦП с каждым годом усиливается дисбаланс между относительно постоянной длительностью этапа ЖЦП<sub>П</sub> и сокращением длительности остальных этапов.

Таким образом, сокращение большинства этапов ЖЦП заставляет производство все быстрее и быстрее выводить на рынок новые товары.

Действенным средством сокращения длительности производственного цикла является планирование производства с помощью специализированных систем управления классов MES (Manufacturing Execution System) и APS (Advanced Planning & Scheduling). Но если внимательно взглянуть на этап ЖЦП<sub>П</sub>, то окажется, что он состоит не только из механической обработки и сборки продукции. Изготовлению продукции предшествуют этапы интеллектуального характера.

Если не учитывать этап маркетинга, этап ЖЦП<sub>П</sub>, укрупнено, включает в себя следующие основные этапы (рис.2,а): этап конструкторской разработки изделия – ЖЦП<sub>К</sub>, этап разработки технологического процесса – ЖЦП<sub>Т</sub>, этап технологической подготовки производства – ЖЦП<sub>ТПП</sub> и непосредственно сам этап изготовления продукции – ЖЦП<sub>И</sub>. Таким образом, упорядочению и планированию с целью сокращения общей длительности этапа ЖЦП<sub>П</sub> подлежит не только цикл механической обработки, но также все предшествующие ему этапы. При этом между этими этапами зачастую возникает сложная взаимосвязь во времени, обусловленная порядком выполнения всего комплекса работ, принятыми на предприятии особенностями организации производства. Могут встречаться как строго последовательные варианты этапов (рис. 2,а), так и с перекрытием во времени (рис.2,б).

Последняя возможность возникает в том случае, если после утверждения сборочного чертежа изделия, конструктор, не дожидаясь полного окончания детализации изделия, сможет приступить к разработке технологического процесса изготовления той или иной детали. Такая возможность появляется с использованием систем классов PDM/PLM – в том или ином проекте изделия всегда можно увидеть готовность тех или иных документов (чертежей, ТП и других документов).

Макропроцессы проектирования конструкции и технологии, представленные на рис.2, относятся ко всей номенклатуре выпускаемой предприятием продукции и поэтому, если посмотреть на детальную картину этих процессов, то мы увидим, что они представляют собой сложную взаимосвязь расписаний работы соответствующих служб (рис.3), где  $K_1, \dots, K_n, T_1, \dots, T_n, I_1, \dots, I_n, PC_1, \dots, PC_n$  – множества обслуживающих устройств в виде конструкторов, технологов, инженеров по ТПП и рабочих центров (РЦ) соответственно.

Этап разработки ТП очень часто может начинаться до момента полного окончания этапа конструирования, – после разработки и утверждения сборочных чертежей изделий разработка ТП на отдельные детали могут начинаться по мере завершения разработки чертежей тех или иных деталей. Такая же картина может наблюдаться для этапов ТПП и непосредственного изготовления деталей. С помощью такого последовательно-параллельного способа планирования работ возможно сокращение длительности ЖЦП<sub>П</sub> отдельных изделий –

$$t_{ЖЦП_{Пi}}$$

При этом длительность ЖЦП<sub>П</sub> тем меньше, чем меньше разница между моментами начала смежных этапов ЖЦП<sub>П</sub> для каждого  $i$ -го изделия – величины времени  $\Delta t_{K-T_i}, \Delta t_{T-ТПП_i}$  и  $\Delta t_{ТПП-И_i}$ .

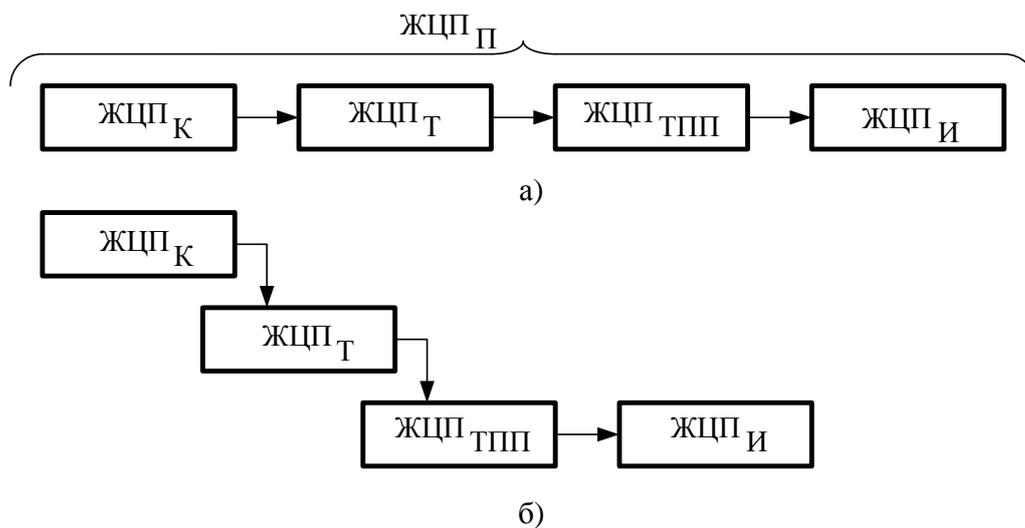


Рис.2. Варианты выполнения этапов ЖЦП<sub>П</sub> во времени

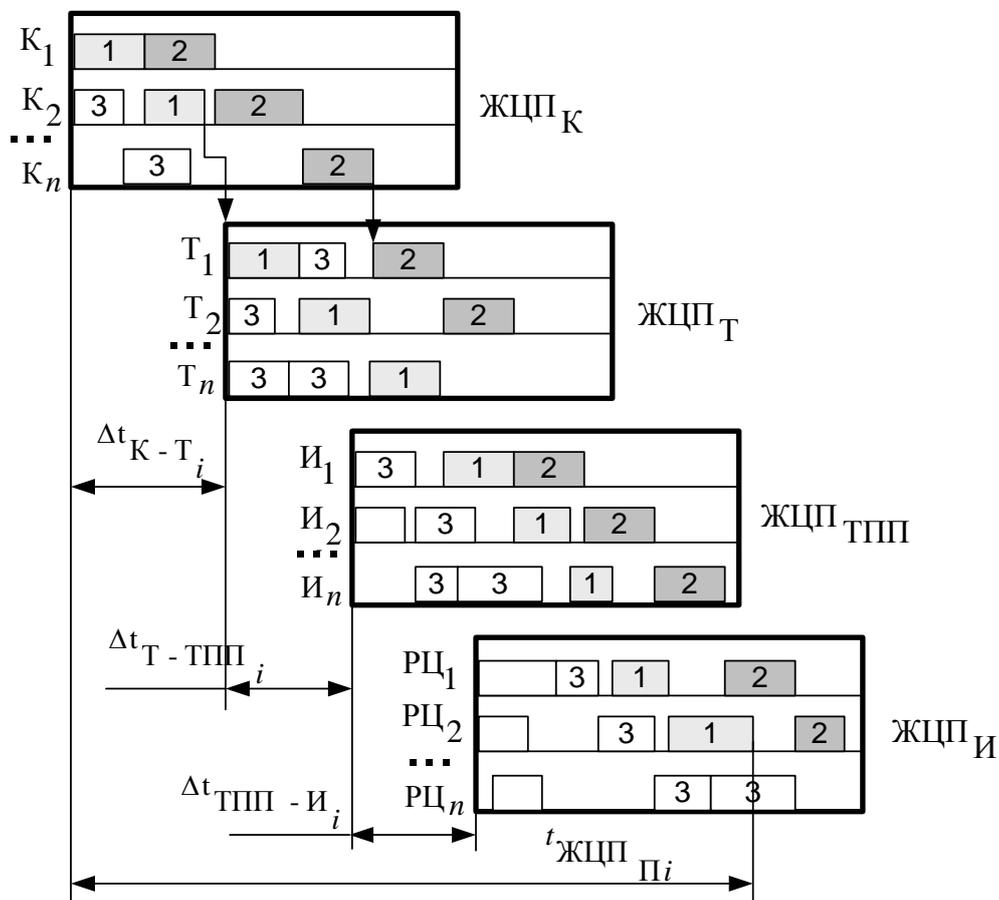


Рис.3. Взаимосвязь расписаний работы различных этапов ЖЦП<sub>П</sub>

Сокращение этих величин возможно только в одном случае – если модель планирования будет включать в себя как все этапы ЖЦП<sub>П</sub>, так и все исполнительные устройства, отвечающие за выполнение тех или иных работ ЖЦП<sub>П</sub> – множества инженеров-конструкторов, технологов, специалистов отделов АСТПП и множества рабочих центров по всей технологической цепочке (технологическое оборудование предприятия). При этом диаграмма этапа ЖЦП<sub>И</sub> будет представлена всеми производственными подразделениями предприятия (цехами) с последующей дифференциацией на расписания отдельных подразделений.

Множество операций по каждой единице продукции  $e_i$ , из общей номенклатуры  $M\{m\}$ , подлежащей планированию, в этом случае включает в себя операции всех этапов ЖЦП<sub>П</sub>

$$M_{e_i} = \bigcup_{j=1}^{p_K} e_{ij} \cup \bigcup_{j=1}^{p_T} e_{ij} \cup \bigcup_{j=1}^{p_{ТПП}} e_{ij} \cup \bigcup_{j=1}^{p_I} e_{ij}, \quad (1)$$

где  $p$  – количество операций того или иного этапа.

Решение таких задач сквозного комплексного планирования ЖЦП<sub>П</sub> лежит в области построения межцеховых расписаний работы предприятия [4]. При этом каждое подразделение может иметь критерии модели планирования, отличные от критериев другого подразделения. Критерий формирования общего расписания при этом представляет собой векторный критерий:

$$F_n = \{F_k, F_m, F_{mnn}, F_u\}, \quad (2)$$

где  $F_k$  – частный критерий построения расписания для конструкторского отдела;  $F_m$  – частный критерий построения расписания для технологического отдела;  $F_{mnn}$  – частный критерий построения расписания службы ТПП;  $F_u$  – частный критерий построения расписания на этапе изготовления изделия.

Такие задачи в виду большого количества планируемых работ, т.е. большой размерности назначения в задаче планирования, лучше всего решать с помощью APS-систем, которые, в силу упрощенных эвристических алгоритмов планирования, позволяют составить расписания для больших размерностей за приемлемое время. Но контроль и исполнение расписаний работы каждого из подразделений лучше всего возложить на MES-системы, которые обладают функциями диспетчирования и корректировки расписаний в режиме реального времени.

При этом необходимо отметить, что на сокращение указанных величин времени  $\Delta t_{K-T_i}$ ,  $\Delta t_{T-ТПП_i}$  и  $\Delta t_{ТПП-И_i}$  сильно влияет возможность альтернативного

назначения той или иной работы (разработки чертежа детали, ТП, выполнение операции и т.п.) на как можно большее число взаимозаменяемых устройств (конструкторов, технологов, РЦ), которые могут выполнить эту работу. Чем выше коэффициент альтернативности назначения  $k_a$  [4] той или иной работы  $e_{ij}$  на имеющемся множестве операций  $p_i$  и множестве исполнительных устройств  $N\{n\}$ , тем плотнее получается расписание и тем меньше длительность того или иного этапа ЖЦП<sub>П</sub>.

Таким образом, мы видим, что если поставить задачу управления ЖЦП как задачу планирования не только производственного цикла, но и всех этапов ЖЦП на предприятии, можно существенно сократить длительность ЖЦП<sub>П</sub>, а значит – быстрее поставить продукцию на рынок и получить прибыль.

Для того, чтобы перейти к решению задач планирования всех процессов предприятия, необходимо выявить полный перечень процессов конкретного предприятия. Эта задача должна решаться путем анализа всех заказов предприятия на его структурно-функциональной схеме (рис.4).

При этом анализу подлежит жизненный цикл заказа. Отслеживается весь путь, который проходит заказ, от заявки со стороны заказчика, до отгрузки готовой продукции и на каждом этапе для каждого подразделения

через которое проходит заказ, определяется состав процессов, связанный именно с этим заказом. Проанализировав все входящие заявки, можно определить состав и мощность всего множества процессов.

Каким же образом мы можем это сделать? Для этого рассмотрим более детально один технологический процесс, состав операций которого нам известен на основе разработанной документации. Этот ТП рассмотрим с точки зрения такого известного в технологии машиностроения понятия, как комплектация.

Под комплектацией детали-сборочной единицы (ДСЕ) понимается процедура, которая отвечает за то, что для изготовления данной ДСЕ имеются в наличии: все необходимые материалы, все технологические и вспомогательные ресурсы, все комплектующие, вся оснастка, весь инструмент, все нормы и вся документация. Если все это имеется в наличии, то изготовление данной ДСЕ можно смело планировать во времени. Эта процедура должна выполняться по отношению ко всему составу номенклатуры выпуска, которой в дальнейшем может оперировать система APS при составлении общего расписания.

Несмотря на очевидность этой, на вид, простой процедуры комплектации, общая задача планирования для систем с большим количеством работ и процессов очень часто превращается в некий снежный ком, который растет по мере анализа номенклатуры изделий, предназначенных к запуску. Рассмотрим детально эти проблемы.

Допустим, что у нас есть некая ДСЕ  $e_i$  (рис.5), представленная ТП в виде множества операций  $\{e_{ij}, j = 1, \dots, p_i\}$ . Для каждой операции известны необходимые для выполнения: ресурсы, оборудование, инструмент, оснастка, комплектующие, документация и пр. В процессе комплектации при проверке какой-либо  $j$ -й операции может оказаться, что для нее требуется специальный инструмент, который не может быть приобретен в силу уникальности, а следовательно, должен быть изготовлен раньше, чем начнется по плану  $j$ -я операция. На  $j+1$ -й операции может оказаться, что для нее требуется специальное приспособление и этого приспособления нет не только в наличии, но оно даже не спроектировано. И, наконец, на какой-либо  $k$ -й операции анализ покажет, что, во-первых, необходимо приобретение стандартных комплектующих, которых нет на складе предприятия, и нет специального мерительного инструмента, который еще предстоит разработать и изготовить. Все то, что мы указали в качестве недостающих ресурсов для выполнения технологических операций, необходимо обеспечить к моменту их начала.

Мы видим, что даже один ТП изготовления ДСЕ может породить множество других процессов, как производственных, так и вспомогательных на различных уровнях.

Все вспомогательные, по отношению к основному ТП ДСЕ (нашему заказу), процессы выполняются людьми, специалистами, станками, которые на текущий момент времени также являются занятыми. Это означает, что планировать надо не только множество номенклатуры изделий портфеля заказов. Планированию во времени

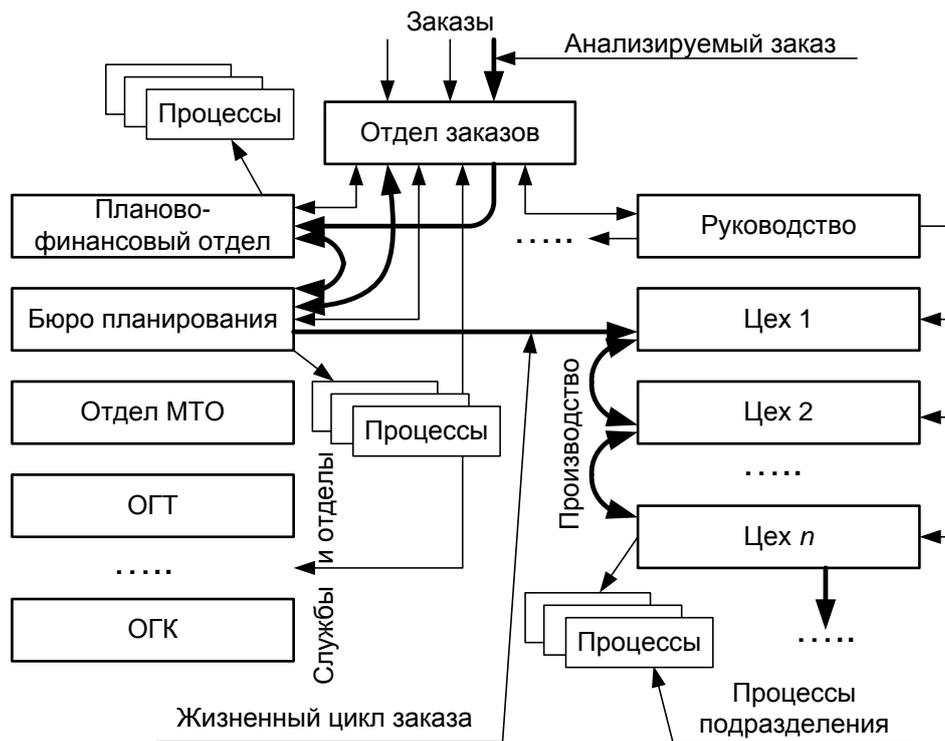


Рис.4. Анализ жизненного цикла заказа



Рис.5. Процесс комплектации ДСЕ

с помощью систем APS подлежат все процессы предприятия, как основные, относящиеся к ДСЕ из портфеля заказов, так и вспомогательные, без которых изготовить эти ДСЕ не представляется возможным.

Следовательно, множество единиц планирования, после процедуры комплектации будет состоять как из единиц планирования в виде наших ДСЕ, так и из всех других работ, перечень которых был определен на этапе комплектации, т.е.

$$M^{\Sigma} = M \cup M^K \cup M^T \cup M^D \cup M^B, \quad (3)$$

где  $M$  – множество ЕП из портфеля заказов для системы класса APS,  $M^K, M^T, M^D, M^B$  – множества ЕП, связанных, соответственно, с такими вспомогательными процессами, как: конструкторские, технологические, различные процессы делопроизводства, вспомогательные производственные процессы (для упрощения задачи полной классификации процессов для конкретного предприятия ограничимся этим составом наименований процессов).

Соответствующим образом можно отразить и все множество обслуживающих устройств (ОУ) для процесса планирования с помощью APS с учетом комплектации:

$$N^{\Sigma} = N \cup N^K \cup N^T \cup N^D \cup N^B, \quad (4)$$

где  $N$  – множество РЦ предприятия, используемых для выпуска продукции портфеля заказов,  $N^K, N^T, N^D, N^B$  – множество таких ОУ, как: конструкторы, технологи, другие специалисты, задействованные в различных процессах предприятия, РЦ. Задействованные как в основном, так и во вспомогательном производстве. На этих множествах (3 – 4) системе APS и предстоит строить расписания работы всего предприятия.

При этом между всеми единицами планирования должны быть указаны отношения предшествования, например, для нашего случая (см. рис.5) будут справедливы записи вида  $a_n \rightarrow e_{ij}$  и  $b_n \rightarrow c_1, c_n \rightarrow d_1, d_n \rightarrow e_{ij+1}$ . Чтобы обеспечить в такой сложной структуре процессов их своевременность относительно сроков изготовления основных ДСЕ, нет необходимости устанавливать директивные сроки на остальные вспомогательные процессы. Достаточно того, что в модели планирования будет присутствовать директивный срок выпуска для самой ДСЕ –  $\tau_i^d$ .

Как видно из предыдущего примера, даже один ТП может являться инициатором нескольких различных процессов – от проектирования конструкции и заказа материалов до производственных процессов изготовления инструмента или оснастки. Это говорит о том, что основные процессы предприятия – производственные, которые отвечают за производство основной продукции, могут порождать массу других процессов. При этом генерация процессов происходит иерархически, – когда процессы, необходимые для изготовления основной продукции порождают новые процессы, т.е. может появиться несколько уровней соподчиненных БП. На следующем этапе необходимо провести регламентацию всех выявленных процессов. При этом определяются:

состав операций БП, количество операций процессов –  $p_{П}$ , условие предшествования, требуемые ресурсы и данные, длительность выполнения и другие параметры. Последний этап управления процессами – планирование во времени и составление расписания заключается в том, что множество единиц планирования  $M$  в APS-системе формируется из всего множества процессов предприятия.

Диаграмма такого комплексного плана, после регламентации всех выявленных процессов, будет включать в себя все ОУ, как основные – РЦ на множестве  $N$ , так и вспомогательные (рис.6.).

В дальнейшем это большое расписание необходимо разделить на отдельные расписания – для основного производства, для вспомогательного производства, для конструкторского и технологического отделов, для остальных служб предприятия, участвующих в общем плане выпуска продукции на множествах (3 – 4). Все частные расписания будут составляться с одинаковой точностью, поскольку являются частью общего расписания. Каждое подразделение будет работать в соответствии со своим расписанием, но точность выполнения этого расписания будет сказываться непосредственно на общем расписании работы предприятия.

Все процессы, относящиеся к одному и тому же  $i$ -му заказу из общего портфеля заказов, объединяет одно – момент сдачи заказа  $\tau_i^d$ . Это значительно облегчает задачу в том плане, что становится ясно, что порядок выполнения любых процессов, порожденных заказами, зависит, прежде всего, от срока сдачи самого заказа.

В результате планирования мы получим полную картину выполнения всех процессов предприятия во времени. При этом каждое подразделение предприятия получает свое расписание, которое связано с расписаниями других подразделений, хотя на первый взгляд может показаться и независимым. При этом выполнении плана каждым подразделением предприятия подчинено общему критерию планирования, например, критерию максимизации прибыли предприятия.

При планировании в рамках предприятия используются системы класса APS, оперирующие только эвристическими алгоритмами, поскольку рассматриваемые задачи планирования не могут быть решены в рамках классической теории расписаний [5, 6] ввиду большого количества технологических данных и организационных факторов.

## Выводы

В работе показано, что задача планирования процессов предприятия является комплексной задачей, в которой необходимо учитывать не только ТП, но и все различные БП, инициаторами которых являются ТП. Процесс планирования работ при этом опирается на полное множество процессов и ОУ, в качестве которых могут выступать не только рабочие центры (станки, автоматы, участки автоматических линий и т.п.), но также ОУ, представляющие собою конструкторов, технологов и других специалистов, участвующих в выполнении того или иного процесса. Только в этом случае возможно получение выполнимого расписания работ как для всего предприятия, так и для отдельных цехов и участков.

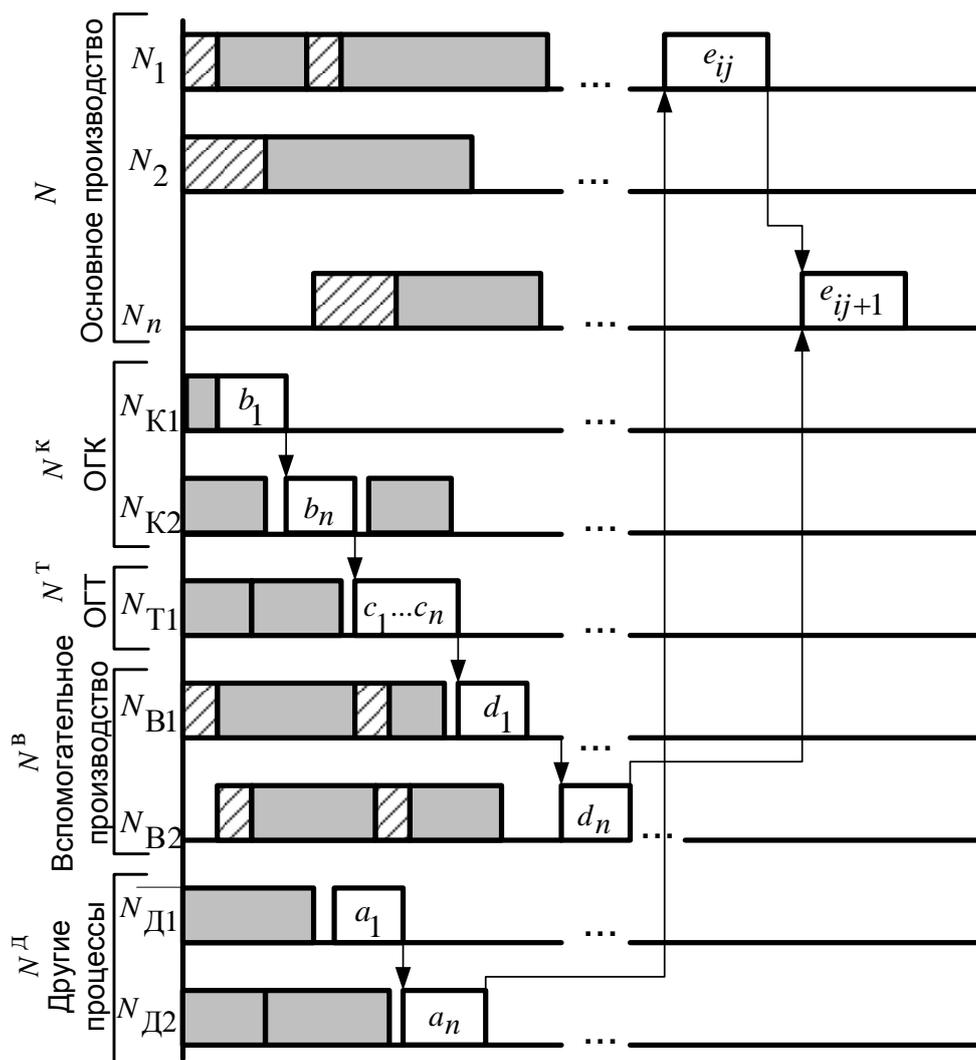


Рис.6. Общая диаграмма Гантта для планирования процессов предприятия

### Заключение

Предлагаемые в работе базовые подходы и принципы планирования продукции в рамках машиностроительных предприятий требуют не только использования корпоративных систем, например, APS или MES. Прежде всего, требуется создание единого информационного пространства предприятия, в котором можно было бы оперировать всеми видами процессов, определять их, регламентировать. В условиях современной динамичной рыночной экономики изложенные в работе принципы планирования являются гарантом возможности построения таких планов работ во времени, которые бы дали максимум прибыли и конкурентного преимущества.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Репин В. В. Бизнес-процессы компании. Построение, анализ, регламентация. М.: Стандарты и качество, 2007. – 238 с.
2. Колчин А. Ф., Овсянников М.В, Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В. Управление жизненным циклом продукции. – М.: Анахарсис, 2002. – 304.
3. Судов Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. М.: ООО Издательский дом МВМ, 2003. – 264 стр.
4. Загидуллин Р. Р. Планирование машиностроительного производства. Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 392 с.
5. Танаев В.С., Сотсков Ю.Н, Струевич В.А. Теория расписаний. Многостадийные системы. – М.: Наука, 1989. – 328 с.
6. Brucker P. Scheduling Algorithms. 4 edition,. New York: Springer. – 2004. – 367 p.

---

## THEORETICAL BASES OF PLANNING OF PROCESSES OF THE ENTERPRISE

**R. R. Zagidullin**

Ufa State Aviation Technical University,  
Ufa, Russia

**Abstract.** The article deals with the fundamentals of planning the processes of a machine-building enterprise. It is taken into consideration that not only technological processes are taken into account, but also all the processes that are currently accepted as «business processes».

**Keywords:** planning, processes, planning units, business processes, enterprise life cycle.

### REFERENCES

1. Repin V.V. *Biznes-protsessy kompanii. Postroenie, analiz, reglamentatsiya*. M.: Standarty i kachestvo, 2007. – 238 p.
2. Kolchin A. F., Ovsyannikov M.V, Strelalov A.F., Sumarokov S.V. *Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii*. – M.: Anakharsis, 2002. – 304 p.
3. Sudov E. V. *Integrirovannaya informatsionnaya podderzhka zhiznennogo tsikla mashi-nostroitel'noy produktsii*. M.: OOO Izdatel'skiy dom MVM, 2003. – 264 p.
4. Zagidullin R. R. *Planirovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva*. Staryy Oskol: TNT, 2013. – 392 p.
5. Tanaev V.S., Sotskov Yu.N, Strusevich V.A. *Teoriya raspisaniy. Mnogostadiynye sistemy*. – M.: Nauka, 1989. – 328 p.
6. Brucker P. *Scheduling Algorithms*. 4 edition,. New York: Springer. – 2004. – 367 p.

УДК 519.85: 536.2: 531.7

## АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКЕ

В.В. Жихаревич<sup>1</sup>, Л.М. Шумиляк<sup>2</sup>, С.Э. Остапов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, г. Черновцы, Украина  
<sup>2</sup>lshumylyak@mail.ru

**Аннотация.** Предложена компьютерная система для автоматизации процесса выращивания термоэлектрического материала. Представлена математическая модель на основе клеточных автоматов, которая использовалась для создания программы моделирования и управления процессом кристаллизации расплава термоэлектрического материала при вертикальной зонной плавке. Описаны технические характеристики установки выращивания и реализация автоматизации процесса управления. Созданная компьютерная система, имеющая удобный для пользователя интерфейс, призвана не только облегчить труд человека на производстве, но и увеличить качество выращенного материала путем повышения точности регулирования и поддержания необходимых параметров процесса.

**Ключевые слова:** моделирование, управление, клеточные автоматы, полупроводник, установка выращивания.

### Введение

Развитие электронной техники зависит, прежде всего, от характеристик материалов, используемых для ее производства. Рост требований к качеству полупроводниковых материалов приводит к модернизации существующих технологий их получения. Весьма актуальной задачей в производстве различных полупроводниковых веществ, получаемых методом зонной плавки, является повышение процента выхода полезного для дальнейшего использования материала. Очевидно, что этот процент зависит от условий выращивания. Поиск оптимальных параметров получения материалов можно выполнять на основе реальных экспериментов, но это приводит к дополнительным экономическим затратам. В то же время, построение компьютерных моделей процессов получения материалов и проведение над ними ряда вычислительных оптимизационных экспериментов позволяет значительно сократить эти расходы. А для поддержания и улучшения производительности объекта на производстве экономически выгодно заменить участие человека в процессе управления на автоматическую систему, которая позволит выполнять операции, трудно осуществимые человеком в основном из-за недостаточного качества и точности регулирования параметров системы.

### Постановка проблемы

Проблема эффективного получения полупроводниковых материалов возникала не перед одним производителем. В большинстве случаев режим процесса подбирается эмпирически, то есть четко определить параметры процесса, в результате которого нужно получить материал с определенными свойствами, является довольно сложной задачей. Кроме этого, возникает проблема воспроизводимости эксперимента. Очевидно, что ручное управление таким процессом дает видимую погрешность при больших затратах трудовых ресурсов. Построение компьютерной модели процесса и

создание системы его автоматизации направлено на устранение существующих проблем.

### Анализ последних исследований и литературы

Сегодня многие исследователи занимаются проблемой автоматического управления процессом выращивания термоэлектрических материалов. В своей работе [1] Гоник М. М. и Боевкин В. И. рассматривают многосвязную систему автоматического управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов из расплава. А в [2] Бородин А. В., Бородин В. А. и другие описали автоматическое управление с обратной связью процессом выращивания кристаллов методом Киропулоса. В [3] автором осуществлено решение важной научно-технической проблемы по разработке теоретических основ и созданию автоматизированной микропроцессорной системы управления выращиванием монокристаллов германия по методу «Чохральского». Также этой проблемой занимались Винклер и Ньюберт, которые в [4] делают обзор отдельных стратегий для автоматического контроля процесса выращивания кристаллов. В [5] получена адекватная математическая модель и осуществлен синтез двухуровневой системы управления установкой выращивания кристаллов из расплава. А вот часто используемый метод зонной плавки на сегодня требует как автоматизации, так и ее детального описания для дальнейшего использования на производстве.

Целью данной работы является разработка системы, которая дала бы возможность на практике реализовать компьютерное автоматическое управление процессом зонного выращивания термоэлектрического материала.

В данной работе в качестве объекта управления выбрана установка, предназначенная для выращивания полупроводниковых материалов методом зонной плавки. Ранее нами была построена клеточно-автоматная модель этого процесса [6]. Этот алгоритм достаточно успешно

используется для аппроксимации процессов теплопередачи [7-10]. Разработанная в [6] модель учитывает зависимость температуры плавления от состава вещества и позволяет определить параметры процесса, при которых возникает явление концентрационного переохлаждения и отклонения от плоской формы фронта кристаллизации. В результате проведения ряда оптимизационных экспериментов была получена зависимость этих параметров от времени и координаты [11]. Компьютерная система автоматического управления поможет в реальных условиях провести процесс, максимально согласованный с моделируемым.

### Описание клеточно-автоматного метода моделирования процесса вертикальной зонной плавки

Для построения клеточно-автоматной модели процесса зонного выращивания нужно учесть теплопроводность, фазовые переходы первого рода, а также диффузию и сегрегацию лигатурной примеси. Учитывая зависимость температуры плавления от состава материала при определенных условиях можно наблюдать явление концентрационного переохлаждения, которое нежелательно для процесса [6]. Опишем структуру клеточно-автоматного поля для нашей модели. Размерность поля соответствует размерности моделируемой системы и содержит три слоя: 1) температура клетки  $T$ ; 2) концентрация примеси  $C$ ; 3) внутренняя теплота  $H$ , которая учитывается при моделировании фазовых переходов и определяет отношение концентрации примеси в жидкой и твердой фазах. Содержимое ячеек поля может принимать действительные непрерывные значения.

Суть клеточно-автоматных взаимодействий заключается в модификации непрерывных значений соответствующих слоев клеток согласно следующей системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T^i = T^i + (T_{cp} - T^i) A_{cp} / M_{max}; \\ C^i = C^i + (C_{cp} - C^i) D_{cp} / M_{max}; \\ \text{если } (T^i > T_{пл}^i) \text{ и } (H^i < H_{пл}), \text{ тогда: } \{ H^i = H^i + \Delta H^i; T^i = T_{пл}^i \}; \\ \text{если } (H^i > H_{пл}), \text{ тогда: } \{ T^i = T_{пл}^i + (H^i - H_{пл}) / q_L^i; H^i = H_{пл} \}; \\ \text{если } (T^i < T_{пл}^i) \text{ и } (H^i > 0), \text{ тогда: } \{ H^i = H^i + \Delta H^i; T^i = T_{пл}^i \}; \\ \text{если } (H^i < 0), \text{ тогда: } \{ T^i = T_{пл}^i + H^i / q_S^i; H^i = 0 \}; \end{array} \right. \quad (1)$$

$$T_{cp} = \frac{w^1 T^1 + w^2 T^2}{w^1 + w^2}; \quad w^i = \rho_L^i q_L^i \frac{H^i}{H_{пл}} + \rho_S^i q_S^i \left( 1 - \frac{H^i}{H_{пл}} \right);$$

$$C_{cp} = C_L \frac{H^i}{H_{пл}} + C_S \left( 1 - \frac{H^i}{H_{пл}} \right); \quad C_L = \frac{C}{\Omega_L + K_0 \Omega_S}; \quad C_S = K_0 C_L;$$

$$\Omega_L = \frac{H^1 + H^2}{H_{пл}}; \quad \Omega_S = 2 - \Omega_L; \quad C = C^1 + C^2;$$

$$A_{cp} = \frac{A^1 + A^2}{2}; \quad A^i = \frac{\eta_L^i}{\rho_L^i q_L^i} \frac{H^i}{H_{пл}} + \frac{\eta_S^i}{\rho_S^i q_S^i} \left( 1 - \frac{H^i}{H_{пл}} \right);$$

$$D_{cp} = \frac{D^1 + D^2}{2}; \quad D^i = D_L^i \frac{H^i}{H_{пл}} + D_S^i \left( 1 - \frac{H^i}{H_{пл}} \right);$$

$$T_{пл}^i = T_L(C^i) \frac{H^i}{H_{пл}} + T_S(C^i) \left( 1 - \frac{H^i}{H_{пл}} \right);$$

$$T_S(C) = T_{пл}(0) + tg(\alpha)C;$$

$$T_L(C) = T_{пл}(0) + tg(\alpha)CK_0; \quad \Delta H^i = H_{пл} \frac{\Delta T^i}{\Delta T_{пл}^i};$$

$$\Delta T^i = T^i - T_{пл}^i; \quad \Delta T_{пл}^i = \frac{H_{пл}}{q_{cp}^i} + T_L(C^i) - T_S(C^i); \quad q_{cp}^i = \frac{q_L^i + q_S^i}{2}.$$

Здесь  $T$  – температура, штрихом отмечены значения в следующий момент времени,  $i = 1, 2$  – значение индекса, соответствует выбранной и соседней клетке соответственно,  $A$  – коэффициент температуропроводности;  $M_{max}$  – некоторый параметр (см. (2)),  $C$  – концентрация примеси,  $D$  – коэффициент диффузии примеси,  $H_{пл}$  – скрытая теплота плавления,  $q$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – удельная плотность,  $\eta$  – коэффициент теплопроводности. При этом нижними индексами  $S$  и  $L$  обозначены соответствующие параметры для твердой и жидкой фаз. Также:  $K_0$  – равновесный коэффициент сегрегации примеси,  $T_{пл}(0)$  – температура плавления при нулевой концентрации примеси,  $tg(\alpha)$  – тангенс угла наклона концентрационной зависимости температуры плавления. Основная идея при моделировании явления сегрегации, в нашем случае, заключается в привязке концентрации примесей твердой и жидкой фаз к соответствующему отношению внутренней теплоты и скрытой теплоты плавления. Схематически это можно проиллюстрировать с помощью рис. 1.

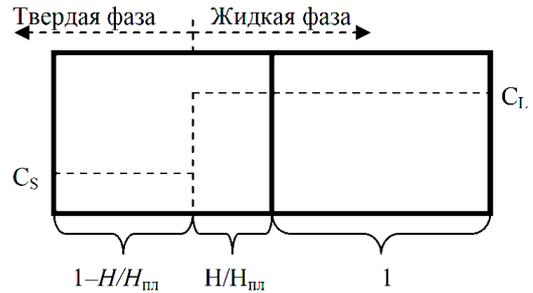


Рис. 1. Схематическое изображение процесса определения концентрации примеси в клетке, находящейся в состоянии плавления или кристаллизации при взаимодействии с соседней клеткой

Как было показано в [6], модельное время одной клеточно-автоматной взаимодействия зависит от размерности поля и максимального коэффициента температуропроводности. Но в нашем случае добавляется еще механизм диффузии примеси, поэтому в выражениях для определения времени одного взаимодействия следует выбирать некоторый параметр:

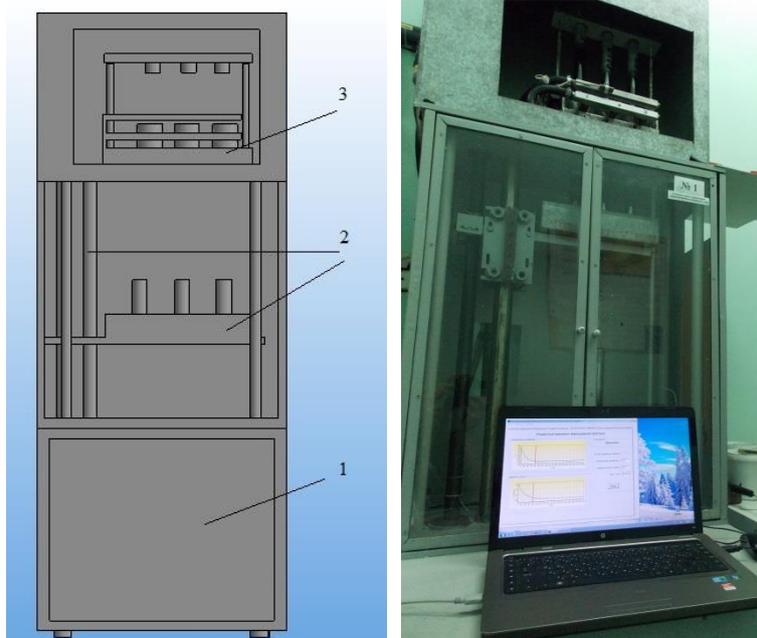
$$M_{max} = \begin{cases} A_{max}, & \text{если } A_{max} > D_{max} \\ D_{max}, & \text{если } D_{max} > A_{max} \end{cases}, \quad (2)$$

который также входит в систему уравнений (1).

В работе [6] была подтверждена адекватность использования клеточно-автоматного метода моделирования процесса зонной плавки.

### Реализация автоматизации процесса управления

Поставленная задача применения разработанной модели на практике была сведена к выявлению закона управления параметрами процесса. В результате аппроксимации оптимального закона управления, обна-



**Рис. 2. Схема и внешний вид установки выращивания:**  
**1 – силовой блок; 2 – механизм перемещения; 3 – блок нагревателей и холодильников**

руженного в процессе итерационных вычислительных экспериментов над клеточно-автоматной моделью процесса, было получено приемлемую стратегию управления температурой нагревателей и скоростью движения ампул. Наиболее подходящей зависимостью для аппроксимации оказалась экспоненциальная зависимость (3):

$$\begin{aligned} T(x) &= T_n + k \cdot e^{-ax}; \\ V(x) &= V_n + m \cdot e^{-bx}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $T(x)$  – температура нагревателя в точке вдоль слитка с координатой  $x$ ;  $T_n$  – номинальная температура нагревателя;  $k$ ,  $a$  – коэффициенты пропорциональности;  $V(x)$  – скорость движения ампул в точке вдоль слитка с координатой  $x$ ;  $V_n$  – номинальная скорость движения ампул;  $m$ ,  $b$  – коэффициенты пропорциональности.

На каждом шаге итерации модифицировались функциональные зависимости параметров выращивания, проводилось моделирование, результаты которого оценивались с точки зрения приближения к оптимальным.

Полученные таким образом функциональные зависимости параметров выращивания используются в разработанной системе для управления в автоматическом режиме температурой и скоростью движения ампул в реальном процессе.

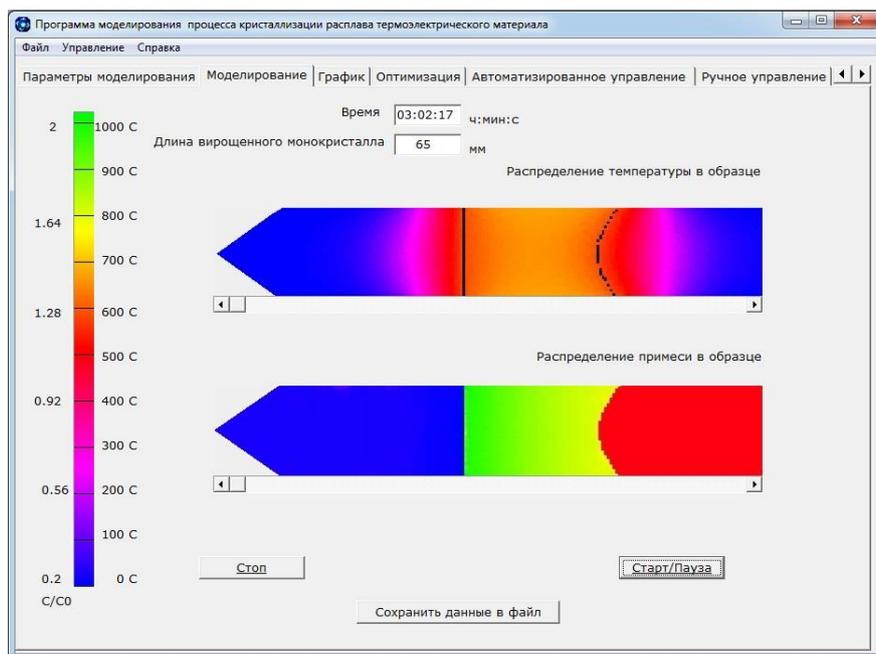
Для апробации на практике модели, построенной с помощью клеточных автоматов, подходит установка, схематически изображена на рис. 2 (слева), которая состоит из силового блока 1, механизма перемещения 2, блока нагревателей и холодильников 3. Ее внешний вид во время автоматизированного управления процессом выращивания термоэлектрического материала представлен в правой части рис. 2.

Предложенная установка, как объект управления, имеет две управляемые величины (температура нагревателей и скорость перемещения слитка) и соответствующее

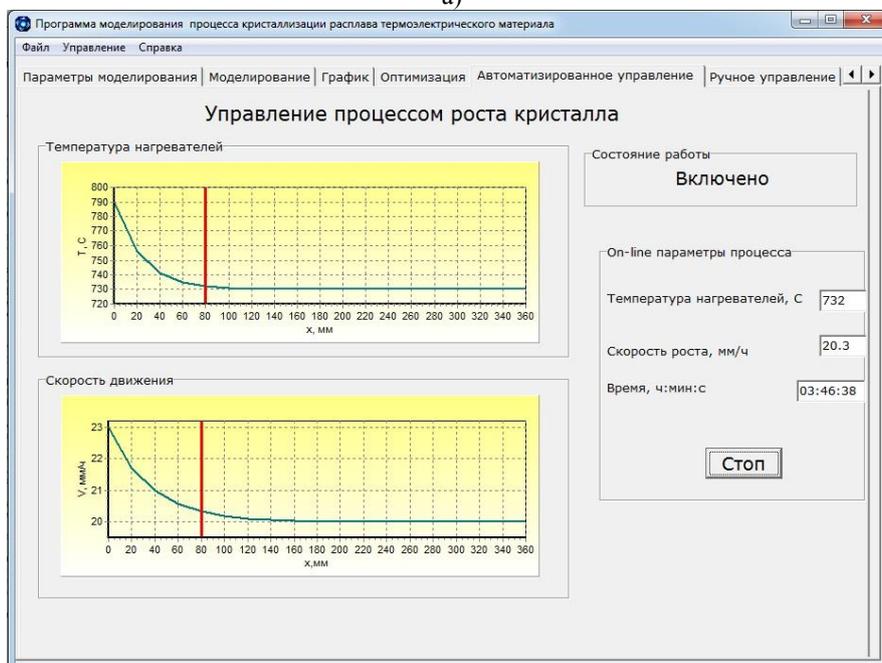
число управляющих воздействий. Как говорилось ранее, величина воздействия предполагается переменной и является функцией времени или координаты вдоль слитка.

Даная установка применяется для выращивания полупроводниковых материалов на основе теллурида висмута. Принцип работы установки заключается в использовании метода вертикальной зонной плавки. При использовании этого метода по длинному слитку твердого материала, помещенного в герметичную кварцевую ампулу, медленно перемещают узкую зону расплава, в результате чего происходит рекристаллизация слитка и перераспределение растворенных в нем примесей. В данной установке методом зонной плавки может осуществляться одновременное выращивание нескольких слитков. Запаянные кварцевые ампулы с материалом, предварительно прошедшим процесс синтеза, расположены вертикально. В процессе выращивания они перемещаются снизу вверх относительно нагревателя. Для получения более четкого фронта кристаллизации на границе раздела твердой и жидкой фаз создается градиент температур в 150-200 К/см за счет оснащения сверху и снизу нагревателей охлаждающими элементами. Система охлаждения представляет собой цилиндрические холодильники, по которым циркулирует вода температурой 21-27 °С. Возможность изменения температур системы нагревателей и скорости выращивания позволяет получить материал высокого качества с необходимыми свойствами. Эти параметры установки модифицируются для решения каждой конкретной задачи. Регулирование температуры каждого из нагревателей производится независимо, что является необходимым условием при одномоментной работе с несколькими материалами.

Моделирование процесса выращивания полупроводникового материала осуществлялось на основе системы уравнений (1) методом асинхронных клеточных



а)



б)

**Рис. 3. Интерфейс программы управления процессом вертикальной зонной плавки: а – вкладка моделирования процесса, б – вкладка автоматизированного управления процессом**

автоматов. Интерфейс программы, реализованной средствами среды Borland C++ Builder, представлен на рис. 3. Вкладка «Моделирование» (рис 3, а) демонстрирует весь ход процесса моделирования зонной плавки. В верхней части визуализировано распределение температуры в образце, а снизу – распределение примеси. Автоматическое управление установкой выращивания полупроводниковых материалов осуществляется через USB-порт рабочего компьютера. Процесс управления показан на рис. 3, б. Здесь справа наглядно представлена зависимость температуры нагревателей (верхний график) и скорости перемещения (нижний график) от координаты вдоль слитка. Красный бегунок показывает текущее состояние процесса, а слева отображены цифровые

значения основных параметров. Для изменения скорости перемещения нагревателей согласно заданной функции организовано управление шаговым двигателем (ШД), который преобразует электрические импульсы в дискретные механические перемещения. Главное свойство подобного двигателя в том, что угол поворота вала двигателя определяется количеством импульсов, поданных на вход. Преимуществом его использования является возможность точного задания перемещения или поворота определенных деталей с помощью электрических сигналов.

Существует множество различных схем по управлению подобными двигателями. В нашем же случае нужно было использовать максимально простую схему,

которая заставляла бы двигатель делать определенное количество шагов в зависимости от команд, поступающих с микроконтроллера (МК).

Такому двигателю необходимо напряжение питания 12 В. Для этого мы используем блок питания. Плата микроконтроллера питается от компьютера через обычный USB-кабель.

Кроме самого двигателя, источника питания для него и для микроконтроллера, нужна также схема драйвер – так как микроконтроллер не способен непосредственно управлять индуктивной нагрузкой вроде ШД. Мы использовали схему, которая требует минимум расчетов и обвязки, с элементарной разводкой на базе массива ключей Дарлингтона. Еще в схему была включена микросхема трансивер – она просто транслирует сигналы, поступающие на нее, с одной вывода на другой. Ее основная роль заключается в том, чтобы в случае скачка напряжения перегорела эта микросхема, а не микроконтроллер.

Двигатель является униполярным двухфазным. Он имеет 6 выводов – 4 входа и 2 общих провода. Общие провода подключаются к "+" источника питания (+ 12В). А программа для МК выдает управляющие сигналы в нужной последовательности и с необходимой частотой.

Двигатель будет перемещать ампулы с выращиваемым материалом вдоль нагревателей, температурой которых мы также должны управлять. Для измерения сигналов, полученных с помощью термопар, использовался специальный модуль, к которому можно подключить до 16 термопар. Встроенная в модуль аппаратная и программная фильтрация обеспечивает хорошую помехозащищенность. В модуле применен 24-разрядный сигма-дельта АЦП с усилителем на входе, что обеспечивает высокую точность измерения температуры.

Позиционный (релейный) способ управления нагревателями не подходит для данного процесса, из-за необходимости высокой точности регулирования температурного режима для обеспечения требуемых условий выращивания. Поэтому был выбран пропорциональный метод. Принцип регулирования мощности нагревателей данным способом заключается в анализе разницы текущей и установленной температур. Если она меньше 0, то греть не нужно, мощность устанавливается в 0, иначе мощность устанавливается пропорциональной этой разнице температур. В выбранном пропорциональном интегральном дифференциальном регуляторе температуры используются более сложные схемы автоматического управления, что позволяет устранить системную ошибку обычного пропорционального регулятора.

### Анализ исследования

Реализованная компьютерная система для моделирования, оптимизации и управления процессом зонного выращивания кристаллов была апробирована на участке выращивания термоэлектрического материала института термоэлектричества НАНУ, г. Черновцы, Украина. Результаты эксплуатации системы продемонстрировали ее практическую ценность, в частности, время при выращивании образцов *n*-типа теллурида висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) удалось уменьшить в среднем с 16 до 13 часов, то есть почти на 20%, а образцов *p*-типа, выращиваемых по

двунаправленному принципу, с 22 до 19 часов (почти на 15%). Средняя длина образцов составляла 350 мм, а диаметр 20 мм. При этом явление концентрационного переохлаждения не наблюдалось, поскольку в противном случае, выращенные слитки были бы хрупкими и непригодными ни к алмазной резке, ни к дальнейшему использованию в термоэлектрических элементах, работающих на эффекте Пельтье. Кроме того, отклонение фронта кристаллизации от плоской формы также не превышало допустимого диапазона, что подтверждалось измерениями радиального распределения удельной электропроводности и термо-ЭДС, которые существенно зависят от распределения состава материала. В то же время, процент выхода пригодного материала вдоль слитков почти не изменился. Как и раньше, примерно по 25 мм в начале и в конце слитков удалялись как бракованные.

Кроме уменьшения времени роста, описанная система позволила проводить ряд вычислительных экспериментов относительно новых составов материала и, тем самым, отказаться от использования «метода проб и ошибок». Так, например, при использовании в качестве добавки для легирования свинца, который не был задействован в производстве ранее, было получено слиток, распределение свинца в котором не отличается более чем на 5% от распределения, полученного в результате вычислительного эксперимента.

В целом можно считать, что использование предложенной в данной работе компьютерной системы для моделирования, оптимизации и управления процессом зонного выращивания кристаллов является экономически целесообразным, так как уменьшение времени выращивания и количества экспериментов ощутимо сокращает энергетические и материальные затраты, а следовательно, экономит финансовые и трудовые ресурсы.

### Выводы

Построение компьютерных моделей процессов получения материалов и проведение над ними ряда вычислительных оптимизационных экспериментов позволяет значительно сократить экономические затраты, неизбежные при поиске оптимальных параметров получения материалов на основе реальных экспериментов.

На основе описанной в данной работе модели клеточных автоматов была создана программа моделирования процесса зонной плавки. Представлена практическая реализация системы автоматического управления установкой выращивания. Управляющий блок выполняет регулирование скорости перемещения зоны плавления, а также обеспечивает поддержание заданной температуры нагревателей.

Техническим результатом разработки данной компьютерной системы является повышение надежности установки, улучшение точности регулирования температуры роста термоэлектрического материала, обеспечивающего повышение качества выращиваемых слитков.

Таким образом, используя предложенную программу моделирования и автоматизированного управления процессом зонной плавки можно определить оптимальные параметры слитков с минимумом разброса состава.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гоник М. М. Повышение точности управления температурным режимом в установках выращивания кристаллов / М. М. Гоник, В. И. Боевкин // Управление большими системами: сборник трудов. – 2010. – № 28. – С. 211–229.
2. Бородин А. В. Установка для выращивания монокристаллов сапфира методом Киргопулоса с устройством динамического взвешивания кристалла и автоматическим управлением с обратной связью / А. В. Бородин, В. А. Бородин, К. Н. Смирнов, Д. Б. Ширяев, Д. Н. Францев, М. В. Юдин // Научное приборостроение. – 2014. – том 24, № 3. – С. 92–98.
3. Саханский С. П. Управление процессом выращивания монокристаллов германия на основе контактного метода измерения : дис. докт. техн. наук : 05.13.06 / Саханский С. П. – Красноярск, 2009. – 246 с.
4. Winkler J. A Review of the Automation of the Czochralski Crystal Growth Process / J. Winkler, M. Neubert, J. Rudolph. // ACTA PHYSICA POLONICA A. – 2013. – Vol. 124. №2, – P. 181–192.
5. Табултаев С. С. Модели процессов выращивания оптических кристаллов для синтеза промышленных систем автоматического управления : дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / Табултаев Сайын Сейдинкожаевич – Ленинград, 1984. – 230 с.
6. Жихаревич В. В. Побудова моделі процесу вирощування монокристалів за допомогою методу асинхронних клітинних автоматів для проведення оптимізаційних обчислювальних експериментів / В. В. Жихаревич., Л. М. Шумиляк // Міжнародна науково-практична конференція ПІКТ – 2014. – Чернівці. – С. 114–116.
7. Kinzel W. Phase transitions of cellular automata / W. Kinzel. // Zeitschrift für Physik B Condensed Matter. – 1985. – Vol. 58, Is. 3. – P. 229–244.
8. Бобков С. Использование систем клеточных автоматов для моделирования нелинейных задач теплопроводности / С. Бобков, Ю. Войтко. // Химия и химическое машиностроение. – 2009. – №11, т. 52. – С. 126–128.
9. Vannozzi C. Cellular Automata Model of Phase Transition in Binary Mixtures / C. Vannozzi, D. Fiorentino, M. D'Amore etc. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2006. – №45. – P. 2892–2896.
10. Лиманова Н. Моделирование процессов теплообмена / Н. Лиманова, Е. Мамзин, С. Матвеев. // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – №19. т. 3 – С. 265–269.
11. Жихаревич В. В. Система пошуку оптимальних параметрів керування вирощуванням легованих матеріалів на основі клітинно-автоматної моделі процесу / В. В. Жихаревич, Л. М. Шумиляк // Міжнародна наукова конференція MicroCAD : – Інформаційні технології та математичні методи. – 2014. – Харків. – Секція № 24. – С. 237.

## AUTOMATION OF CONTROL OF THE VERTICAL ZONE MELTING CRYSTAL GROWTH PROCESS

V.V. Zhikharevich<sup>1</sup>, L.M. Shumylyak<sup>2</sup>, S.E. Ostapov<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup>Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

**Abstract.** A computer system to automate the process of thermoelectric material growing is proposed. Presented mathematical model based on cellular automata was used to create a programs for simulation and managing of the thermoelectric material solidification during vertical zone melting. Apparatus for growing specifications and implementation of automating the control process are described. Created computer system has a user friendly interface and is designed not only to facilitate work of the person in the workplace, but also increase the quality of the grown material by increasing the regulation accuracy and compliance with required process parameters.

**Keywords:** modeling, management, ccellular automata, semiconductor, apparatus for growing.

## REFERENCES

1. Gonik M. M., Boevkin V. I. Increasing the control accuracy of temperature condition in crystal growth plant [Povyshenie tochnosti upravleniya temperaturnym rezhimom v ustanovkah vyrashhivaniya kristallov], *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov. [Managing Large Systems: Proceedings]*, 2010, no. 28, pp. 211–229.
2. Borodin A. V., Borodin V. A., Smirnov K. N., Shirjaev D. B., Francev D. N., Judin M. V. Apparatus for growing sapphire single crystals by kyropoulos method with dynamic weighing device and automatic feedback control [Ustanovka dlja vyrashhivaniya monokristallov sapfira metodom Kirpoulosa s ustrojstvom dinamicheskogo vzveshivaniya kristalla i avtomaticheskim upravleniem c obratnoj svjaz'ju], *Nauchnoe priborostroenie [Scientific Instrument]*, 2014, no. 24(3), pp. 92–98.
3. Sahanskij S. P. *Upravlenie processom vyrashhivaniya monokristallov germanija na osnove kontaktnogo metoda izmerenija: dis. dokt. tehn. nauk: 05.13.06* [Germanium-based contact measurement method of growing single crystals process management: PhD thesis: 05.13.07], Krasnojarsk, 2009, 246 p.
4. Winkler J. A Review of the Automation of the Czochralski Crystal Growth Process / J. Winkler, M. Neubert, J. Rudolph. // *Acta Physica Polonica A*, 2013, no. 2(124), pp. 181–192.

5. Tabultaev S. S. *Modeli processov vyrashhivaniya opticheskikh kristallov dlja sinteza promyshlennykh sistem avtomaticheskogo upravleniya: dis. kand. tehn. nauk: 05.13.07* [Models of optical crystals growing process for the synthesis of automatic control industrial systems], Leningrad, 1984, 230 p.
6. Zhikharevich V. V., Shumylyak L. M. Building of the crystal growth process model using asynchronous cellular automata method for computational experiments optimization [Pobudova modeli procesu vyroshhivannja monokristaliv za dopomoguju metodu asinhronnykh klitynykh avtomatov dlja provedennja optymizacijnykh obchysljuval'nykh eksperimentiv], *Mizhnarodna nauko-vo-praktychna konferencija PIKT – 2014 [Proc. International Scientific Conference PICT – 2014]*, Chernivtsi, 2014, pp. 114-116.
7. Kinzel W. Phase transitions of cellular automata, *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, 1985, no. 58(3), pp. 229-244.
8. Bobkov S. , Vojtko Ju. The use of cellular automata systems for modeling the nonlinear heat conduction problems [Ispol'zovanie system kletochnykh avtomatov dlja modelirovaniya nelinejnykh zadach teploprovodnosti], *Himija i himiche skoe mashinostroenie [Chemistry and chemical technology]*, 2009, no.11(52), pp. 126-128.
9. Vannozi C., Fiorentino D., D'Amore M. etc. Cellular Automata Model of Phase Transition in Binary Mixtures, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, no. 45, pp. 2892-2896.
10. Limanova N., Mamzin E., Matveev S. Modelling of heat transfer processes [Modelirovanie processov teploobmena], *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University]*, 2009, no. 19(3) pp. 265–269.
11. Zhikharevich V. V., Shumylyak L. M. Optimal parameters cultivation alloy materials control search engine based on cell-automaton model of process [Sistema poshuku optymial'nykh parametriv keruvannja vyroshhivannjam legovanykh materialiv na osnovi klitynno-avtomatnoji modeli procesu], *Proc. “MicroCAD”*, Kharkiv, 2014, no. 24, pp. 237.

## ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ Г-ОБРАЗНОГО ФИЛЬТРА В ЗВЕНЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА ПОТРЕБЛЯЕМЫЙ ИЗ СЕТИ ТОК

М.Ю. Пустоветов, А.В. Чубукин

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия

mgsn2006@rambler.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается влияние индуктивности Г-образного фильтра в звене постоянного напряжения трехфазного преобразователя частоты, состоящего из входного диодного выпрямителя, выполненного по мостовой схеме, и двухуровневого автономного инвертора напряжения, на мгновенные значения и гармонический состав тока, потребляемого фазой преобразователя из сети. Предложены эмпирические выражения для приближенного определения емкости и индуктивности звена постоянного напряжения преобразователя частоты в зависимости от мощности питаемого двигателя переменного тока. Результаты математического моделирования подтверждают положительное влияние индуктивности звена постоянного напряжения на ограничение мгновенных значений потребляемого из сети тока и его гармонический состав.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты; звено постоянного напряжения; емкость; индуктивность; ток.

### Актуальность работы

Иногда приходится наблюдать на электротехнических форумах в сети *Internet* обсуждение вопросов, связанных с конструкцией преобразователей частоты (ПЧ). В частности, высказываются неоднозначные суждения по поводу необходимости наличия в составе звена постоянного напряжения дросселя. Ряд изготовителей ПЧ вполне внятно разъясняет в документации и рекламных технических материалах назначение и влияние на работу ПЧ тех или иных его комплектующих или внешних подключаемых устройств. Тем не менее, человеку, решившему сконструировать ПЧ или хотя бы провести математическое моделирование его работы, бывает нелегко определиться со значениями параметров составляющих элементов. Целью настоящей работы является предложить читателям обоснованные данные для выбора в первом приближении параметров звена постоянного напряжения ПЧ, питаемого от трехфазной сети с линейным напряжением 380 В и частотой 50 Гц. В свою очередь, ПЧ питает трехфазный двигатель переменного тока, рассчитанный на линейное напряжение 380 В. Также рассматривается влияние индуктивности Г-образного фильтра в звене постоянного напряжения ПЧ на потребляемый из сети ток. Это важно не только с точки зрения влияния ПЧ на сеть, но и для правильного выбора диодов входного выпрямителя ПЧ.

### Основные проблемы и решения

ПЧ в настоящее время является массово используемым устройством в системах автоматизации различных технологических процессов. Наиболее часто встречаются ПЧ с явно выраженным звеном постоянного напряжения, имеющие в своем составе диодный выпрямитель, выполненный по 6-пульсной мостовой схеме; Г-образный фильтр нижних частот, имеющий в продольной ветви индуктивность  $L_d$ , а в поперечной – емкость  $C_d$ ; транзисторный автономный инвертор

напряжения (АИН), выполненный по мостовой схеме [1, 2] (см. рис. 1).

Случается, что к авторам обращаются сотрудники предприятий, эксплуатирующих электроприводы переменного тока с ПЧ, с просьбами провести математическое моделирование на ЭВМ того или иного процесса, режима работы оборудования. При этом далеко не всегда имеются достаточные данные о параметрах устройств, подлежащих моделированию. Например, ставится задача смоделировать ток, потребляемый ПЧ от источника питающего напряжения (трехфазной сети) в процессе первоначального заряда емкости  $C_d$ , который начинается с заряда через зарядное сопротивление  $R$ , шунтируемое спустя некоторое время, достаточное для достижения напряжением на конденсаторе значения, близкого к номинальному, контактом  $K$ , через который происходит дозаряд  $C_d$ , по окончании которого начинают подачу напряжения питания с АИН на нагрузку (см. рис. 1). При этом известна мощность двигателя, питаемого от ПЧ, но нет данных о величине  $C_d$  и  $L_d$ . Конечно, в такой ситуации невозможно предоставить заказчику вполне достоверные результаты моделирования, но, зная ориентировочные значения  $C_d$  и  $L_d$ , можно получить приближенные результаты, не противоречащие физике процессов и здравому смыслу.

Существуют публикации по вопросам выбора значения  $C_d$  [2 – 4]. Но зачастую их авторы руководствуются взаимоисключающими целевыми установками: одному нужно минимизировать емкость с целью снижения массогабаритных показателей, другому требуется, чтобы  $C_d$  могла принять всю энергию торможения двигателя, для чего нужна ее большая величина. Кроме того, конденсаторы могут быть изготовлены из различных материалов, что существенно влияет на их емкости [5, 6]. Известен ряд формул для расчета  $C_d$  [3]. Важной отправной точкой для расчетов

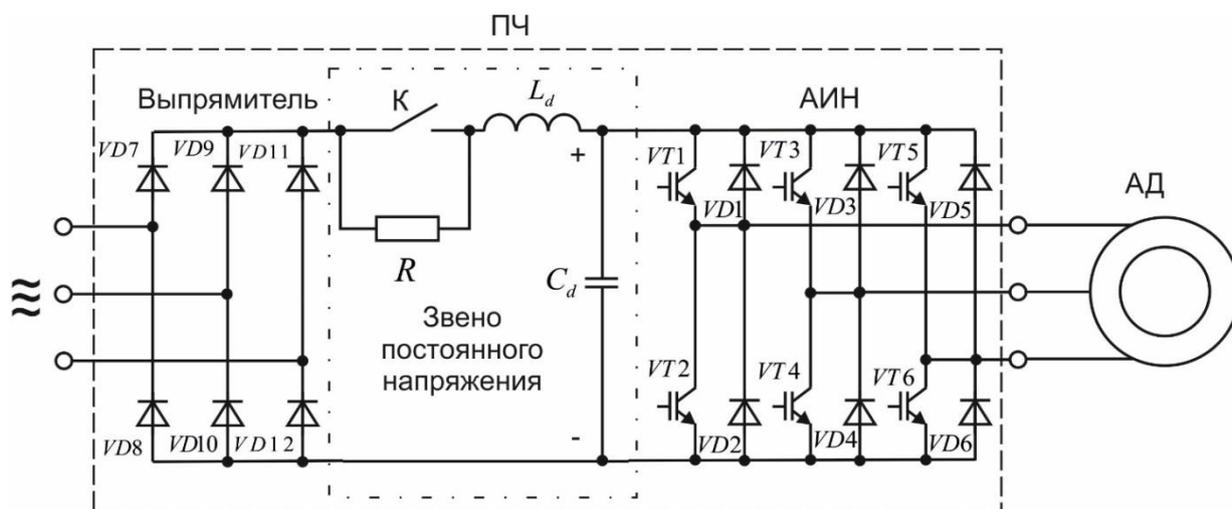


Рис. 1. Схема силовой части ПЧ

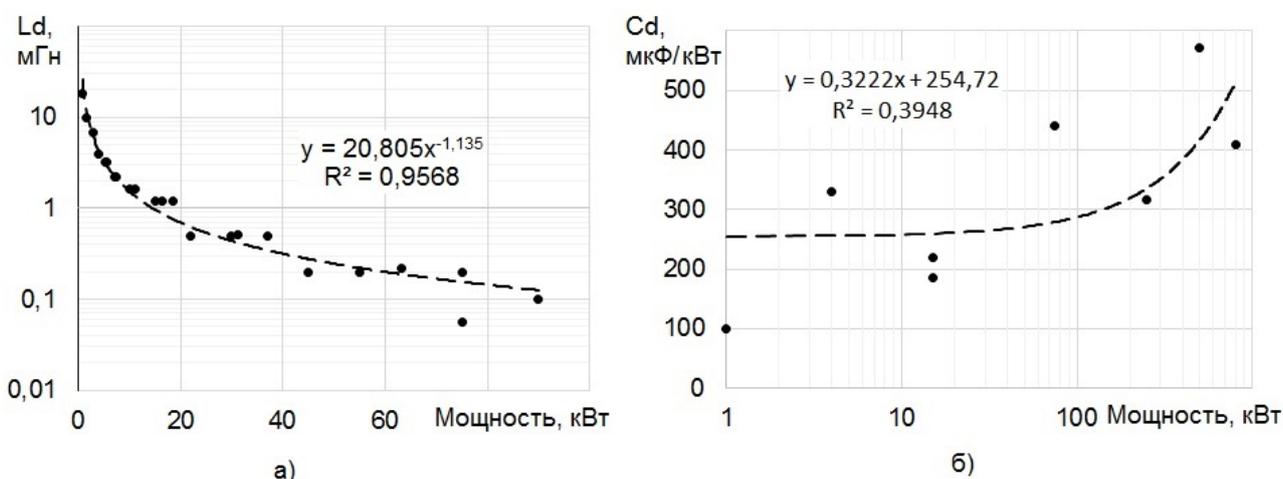


Рис. 2. Приближенные зависимости параметров звена постоянного напряжения ПЧ от мощности питаемого двигателя переменного тока: а) значение  $L_d$ ; б) удельное значение  $C_d$

является допустимая величина пульсаций постоянного напряжения на емкости. Считается, что приемлемой величиной пульсаций напряжения являются 1..2 % [3, 4, 6]. Связь токов и напряжений выпрямителя и АИН в составе ПЧ описана, например, в [7].

Тем не менее, в первом приближении для выбора  $C_d$  и  $L_d$  удобно было бы иметь простые математические выражения, увязывающие их значения, например, с мощностью двигателя, кВт, питаемого от ПЧ. Получить такие выражения можно, опираясь на известные данные о параметрах звена постоянного напряжения конкретных ПЧ. Авторы предприняли попытку обобщения некоторого количества известных им из практики, а также из публикаций [8, 9] данных. Результаты представлены на рис 2. В виде значений  $L_d$ , мГн и удельных значений  $C_d$ , мкФ/кВт.

Согласно рис. 2 б) среднее арифметическое удельное значение  $C_d$  составляет 322 мкФ/кВт. На рис. 2 приведены уравнения линий трендов (пунктирных линий), являющихся искомыми математическими выражениями, а также величина достоверности аппроксимации линией тренда заданных удельных значений

параметров (точки-маркеры)  $R^2$  - коэффициент детерминации, говорящий о том, в какой мере данный тренд объясняет расположение исходных точек.

Дальнейшие результаты получены для случая моделирования включения ПЧ при отсутствии начального заряда на  $C_d$  и частотного пуска асинхронного двигателя (АД) номинальной мощностью 1,5 кВт с нагрузкой на валу типа вентилятора. В качестве математической модели АД использована опубликованная в [10], ее реализация на ЭВМ описана в [11]. Способ моделирования АИН описан в [12], используются идеализированные ключи, управляемые напряжением.

Характеристики и параметры АД типа АЭВ 80 В2У2 даны в табл. 1.

В табл. 2 даны характеристики и параметры Г-образного фильтра ПЧ и узла заряда конденсатора, принятые при моделировании.

Моделирование проводилось для двух случаев: когда  $L_d$  имеется в составе фильтра звена постоянного напряжения ПЧ и когда отсутствует. Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ от сети, сведены в таблицу 3. На рис. 3 показан вид результатов

Таблица 1

## Характеристики и параметры АД типа АЭВ 80 В2У2, использованные при моделировании

Наименование характеристики или параметра АД	Размерность	Значение
Номинальная мощность	кВт	1,5
Номинальная частота вращения	об/мин	2909
Номинальное линейное напряжение	В	380
Номинальная частота напряжения питания	Гц	50
Активное сопротивление фазы обмотки статора при температуре 75 °С	Ом	5,63
Приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора при температуре 75 °С	Ом	2,18
Индуктивность рассеяния фазы обмотки статора	Гн	0,0112
Приведенная индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора	Гн	0,00703
Главная индуктивность	Гн	0,3119
Активное сопротивление в ветви намагничивания (включено параллельно главной индуктивности)	Ом	996,6
Приведенный к валу АД момент инерции (с учетом механизма)	кг·м <sup>2</sup>	36,6·10 <sup>-4</sup>

Таблица 2

## Характеристики и параметры ПЧ, использованные при моделировании

Наименование характеристики или параметра ПЧ	Размерность	Значение
Емкость Г-образного фильтра	мкФ	400
Индуктивность Г-образного фильтра (при наличии)	мГн	10
Зарядное сопротивление	Ом	10
Задержка начала замыкания контакта, шунтирующего зарядное сопротивление, от момента времени подачи напряжения на ПЧ	с	0,01
Длительность замыкания контакта, шунтирующего зарядное сопротивление	мкс	1
Сопротивление шунтирующего контакта в разомкнутом состоянии	МОм	1
Сопротивление шунтирующего контакта в замкнутом состоянии	Ом	0,001
Номинальное линейное напряжение питающей сети	В	380
Номинальная частота напряжения питающей сети	Гц	50

Таблица 3

## Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ от сети

Наименование характеристики	Размерность	Значение	
		с $L_d$	без $L_d$
Мгновенный максимальный ток при заряде $C_d$ через зарядное сопротивление	А	39,131	46,457
Мгновенный максимальный ток при дозаряде $C_d$ через контакт, шунтирующий зарядное сопротивление	А	-10,231	-134,207
Мгновенный максимальный ток в процессе частотного разгона АД	А	-12,758	49,775
Амплитуда тока в установившемся режиме по окончании разгона АД	А	7,348	44,089
Амплитуда 1-й гармоники тока в установившемся режиме по окончании разгона АД	А	5,927	5,913
$THD$ тока в установившемся режиме по окончании разгона АД (учтены гармоники с частотами до 2000 Гц)	%	7,340	13,056

моделирования при наличии  $L_d$  от включения питания ПЧ до выхода АД на установившийся режим работы при частоте выходного напряжения АИН 50 Гц. На рис. 4 приведен начальный фрагмент переходного процесса из рис. 3. Рис. 5 показывает равный по времени начальный фрагмент переходного процесса, но при отсутствии  $L_d$ .

На рисунках изображены графики: 1 – ток, потребляемый фазой ПЧ из сети, А; 2 – напряжение звена постоянного напряжения ПЧ (уменьшено в 20 раз), В; 3 – частота выходного напряжения АИН (изменено в 0,6 раза), Гц; 4 – частота вращения ротора АД (уменьшено в 100 раз), об/мин.

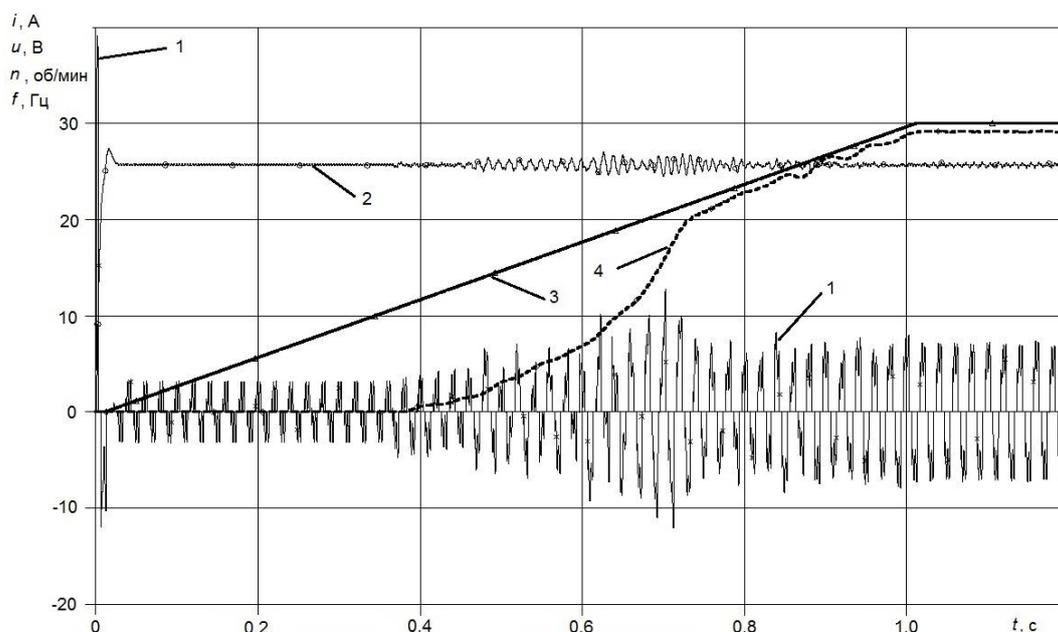


Рис. 3. Результаты моделирования при наличии  $L_d$  от включения питания ПЧ до выхода АД на установившийся режим работы при частоте выходного напряжения АИН 50 Гц

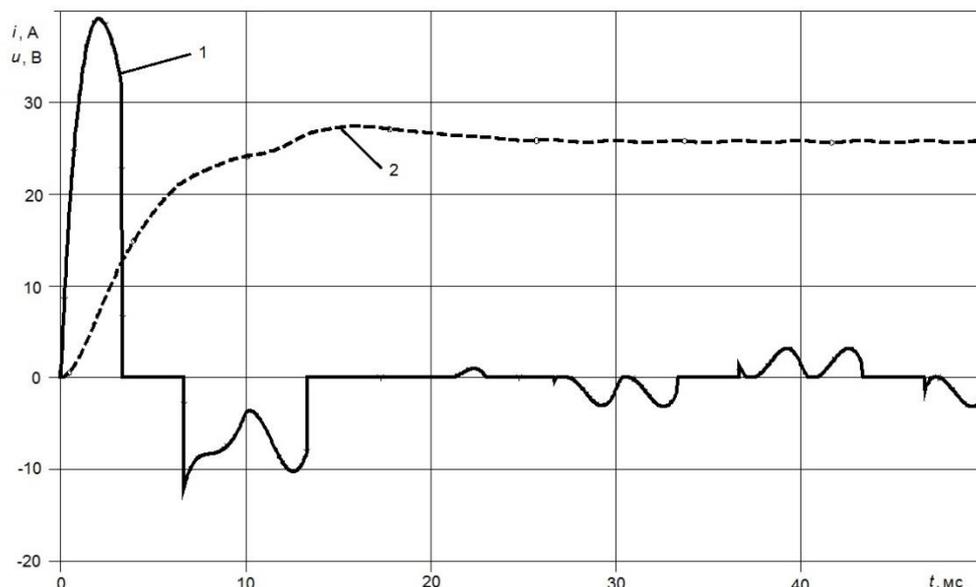


Рис. 4. Результаты моделирования при наличии  $L_d$ . Начальный участок процесса включения ПЧ, изображенного на рис. 2

На рис. 6 и 7 показана полученная в результате моделирования форма тока, потребляемого фазой ПЧ из сети, соответственно при наличии и отсутствии  $L_d$ .

### Выводы

Как показали результаты проведенного математического моделирования, максимальное мгновенное значение тока фазы, потребляемое ПЧ из сети, наблюдается в процессе заряда емкости звена постоянного напряжения. В процессе разгона и работы АД в установившемся режиме не наблюдались значения тока, потребляемого ПЧ из сети, превышавшие бы пик при заряде  $C_d$ . Конечно, ток заряда зависит от величины

активного сопротивления, включенного в зарядной цепи конденсатора. Увеличив это сопротивление, можно уменьшить пик тока. Но при этом может неоправданно затянуться процесс включения ПЧ.

Наличие индуктивности  $L_d$  в составе Г-образного фильтра звена постоянного напряжения ПЧ следует признать, если не обязательным, то весьма полезным и желательным, поскольку она оказывает сильное ограничивающее действие на пиковые и амплитудные значения тока, потребляемого ПЧ из сети. Также наличие  $L_d$  благотворно влияет на гармонический состав потребляемого из сети тока, улучшая электромагнитную совместимость ПЧ.

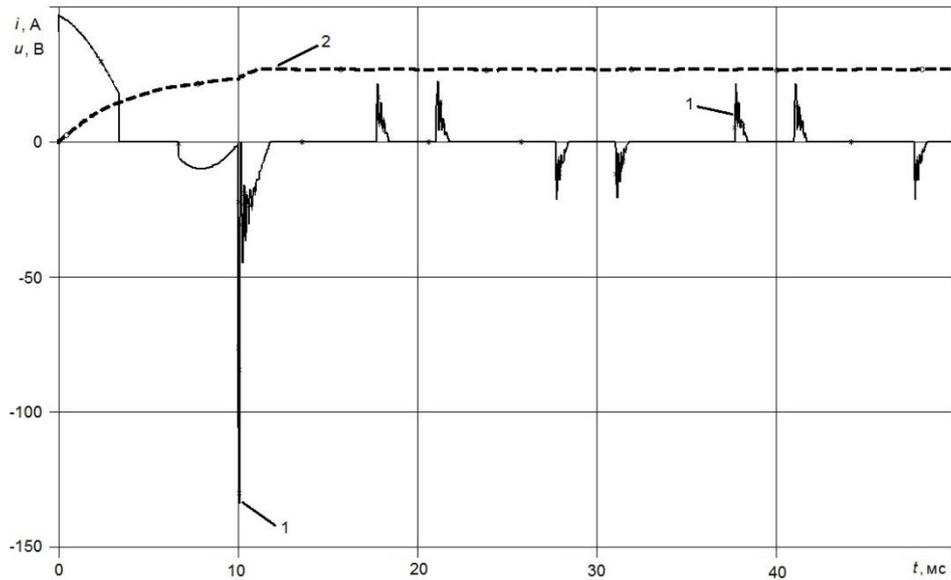


Рис. 5. Результаты моделирования при отсутствии  $L_d$ . Начальный участок процесса включения ПЧ

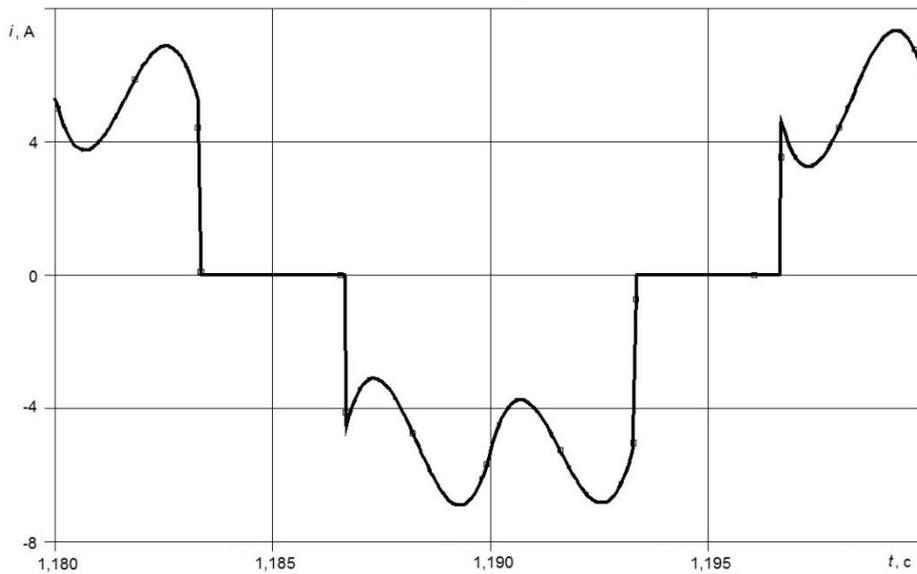


Рис. 6. Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ из сети в установившемся режиме по окончании разгона АД при наличии  $L_d$

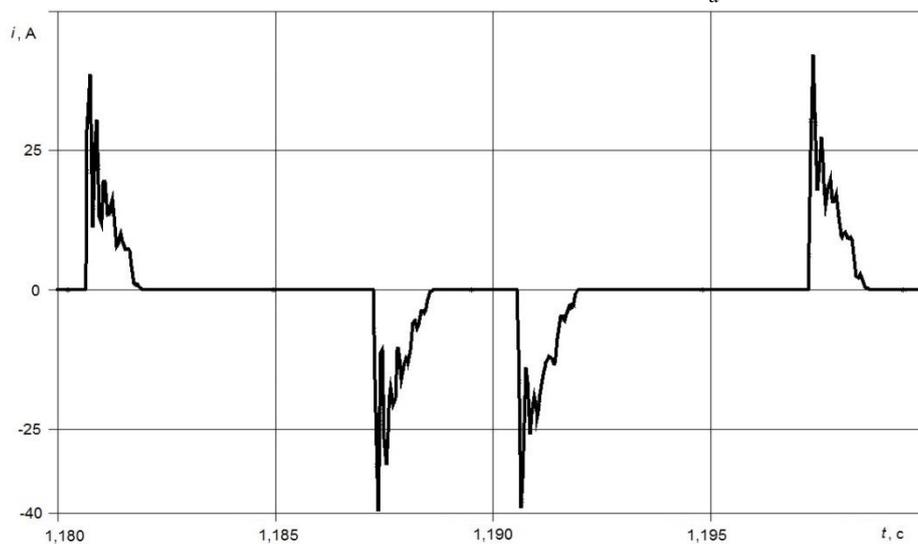


Рис. 7. Результаты моделирования тока, потребляемого фазой ПЧ из сети в установившемся режиме по окончании разгона АД при отсутствии  $L_d$

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Москаленко В.В. Системы автоматизированного управления электропривода: Учебник. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 208 с.
2. Микитченко А.Я. Выбор емкости силовых конденсаторов в двухзвенных преобразователях частоты с рекуперацией / А.Я. Микитченко, М.В. Могучёв, А.Н. Шевченко // *Электричество*. – 2008. – №6. – С. 63–66.
3. Новожилов Н.Г. Сравнительный расчет емкости конденсатора звена постоянного тока частотного преобразователя / Н.Г. Новожилов // *Современная наука и практика*. – 2015. – №1 (1). – С. 20–24.
4. Колесниченко Д.А. Выбор емкости конденсатора преобразователя частоты для асинхронного электропривода / Д.А. Колесниченко // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2012. – №20. – С. 67–71.
5. Колпаков А. Инверторная платформа SEMIKUBE – вопросы выбора / А. Колпаков // *Силовая электроника*. – 2009. – №1. – С. 14–19.
6. Salcone M. Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications / M. Salcone, J. Bond // *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International, 3-6 May 2009*. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075431
7. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. / – М. : Транспорт, 1999. – 464 с.
8. Преобразователи частоты транзисторные мощностью от 5,5 до 315 кВт. Руководство по эксплуатации РДЦБ.435321.001 РЭ версия 5.5 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://etx-in.ru/files/ETX-IN-FCseries04-5.5-315kW-user-manual\\_v5.5\\_web.pdf](http://etx-in.ru/files/ETX-IN-FCseries04-5.5-315kW-user-manual_v5.5_web.pdf)
9. Преобразователи частоты Altivar 71 для трехфазных асинхронных двигателей мощностью от 0,37 до 500 кВт. Каталог 07 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.is-com.ru/files/katalog\\_atv71.pdf](http://www.is-com.ru/files/katalog_atv71.pdf)
10. Pustovetov M. Yu. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes / M. Yu. Pustovetov // *IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, 2016)*. Date of Conference: 15-17 Nov. 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819069.
11. Пустоветов М.Ю. Подход к реализации на ЭВМ математической модели асинхронного двигателя, предназначенной для использования в качестве составной части моделей электротехнических комплексов и систем / М.Ю. Пустоветов // *Моделирование. Теория, методы и средства: материалы 16-ой Междунар. науч.-практ. конф., посв. 110-летию Южно-Рос. гос. политехнич. ун-та (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, 6-7 дек. 2016 г.* / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2016. – С. 332 – 344.
12. Пустоветов М.Ю. Моделирование характеристик частотно-регулируемого электропривода с синус-фильтром / М.Ю. Пустоветов // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. – 2013. – №1. – С. 18-26.

---

## THE INFLUENCE OF THE INDUCTANCE OF L-FILTER IN THE DC LINK OF THE VVVF CONVERTER ON THE CONSUMPTION OF NETWORK CURRENT

M.Yu. Pustovetov, A.V. Chubukin

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

**Abstract.** This paper examines the influence of the inductance of L-filter in the DC link of three-phase frequency converter consisting of an input diode rectifier, manufactured by bridge circuit, and a two-level autonomous voltage inverter, to the instantaneous values and the harmonic composition of the current consumed by the phase of converter from the network. Proposed empirical expressions for an approximate determination of the capacitance and inductance of the DC link of the frequency converter as function of the power of AC motor fed. The simulation results confirm the positive influence of the inductance in the DC link to limit instantaneous values of consumed current and its harmonic composition.

**Keywords:** frequency converter; DC link; capacitance; inductance; current.

## REFERENCES

1. Moskalenko V.V. *Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya elektroprivoda: Textbook* [Automated control systems for electric drives], Moscow, INFRA-M, 2007, 208 p.
2. Mikitchenko A.Ya., Moguchev M.V., Shevchenko A.N. Selecting the capacitance of power capacitors in double-link frequency converters with recuperation [Vybor emkosti silovykh kondensatorov v dvukhzvennykh preobrazovatelyakh chastoty s rekuperatsiyey], *Elektrichestvo [Electrical Technology Russia]*, 2008, no. 6, pp. 63–66.
3. Novozhilov N.G. Comparative calculation of the capacitance of the capacitor of the frequency converter DC link [Sravnitel'nyy raschet emkosti kondensatora

- zvena postoyannogo toka chastotnogo preobrazovatelya], *Sovremennaya nauka i praktika [Modern science and practice]*, 2015, no. 1 (1), pp. 20–24.
4. Kolesnichenko D.A. The choice of the capacitance of the capacitor of the frequency converter for asynchronous electric drive [Vybor emkosti kondensatora preobrazovatelya chastoty dlya asinkhronnogo elektroprivoda], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical systems and complexes]*, 2012, no. 20, pp. 67–71.
  5. Kolpakov A. SEMIKUBE inverter platform – choice questions [Invertornaya platforma SEMIKUBE – voprosy vybora], *Silovaya elektronika [Power electronics]*, 2009, no. 1, pp. 14–19.
  6. Salcone M., Bond J. Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications // Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International, 3-6 May 2009. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075431
  7. Burkov A.T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli: Textbook* [Electronic equipment and converters], Moscow, Transport, 1999, 464 p.
  8. [http://etx-in.ru/files/ETX-IN-FCseries04-5.5-315kW-user-manual\\_v5.5\\_web.pdf](http://etx-in.ru/files/ETX-IN-FCseries04-5.5-315kW-user-manual_v5.5_web.pdf) (accessed 18.03.2017).
  9. [http://www.is-com.ru/files/katalog\\_atv71.pdf](http://www.is-com.ru/files/katalog_atv71.pdf) (accessed 18.03.2017).
  10. Pustovetov M. Yu. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Omsk, 2016). Date of Conference: 15-17 Nov. 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819069.
  11. Pustovetov M.Yu. Approach to implementation on a computer mathematical model of induction motor suitable for use as an integral part of models of electrotechnical complexes and systems [Podkhod k realizatsii na EVM matematicheskoy modeli asinkhronnogo dvigatelya, prednaznachennoy dlya ispol'zovaniya v kachestve sostavnoy chasti modeley elektrotekhnicheskikh kompleksov i system], Trudy “Modelirovanie. Teoriya, metody i sredstva”, Novocherkassk, 2016, pp. 332 – 344.
  12. Pustovetov M.Yu. Modeling the characteristics of VVVF-drive with a sine-wave filter [Modelirovanie kharakteristik chastotno-reguliruemogo elektroprivoda s sinus-fil'trom], *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh [Software of systems in the industrial and social fields]*, 2013, no. 1, pp. 18-26.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ SIMULINK РУЛЕВОЙ МАШИНЫ СУДНА С МАТЕМАТИЧЕСКИМ ОПИСАНИЕМ СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ ПО МОДЕЛИ ЖУКОВСКОГО

С.В. Стельмашук

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия  
rukdpvs@rambler.ru

**Аннотация.** В статье представлены материалы, используемые в расчётах гидродинамических усилий, оказываемых на перо руля судна, в диаграммах, реализованных блоками пакета Simulink. Результаты имитационного моделирования рулевой машины показали достаточную эффективность для решения задач моделирования более сложных систем как то рулевой привод или система «авторулевой».

**Ключевые слова:** рулевая машина, Simulink, судовой электропривод, моделирование.

Рулевые машины являются главным звеном в системах «Авторулевой», которые широко применяются на судах. Наиболее перспективными являются электромеханические (или секторные) рулевые машины, которые отличаются простой кинематикой механизмов [1]. В связи с этим, при проектировании систем «Авторулевой» для исследования динамических характеристик важным вопросом является моделирование нагрузки, оказываемой на перо руля при различных режимах работы системы. Для наиболее адекватного моделирования нагрузки необходимо учитывать все особенности движения судна и поворота руля.

При описании электромеханических систем, как правило, возмущающее воздействие со стороны механической части на электрическую часть системы ограничивается константным значением, что является далёким от адекватности моделирования. В практике моделирования электромеханических систем важно описывать взаимодействие модели электрической части с механической частью через уравнения сил воздействия, которые зависят от поведения механической части. В частности в статье рассматривается моделирование момента  $T_R$  на валу баллера рулевой машины судна в зависимости от таких параметров поведения судна, как скорости судна  $V_{sh}$ , осадки судна  $T_{sh}$  и текущего значения угла  $\beta$  перекадки руля.

Для расчёта момента  $T_R$  использовались источники литературы [2-4]. При моделировании сила гидродинамического давления  $F_R$  на руль определялась в соответствии с теорией крыла Н.Е. Жуковского (НЕЖ) [3, 5]. Теория НЕЖ с большой точностью определяет силы, возникающие при обтекании воздухом или водой крыла любого профиля и формы [6]. Поэтому модель нагрузки  $T_R(\beta, V_{sh}, T_{sh})$ , которая вычисляется в соответствии с теорией НЕЖ является наиболее адекватной.

Для моделирования рулевой машины взят судовой электродвигатель ДПМ-31. Данные двигателя и исходные данные для моделирования рулевой машины записываются в редакторе Editor среды MatLab:

```

%Исходные данные
Lsh=70;           %Длина судна
Bsh=12;           %Ширина судна
Tshmin=2.1; Tshmax=3; %Диапазон осадки судна
Dshmax=2000;     %Объёмное водоизмещение при максимальной осадке

```

```

kDT=Dshmax/Tshmax; %Коэффициент изменения объёмного водоизмещения
                    %при изменении осадки судна
Vshmax=7.2; Vshmin=2.62; %Диапазон скорости судна
hR=2.8;             %Высота руля
LR=1.25;           %Длина руля
SR=LR*hR;          %Площадь руля
lambdaR=hR/LR;     %Относительное удлинение
Dp=2;              %Диаметр винта
Sp=pi*Dp^2/4;      %Площадь диска винта
Lpr=0.7;           %Расстояние от диска руля до винта
delta=Dshmax/Lsh/Bsh/Tshmax; %Коэффициент полноты водоизмещения
g=9.81;            %Ускорение свободного падения
ro=1030;           %Плотность морской воды
v=1.14E-6;        %Коэффициент кинематической вязкости
%Параметры рулевой машины с двигателем ДПМ-31
Ua=220;            %Номинальное напряжение якоря
Ra=0.447;          %Сопротивление якоря
Ta=0.0098;         %Постоянная времени
Km=2.284;          %Постоянная двигателя
uR=2145;           %Передаточное число редукторов
JR=1.5*0.3;        %Момент инерции
%Входные воздействия рулевой машины
Vsh=Vshmax;        %Скорость судна
Tsh=Tshmax;        %Осадки судна

```

Имитационная модель рулевой машины представлена на рис. 1. Теория НЕЖ используется для создания модели нагрузки  $T_R(\beta, V_{sh}, T_{sh})$ .

Подсистема Rudder Gear реализует процессы для вычисления момента на валу баллера (рис. 2) состоит из трёх подсистем, реализующих теорию НЕЖ.

Блок Rudder Torque реализует зависимость:

$$T_R = F_R L_S,$$

где

$$F_R = (C_y \cos \beta + C_x \sin \beta) \frac{\rho V_s^2}{2} S_R;$$

$$L_S = C_d L_R;$$

$L_S$  – расстояние от передней кромки руля до центра давления;  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_d$  – безразмерные коэффициенты по данным испытаний моделей изолированных рулей [3, 5, 6], зависящие от  $\beta$  и относительного удлинения пера руля;

Значения безразмерных коэффициентов представлены в табличном виде [3] и реализованы с помощью блоков 2-D Lookup Table (рис. 3).

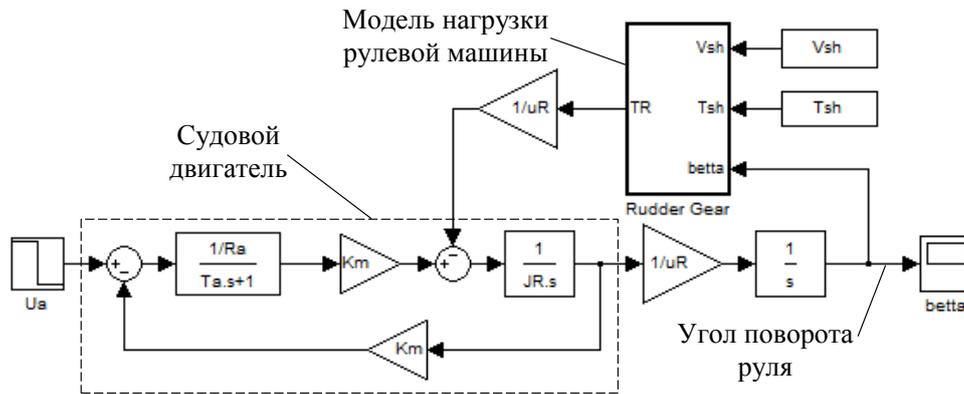


Рис. 1. Имитационная модель рулевой машины

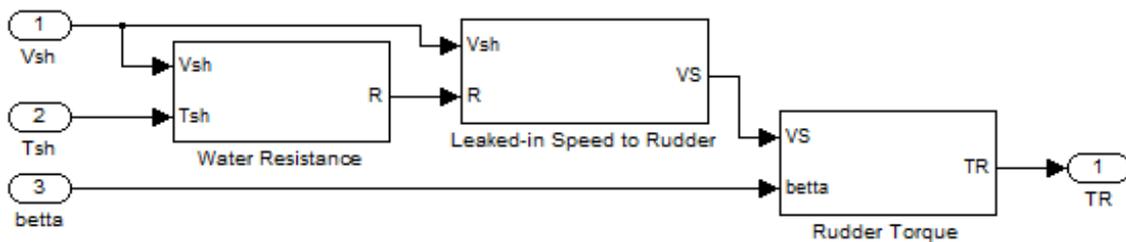


Рис. 2. Подсистема Rudder Gear

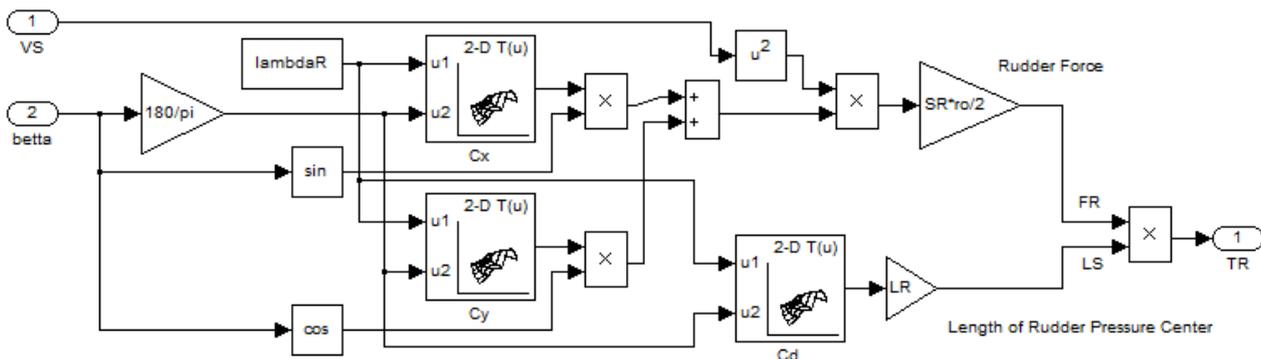


Рис. 3. Подсистема Rudder Torque

Скорость набегающей на руль воды  $V_S$  определяется подсистемой Leaked-in Speed to Rudder (см. рис. 4). Расчёт скорости  $V_S$  полностью освещён в [2, 4]. Для определения скорости  $V_S$  требуется скорость судна  $V_{sh}$  и рассчитанное значение сопротивления воды движению судна  $R$ , которое определяется подсистемой Water Resistance:

$$V_S = V_{S0} + \Delta_{VP},$$

где  $V_{S0} = V_{sh} - V_{III} = V_{sh}(1 - \Psi)$  – скорость натекающего на руль потока при остановленном двигателе (Leaked-in Speed for Stopped Motor);  $\Psi$  (Psi) – коэффициент попутного потока, который зависит от скорости и габаритных параметров судна и влияет на скорость попутного потока  $V_{III}$  и силу упора винта  $P_p$  (Propeller Force). Вычисляется блоком Wake Speed;  $\Delta_{VP}$  (Dvp – flow rate increment) – приращение скорости потока из-за работы винта. Зависит от диаметра и удаления винта от руля ( $D_p$  и  $L_{pr}$ ), а также от силы упора винта  $P_p$ .

Сила упора для одновинтового судна определяется выражением [4]:

$$P_p = \frac{R}{1 - 0,6\Psi(1 + 0,67\Psi)}.$$

Подсистема Water Resistance представлена на рис.

5.

Сопротивление воды движению судна определяется выражением [4]:

$$R = 0,5\zeta_c S_c \rho V_{sh}^2,$$

где  $S_c$  – площадь смоченной поверхности, вычисляется по формуле, реализованной блоком Wetted Surface Square, и зависит от осадки  $T_{sh}$  и объёмного водоизмещения  $D_{sh}$ ;  $\zeta_c = \zeta_s + \zeta_w(zc)$  – полный коэффициент сопротивления воды, который состоит из коэффициента волнового сопротивления  $\zeta_w = K_2(\zeta'_w + \Delta\zeta'_w)10^{-3}$  ( $z_w$ ) и коэффициента вязкостного сопротивления  $\zeta_s = K_1\zeta_f + 0,1 \cdot 10^{-3}$  ( $z_s$ );  $\zeta_f$  ( $z_f$ ) – коэффициент сопротивления трения судна;  $\zeta'_w$  ( $z_w$ ),  $\Delta\zeta'_w$  ( $dz_w$ ) – базовое значение и надбавки коэффициента  $\zeta_w$ .

Оба коэффициента сопротивления зависят от скорости и осадки судна и определяются по сложным нелинейным зависимостям, которые реализуются подсистемами Wave resistance Coef и Viscous resistance Coef (рис. 6).

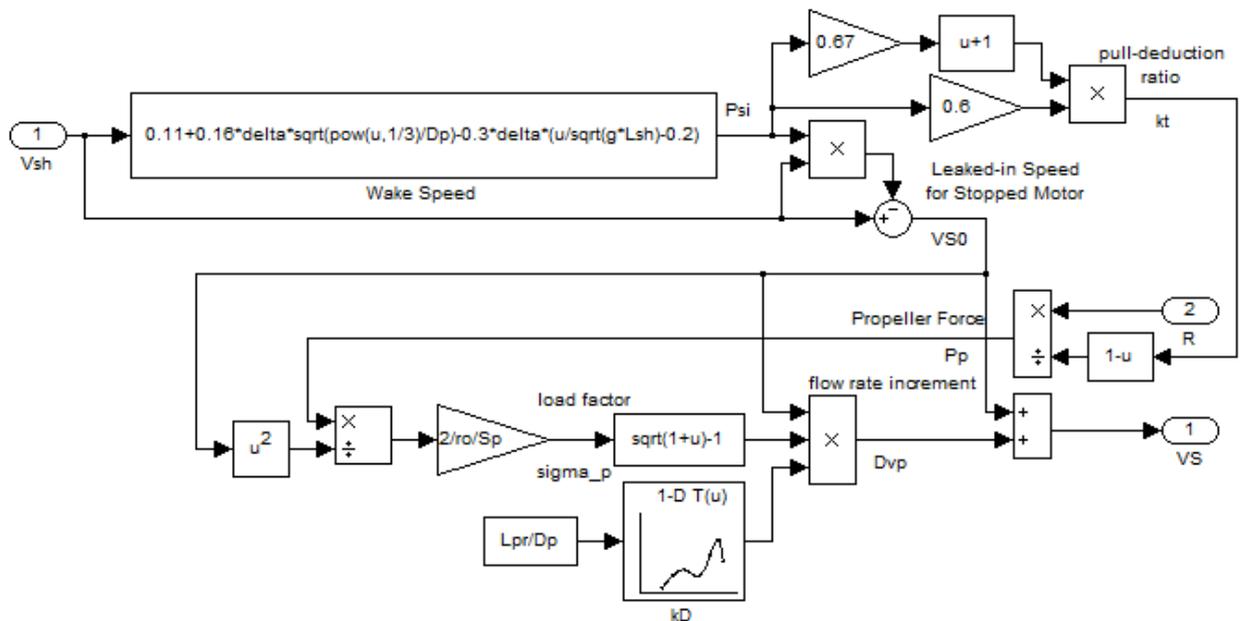


Рис. 4. Подсистема Leaked-in Speed to Rudder

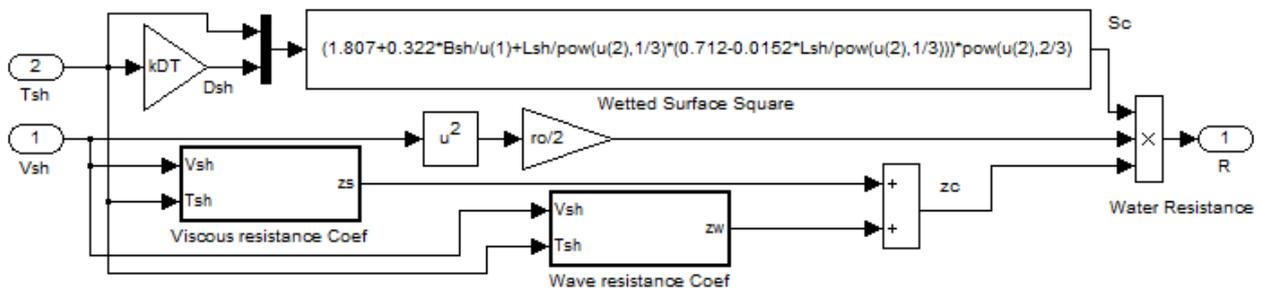


Рис. 5. Подсистема Water Resistance

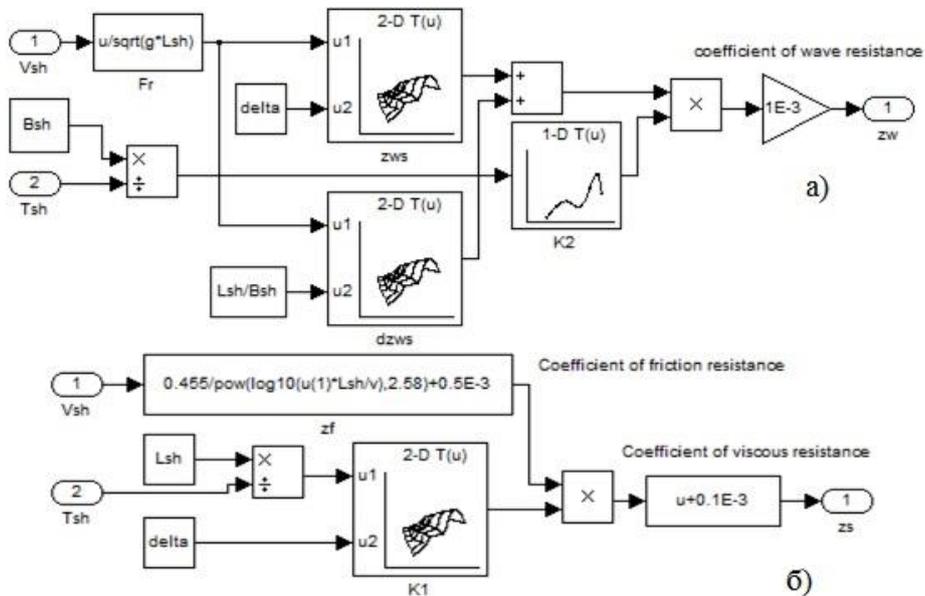


Рис. 6. Подсистемы коэффициентов сопротивления Wave resistance Coef (a) и Viscous resistance Coef (б)

Нелинейные зависимости  $K_1(\delta, L_{sh}/T_{sh})$ ,  $K_2(B_{sh}/T_{sh})$ ,  $\zeta'_w(Fr, \delta)$  и  $\Delta\zeta'_w(Fr, L_{sh}/B_{sh})$  выражены табличными данными [4] и реализованы блоками n-D Lookup Table. Показатель  $Fr$  называется числом Фруда [4], который должен изменяться в диапазоне от 0,1 до 0,3.

Модель нагрузки рулевой машины (Подсистема Rudder Gear) может использоваться в двух случаях:

1. Для расчёта мощности электродвигателя

$$P = \frac{T_{Rmax} \omega_{Rmax}}{\eta_R}$$

Вычисление максимального момента на баллере представлено на рис. 7. Это позволяет автоматизировать расчёты по электротехническим дисциплинам.

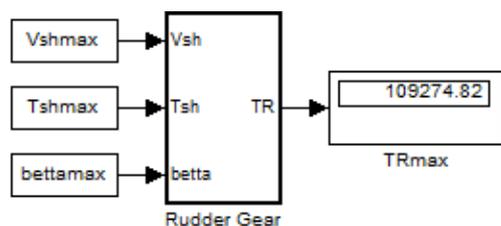


Рис. 7. Использование подсистемы Rudder Gear для расчёта мощности электродвигателя

2. Для имитационного эксперимента, где создаётся модель рулевой машины (см. рис. 1), рулевого привода или системы «Авторулевой». Это позволяет повысить уровень адекватности. На рис. 8 представлены кривые угла поворота руля  $\beta(t)$  и момента на баллере  $T_R(t)$ .

При этом следует иметь в виду ограничения на скорость и осадку судна, которые должны быть заданы в диапазонах  $T_{sh} \in [T_{shmin}, T_{shmax}]$  и  $V_{sh} \in [V_{shmin}, V_{shmax}]$ . Минимальная скорость судна рассчитывается из условия равенства числа Фруда наименьшему значению

$$Fr = \frac{V_{shmin}}{\sqrt{g \cdot L_{sh}}} = 0,1.$$

Учитывая, что соотношение размеров судна должно определяться условиями

$$20 \leq \frac{L_{sh}}{T_{sh}} \leq 60, \quad 3 \leq \frac{B_{sh}}{T_{sh}} \leq 8,$$

то минимальное значение осадки должно выбираться из условия

$$T_{shmax} > T_{shmin} \geq \frac{B_{sh}}{8} \text{ и } T_{shmax} > T_{shmin} \geq \frac{L_{sh}}{60}.$$

Подсистема Rudder Gear использовалась для вычисления зависимостей  $T_R(\beta, V_{sh}, T_{sh})$ , которые сравнивались с экспериментальными данными, приведёнными в [6]. Результат показал достаточную точность вычисления и высокую адекватность.

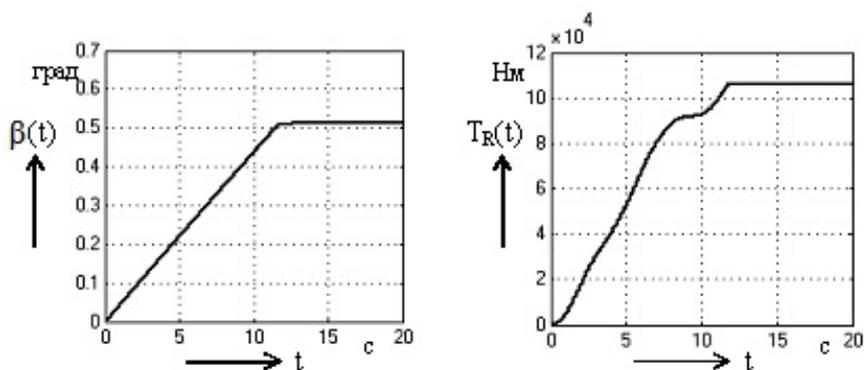


Рис. 8. Результаты имитационного эксперимента рулевой машины

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корчанов, В.М. Построение систем управления движением судна [Текст] / В.М. Корчанов, Д.А. Скороходов // Морские интеллектуальные технологии. – 2010. - №3-1. – С. 74-78.
2. Вагущенко, Л.Л. Системы автоматического управления движением судна: Л.Л. Вагущенко, Н.Н. Цымбал. – 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса : Феникс, 2007. – 328 с.
3. Ткаченко, В.А. Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем, устройств: Методические указания к выполнению курсового проекта для курсантов и студентов специальности 180403 «Эксплуатация судовых энергетических установок» очной и заочной форм обучения / В.А. Ткаченко. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. – 118 с.
4. Ряйсянен, А.Г. Расчёт движительного комплекса винтового судна: Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Теория и устройство судна» для студентов 3 курса специальности «Эксплуатация судовых энергетических установок» / А.Г. Ряйсянен. – Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2010. – 44 с.
5. Антонов, В.А. Теоретические вопросы управления судном : учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Антонов, М.Н. Письменный. – Владивосток: МГУ им. Адм. Г.И. Невельского, 2007. – 78 с.
6. Фрейдзон, И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы : учебник для вузов по специальности "Электрооборудование и автоматика судов" / И. Р. Фрейдзон. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1988. – 472 с.

---

---

# MODELING IN THE SIMULINK OF THE SHIP'S STEERING GEAR WITH A MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE WATER PRESSURE FORCE ACCORDING TO ZHUKOVSKY'S MODEL

**S.V. Stelmashchuk**

Komsomolsk-na-Amure State Technical University, Komsomolsk-na-Amure, Russia

**Abstract.** The article presents the materials used in calculations of the hydrodynamic forces applied to the ship's rudder in the diagrams realized by the blocks of the Simulink package. The results of simulation of the steering gear have shown sufficient effectiveness for solving problems of modeling more complex systems like the steering drive or the "autopilot" system.

**Keywords:** steering gear, Simulink, ship drive, simulation.

## REFERENCES

1. Korchanov V.M., Skorokhodov D.A. Construction of ship movement control systems [Postroenie sistem upravleniya dvizheniem sudna], Morskie intellektual'nye tekhnologii [*Marine Intelligent Technologies*], 2010, no 3 (1), pp. 74-78.
2. Vagushchenko L.L., Tsimbal N.N. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna* [Automatic ship movement control systems], Odessa, Feniks, 2007, 328 p.
3. Tkachenko V.A. *Ekspluatatsiya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov, sistem, ustroystv: uchebnoye posobiye* [Operation of ship auxiliary mechanisms, systems, devices: study guide], Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamchatSTU, 2008, 118 p.
4. Ryaysyanen A.G. *Raschiot dvizhitel'nogo kompleksa vintovogo sudna: uchebnoye posobiye* [Calculation of propeller ship propulsion system: study guide], Khabarovsk, Publisher of TOSU, 2010, 44 p.
5. Antonov V.A., Pis'menny M.N. *Teoreticheskie voprosy upravleniya sudnom: uchebnoye posobiye* [Theoretical questions of ship control: study guide], Vladivostok, Admiral Nevelsky MSU, 2007, 78 p.
6. Freydzon I.R. *Sudovye avtomatizirovannye elektroprivody i sistemy: uchebnoye posobiye* [Marine automated electric drives and systems], Leningrad, Publisher "Sudostroenie", 1988, 472 p.

**BUILDING A SINGLE-NODE CONVEYOR LINE MODEL WITH A CONSTANT SPEED**

**O.M. Pihnastyi, R.O. Korsun**

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
Kharkiv

pom7@bk.ru

**Аннотация.** This paper focuses on the model of the production line of the conveyor type. The system of equations to model of the conveyor line at a constant speed of the moving of the subjects of labor was written in the one-moment description and was receive its solution in analytic form that allowed to calculate the parameters of the system at any given time. It is shown that the solution is determined of the kind of initial and boundary conditions. Here was received an expression for calculation of the production cycle of the conveyor line.

**Ключевые слова:** production line, PDE model, the subject of labor, control system, technological process, semiconductor production, conveyor model.

**1. General statement of the problem and its relevance**

Behavior of the line parameters largely determined by the fact of interaction between the subjects of labor during processing [1,2]. Technological cooperation appears at the presence of technological constraints, which define the sequence of process steps and the order of movement of the subjects of labor on technological route (pic.1) [3].

The system of equations that determines the behavior of the production line parameters in the single-step description has the following form [1]

$$\frac{\partial [\chi]_0(t,S)}{\partial t} + \frac{\partial [\chi]_1(t,S)}{\partial S} = 0, \tag{1}$$

$$[\chi]_1(t,S) = [\chi]_{1\psi}(t,S), \tag{2}$$

at initial

$$[\chi]_0(t_0,S) = \Psi(S), \tag{3}$$

and the boundary condition

$$[\chi]_0(t,S_0) = \Phi(t), \tag{4}$$

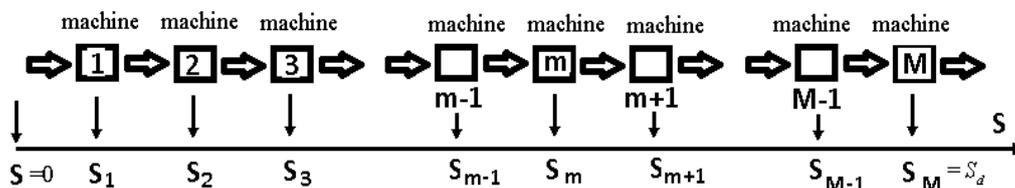
Where  $[\chi]_0(t,S)$  – the density distribution of the subjects of labor in work in progress on the technological positions;  $[\chi]_1(t,S)$  – temp of processing of the subjects of labor on technological positions at the time  $t$ . The position of subject of labor on the technological route is characterized by the coordinate  $S \in [0; S_d]$ .

When using the coordinates of the costs space constant  $S_d$  corresponds to the cost of production.

A number of studies used dimensionless quantity  $\xi \in [0;1]$  [2], as the coordinate that defines the position of the subject, the value of which gives an idea of the degree of processing of the subject of labor:  $\xi = 0$  corresponds to the initial stage of processing subject of labor;  $\xi = 1$  It corresponds to a final processing stage of the subject of labor, when the subject of labor turns into a finished product. Selection of variable  $\xi \in [0;1]$  is quite diverse. One of the ways to represent this variable can be the ratio of the transferred costs of the resources  $S \in [0; S_d]$  for labor to its variable cost  $S_d$ :  $\xi = \frac{S}{S_d}$ . Initial condition (3) determines the

number of subjects of labor at the time  $t_0$  at each processing step. The boundary condition (4) determines the number of the subjects of labor for the technological position  $S_0$  at arbitrary time  $t$ .

The boundary condition (4) can be set from the assumption that the size of interoperable storage is limited or determined by the terms of supply of raw materials and materials to the appropriate technological operation The boundary condition (4) can also be claimed in the case, if the model of flow line takes into account the shipment of the subjects of labor in the form of semi-finished products from a technological position, characterized by a coordinate  $S_0$ , or the presence of factors, which determine the count of the number of defective products. The presence of the initial (3) and the boundary (4) conditions leads to discontinuous nature of the solutions of the system of equations (1),(2), which is typical for the behavior of stream parameters of modern production conveyor lines [4].



**Pic.1. Scheme of a single-node flow conveyor line**

Solution of the system (1)–(3) for constant speed of subjects of labor on the production line or on its separate part is presented in the works [1,p.235], [2,p.910], [5,p.97]. However, a detailed analysis of the resulting solution is not given. At the same time, the calculation of state parameters for conveyor lines is an important production task, which requires the use of new methods of solving. Special place occupies the problem of calculating the state parameters of the production system, which is composed of several interconnected conveyor lines, that are arranged as a series or parallel [6]. In the work [2] is presented a numerical calculation of the production line, that consists of three sections  $\xi \in [0,0.2]$ ,  $\xi \in [0.2,0.8]$ ,  $\xi \in [0.8,1]$ , on each of them the velocity of the subjects of labor  $g$  is constant for a particular section and equals accordingly [15;10;15], [2,c.910]. Each of the sections is a conveyor, that provides a constant speed of subjects of labor. Conveyors are located sequentially one after another. In the work [7] given the numerical solution of the system (1)–(4), analysis of the solution for specified initial and boundary conditions is given. The initial condition determines the condition of the subjects of labor at each processing step at time  $t=0$ , and boundary condition sets the intensity of the receipt of the subjects of labor for processing, according to the available orders for production. In the work [8] tasked an optimal control of multiple threads, which are connected into a single stream. Despite the fairly large number of publications, dedicated to the design of control systems, production lines with the use of PDE-models [1,2,7,8], the analysis of model of the conveyor line, in our opinion, not enough attention is given to. In the same time, conveyor type production is a common way of organizing the production process. A characteristic feature of this way of organizing production is, that the all subjects of labor located on the conveyor line are moving with the same speed. This fact allows to simplify the system of equations (1)–(4).

## 2. Statement of the problem and formulation of the purpose of the article

The purpose of this article is to build an analytical solution of the system (1)–(4) in the case of movement of the subjects of labor along the technological route at a constant speed. An important and separate task along with the analysis of the obtained solution is to show the dependence of solutions from initial and boundary conditions, that determine the functioning of the conveyor line. Special attention by solving the system of equations (1)–(4) deserve problems as condition parameters determining a conveyor line for an arbitrary point in time, as well as the calculation of the duration of the production cycle of manufacturing of products [9–11]. The production cycle of manufacturing of products is one of the most important characteristics of the production system.

### 3. A single-node conveyor line model at a constant speed movement of subjects of labor

Consider a production line consisting of  $M$  units of technological equipment. located on technological positions with the coordinate  $S = S_m$  (pic.1). Subjects of labor are moving on technological route, consisting of  $M$  units of

technological positions with a constant speed  $a$ . The system of equations for describing the parameters of the production line in a conveyor model has the form

$$\frac{\partial [\chi]_0(t,S)}{\partial t} + \frac{\partial [\chi]_1(t,S)}{\partial S} = 0, \quad (5)$$

$$[\chi]_1(t,S) = a \cdot [\chi]_0(t,S), \quad (6)$$

$a$  – conveyor speed.

For clarity of presentation of research results, we introduce dimensionless variables  $\tau, \xi$  and the dimensionless density of the subjects of labor  $[\theta]_0(\tau, \xi)$  on technological positions. Then it is possible to present:

$$t = t_d \cdot \tau, \quad S = S_d \cdot \xi, \quad (7)$$

$$[\chi]_0(t,S) = [\theta]_0(\tau, \xi) \cdot \Theta, \quad \Theta = \max\{\Psi(S), \Phi(t)\}.$$

$$\Psi(S) = \Theta \cdot \psi(\xi), \quad \Phi(t) = \Theta \cdot \vartheta(\tau) \quad (8)$$

By substituting (6) in (5) and, taking into account (7), system of equations (1)–(4) can be written in dimensionless form:

$$\Theta \cdot \frac{\partial [\theta]_0(\tau, \xi)}{\partial \tau} + \Theta \cdot \frac{a \cdot t_d}{S_d} \frac{\partial [\theta]_0(\tau, \xi)}{\partial \xi} = 0, \quad (8)$$

$$[\theta]_0(\tau_0, \xi) = \psi(\xi), \quad (9)$$

$$[\theta]_0(\tau, \xi_0) = \vartheta(\tau), \quad (10)$$

The value of the characteristic time  $t_d$  is determined by the operating conditions of production. Its choice determines the value of the constant dimensionless speed of a conveyor line  $g$ :

$$g = \frac{a \cdot t_d}{S_d} = \frac{t_d}{T_d}. \quad (11)$$

If the characteristic time  $t_d$  corresponds to the duration of the production cycle of manufacturing products  $T_d = \frac{S_d}{a}$  (period of time during which the subject of labor is treated, starting with the first technological operation and ending with the last technological operation), then in that case  $g=1$  and the dimensionless time  $\tau = \frac{t}{T_d}$  will characterize the

ratio of the total time  $\tau$  to the production cycle time  $T_d$ . Taking into account (11) system of equations (8)–(10) takes the form

$$\frac{\partial [\theta]_0(\tau, \xi)}{\partial \tau} + g \frac{\partial [\theta]_0(\tau, \xi)}{\partial \xi} = 0, \quad (12)$$

$$[\theta]_0(\tau_0, \xi) = \psi(\xi), \quad (13)$$

$$[\theta]_0(\tau, \xi_0) = \vartheta(\tau), \quad (14)$$

which corresponds to the system of characteristics:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = g, \quad \xi(\tau_0) = \xi_0, \quad (15)$$

$$\frac{d[\theta]_0}{d\tau} = 0, \quad [\theta]_0(\xi, \tau_0) = \psi(\xi) \quad (16)$$

Integrating (15), we will get

$$\xi = g\tau + C, \quad C = \text{const}, \quad (17)$$

where  $\xi(\tau)$  – dimensionless coordinate. The function  $\xi(\tau)$  can be interpreted as a position of the subject of labor on the conveyor line at time  $\tau$ , which at time  $\tau_0$  has held position  $\xi_0$ .

Wherein movement of the conveyor runs at a constant dimensionless speed  $g$  (11). The equation (17), that determine the possible trajectories of movement of the subjects of labor in the phase coordinate space [12], is a first integral of the equation (15). Taking into account initial condition  $\xi(\tau_0) = \xi_0$ , we can write:

$$\xi = \xi_0 + g(\tau - \tau_0), \quad C = \xi_0 - g\tau_0. \quad (18)$$

The general solution of the equation (12) is a function of the first integral (17):

$$[\theta]_0(\tau, \xi) = [\theta]_0(\xi - g\tau). \quad (19)$$

Due to the fact that:

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\theta]_0(\xi - g\tau)}{\partial\tau} &= -g \frac{\partial[\theta]_0(\xi - g\tau)}{\partial(\xi - g\tau)}, \\ \frac{\partial[\theta]_0(\xi - g\tau)}{\partial\xi} &= \frac{\partial[\theta]_0(\xi - g\tau)}{\partial(\xi - g\tau)}, \end{aligned} \quad (20)$$

by direct substitution of expressions (20) in equation (12) we obtain the identity

$$-g \frac{\partial[\theta]_0(\xi - g\tau)}{\partial(\xi - g\tau)} + g \frac{\partial[\theta]_0(\xi - g\tau)}{\partial(\xi - g\tau)} = 0. \quad (21)$$

Taking into account initial condition (13) and the boundary condition (14), solution (19) takes the form

$$\begin{aligned} [\theta]_0(\tau, \xi) &= [\theta]_0(\xi - g\tau) = \psi(r + \xi_0), \\ [\theta]_0(\tau, \xi) &= [\theta]_0(\xi - g\tau) = \vartheta\left(\tau_0 - \frac{r}{g}\right), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\psi(r + \xi_0) = \vartheta\left(\tau_0 - \frac{r}{g}\right), \quad (23)$$

where we have introduced the variable  $r$

$$r(\xi, \tau) = (\xi - \xi_0) - g(\tau - \tau_0). \quad (24)$$

The substitution  $\tau = \tau_0$  in (22) and  $\xi = \xi_0$  in (23) gives the identical equality, that corresponds to the initial and boundary conditions:

$$\begin{aligned} [\theta]_0(\tau_0, \xi) &= [\theta]_0(\xi - g\tau_0) = \psi(\xi), \\ r(\xi, \tau_0) &= (\xi - \xi_0), \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} [\theta]_0(\tau, \xi_0) &= [\theta]_0(\xi_0 - g\tau) = \vartheta(\tau), \\ r(\xi_0, \tau) &= -g(\tau - \tau_0), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} [\theta]_0(\xi_0 - g\tau_0) &= \psi(\xi_0) = \vartheta(\tau_0), \\ r(\xi_0, \tau_0) &= 0, \psi(\xi_0) = \vartheta(\tau_0). \end{aligned} \quad (27)$$

Thus, for the construction of the solution that does not have discontinuity points, we must specify the distribution of interoperable backlog  $\psi(\xi)$  along the conveyor line at time  $\tau_0$  or a change in the state of interoperable backlog  $\vartheta(\tau)$  in time on technological position, that is characterized by the

coordinate  $\xi_0$ . Due to the equation (6) function  $g \cdot \psi(\xi)$  can be interpreted as a dimensionless rate of movement subjects of labor on the conveyor line for the technological position, which is characterized by the coordinate  $\xi$ , at time  $\tau_0$ , and  $g \cdot \vartheta(\tau)$  – as a dimensionless rate of processing of the subjects of labor at time  $\tau$  on the technological position, which is characterized by the coordinate  $\xi_0$ . The dimensionless function  $\psi(\xi)$  and  $\vartheta(\tau)$  related to the density distribution of subjects of labor along the conveyor line  $[\chi]_0(t, S)$  and to the pace of their movement  $[\chi]_1(t, S)$  by the ratios (6)–(8). It is reasonable to expect that a dimensionless value of interoperable backlog of subjects of labor  $\vartheta(\tau)$  at the position  $\xi_0$  at time  $\tau$  must be associated with a dimensionless quantity of the interoperable backlogs  $\psi(\xi)$  at time  $\tau_0$  on the technological position, which is characterized by the coordinate  $\xi$ . Let us show the relationship between a functions  $\psi(\xi)$  and  $\vartheta(\tau)$ .

For technological position with the coordinate  $\xi = \xi_0$  we have the equality:

$$\begin{aligned} [\theta]_0(\xi_0 - g\tau) &= \psi(r(\xi_0, \tau) + \xi_0) = \\ &= \vartheta\left(\tau_0 - \frac{r(\xi_0, \tau)}{g}\right), r(\xi_0, \tau) = -g(\tau - \tau_0), \\ \psi(\xi_0 - g\tau + g\tau_0) &= \vartheta(\tau), \psi(\xi_0) = \vartheta(\tau_0). \end{aligned} \quad (28)$$

We use the notation

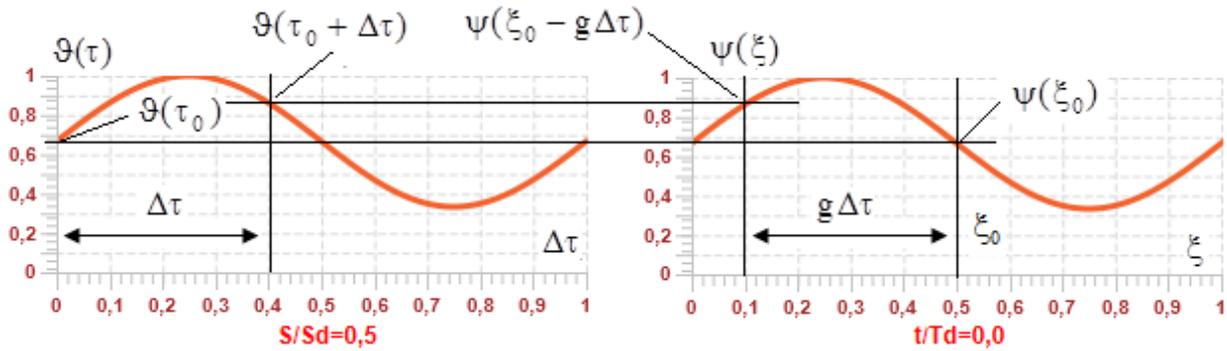
$$\Delta\tau = \tau - \tau_0, \quad (30)$$

taking into account that, the equality (29) can be rewritten as follows:

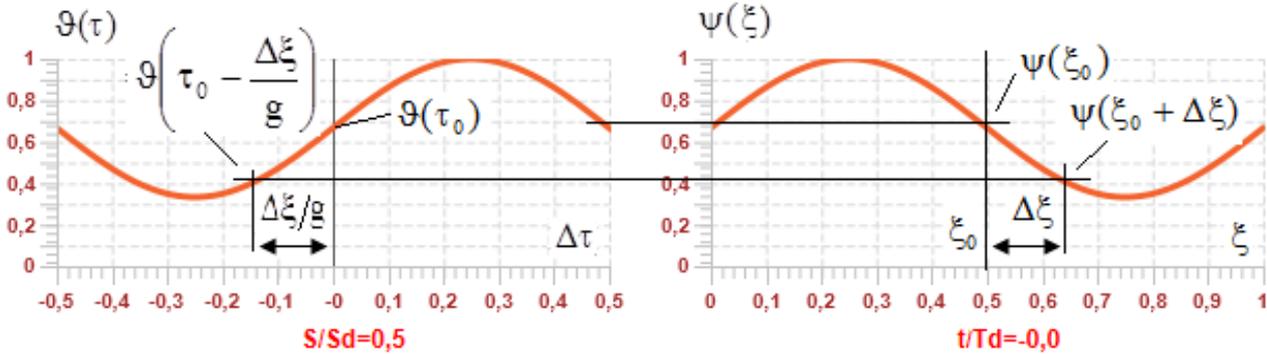
$$\psi(\xi_0 - g\Delta\tau) = \vartheta(\tau_0 + \Delta\tau), \psi(\xi_0) = \vartheta(\tau_0). \quad (31)$$

The relationship of functions  $\psi(\xi)$  and  $\vartheta(\tau)$  for different instants of time  $\tau = \tau_0 + \Delta\tau$  is demonstrated at pic.2. Clearly showed that the value of interoperable backlog  $\vartheta(\tau_0 + \Delta\tau)$  for equipment in technological position  $\xi_0$  at time  $\tau = (\tau_0 + \Delta\tau)$  is determined by the state of the interoperable backlogs on the technological position  $\xi = (\xi_0 - g\Delta\tau)$  at time  $\tau = \tau_0$ .

Thus if we know initial distribution of the subjects of labor along the conveyor line at time  $\tau = \tau_0$  (dimensionless speed of the conveyor  $g$ ), it is possible to uniquely determine the number of the subjects of labor that will be located on the technological position  $\xi_0$  at time  $\tau = \tau_0 + \Delta\tau$ . During the  $\Delta\tau$  since the start of the conveyor  $\tau = \tau_0$  the subjects of labor are moving with the speed of the conveyor  $g$  from the technological position  $\xi = (\xi_0 - g\Delta\tau)$  to the technological position  $\xi_0$ . This relationship is important to the operation of conveyor type production lines [13]. The distribution of technological resources of production in time on the technological operations can be determined from the current state of the distribution of the subjects of labor along the



**Pic.2.** The relationship of functions  $\psi(\xi)$  and  $\vartheta(\tau)$  for different instants of time  $\tau = \tau_0 + \Delta\tau$



**Pic.3.** The relationship of functions  $\psi(\xi)$  and  $\vartheta(\tau)$  for the coordinate values  $\xi = \xi_0 + \Delta\xi$

conveyor using a fairly simple equation of the form (31). The current distribution of subjects of labor along the line determines the plan of distribution of technological resources in future times. For example it is possible to determine in advance how many employees you need to use to perform those or other operations in future times, or to determine the exact time of the supply of raw materials for technological position of the conveyor line.

On the other hand, regarding the point in time  $\tau = \tau_0$  it is possible to write the relation

$$\begin{aligned} [\theta]_0(\xi - g\tau_0) &= \psi(r(\xi, \tau_0) + \xi_0) = \\ &= \vartheta\left(\tau_0 - \frac{r(\xi, \tau_0)}{g}\right), \end{aligned} \quad (32)$$

$$r(\xi, \tau_0) = (\xi - \xi_0),$$

$$\psi(\xi) = \vartheta\left(\tau - \frac{\xi}{g} + \frac{\xi_0}{g}\right), \quad \psi(\xi_0) = \vartheta(\tau_0). \quad (33)$$

We use the notation

$$\Delta\xi = \xi - \xi_0, \quad (34)$$

which allows the expression (33) represent as follows:

$$\psi(\xi_0 + \Delta\xi) = \vartheta\left(\tau_0 - \frac{\Delta\xi}{g}\right), \quad \psi(\xi_0) = \vartheta(\tau_0). \quad (35)$$

Pic.3 shows the relationship of functions  $\psi(\xi)$  and  $\vartheta(\tau)$  for different values of the coordinate  $\xi = \xi_0 + \Delta\xi$ . The size of interoperable backlogs for the technological equipment, located on an arbitrary technological position  $\xi = \xi_0 + \Delta\xi$  based on the state of the interoperable backlogs

for the equipment with technological position  $\xi_0$  at time

$\tau = \left(\tau_0 - \frac{\Delta\xi}{g}\right)$ . Time interval  $\Delta\tau = \frac{\Delta\xi}{g}$  determines the

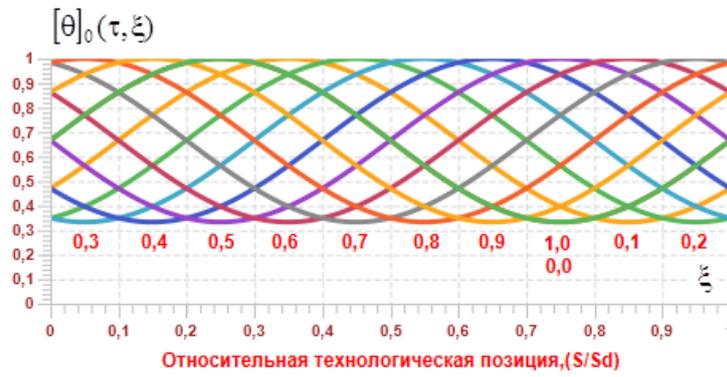
necessary time for which subjects of labor, which are on the technological position  $\xi_0$  will move to the position  $\xi = \xi_0 + \Delta\xi$  with the dimensionless conveyor speed  $g$ . The equation (35) shows the relationship of value of interoperable backlogs between technological positions  $\xi$  and  $\xi_0$ .

The collection of curves  $[\theta]_0(\tau, \xi)$ , each of which defines the state of interoperable backlogs for the technological position of the conveyor at the time moments  $\tau = (t/T_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.9; 1.0\}$  respectively, is shown in Pic.4. The curves are shifted relative to each other with a step  $\Delta\xi = g\Delta\tau$  with values  $g=1$  and  $\Delta\tau=0.1$ . The solution  $[\theta]_0(\tau, \xi)$  is obtained for the case of the initial conditions

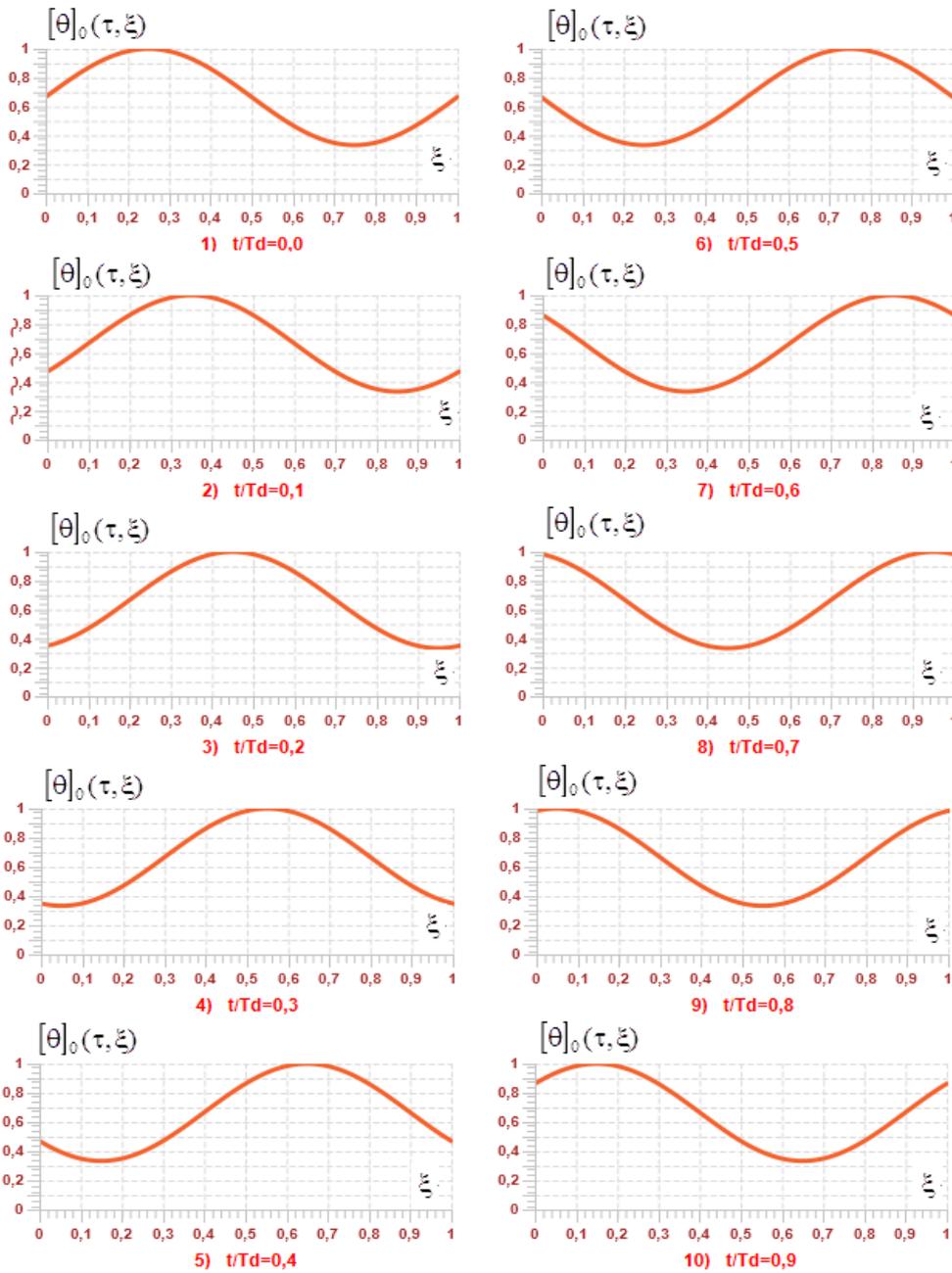
$$\psi(\xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi\xi)) \text{ with } \tau = 0:$$

$$[\theta]_0(\tau, \xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi(\xi - g\tau))), \quad g=1. \quad (36)$$

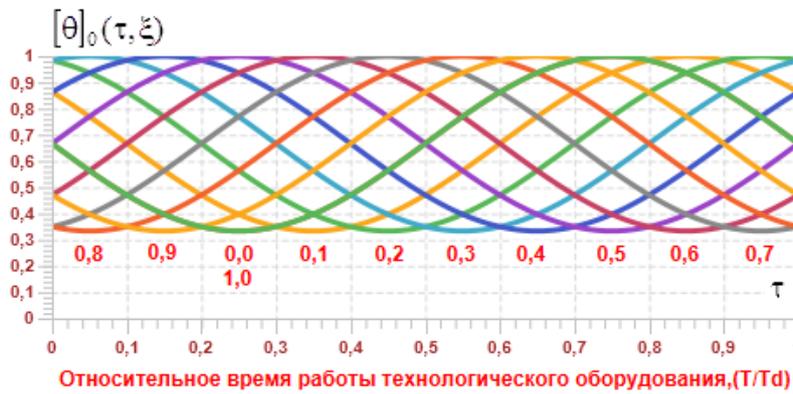
The boundary condition (14) is absent. The graph shows the shift of the function  $\psi(\xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi\xi))$  with the step  $\Delta\xi = g\Delta\tau$  for time moments  $\tau_i$  (pic.4.).



**Pic.4. The distribution of subjects of labor**  $[\theta]_0(\tau, \xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi(\xi - g\tau)))$   
**on technological positions of conveyor for**  $\tau = (t/T_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.9; 1.0\}$ ,  $g=1$



**Pic.5. The distribution of subjects of labor**  $[\theta]_0(\tau, \xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi(\xi - g\tau)))$   
**on technological positions of conveyor for**  $\tau = (t/T_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.9\}$ ,  $g=1$  (Expanded view)



**Pic.6. The dependence of the number of subjects of labor**  $[\theta]_0(\tau, \xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi(\xi - g\tau)))$   
**from time for conveyor position**  $\xi = (S/S_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.9; 1.0\}$ ,  $g=1$

It is shown a consistent movement of the subjects of labor along the route on a conveyor line, which moves with the dimensionless speed  $g$ . Pic.5 displays the functions individually  $[\theta]_0(0, \xi)$ ,  $[\theta]_0(0.1, \xi)$ , ...,  $[\theta]_0(0.8, \xi)$ ,  $[\theta]_0(0.9, \xi)$  at the time moments  $\tau = (t/T_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.8; 0.9\}$ . Equally important from a practical point of view the information presented in pic.6, which gives information about the size of interoperable backlogs for given technological positions and about desired tempo of processing subjects of labor, which provides a smooth non-stop conveyor work [14,15].

Pic.7 shows the change in value of interoperable backlogs  $[\theta]_0(\tau, 0.0)$ ,  $[\theta]_0(\tau, 0.1)$ , ...,  $[\theta]_0(\tau, 0.8)$ ,  $[\theta]_0(\tau, 0.9)$  for technological positions  $\xi = (S/S_d) = \{0.0; 0.1; \dots; 0.8; 0.9\}$ . Non-stationary time-dependent, the rate of processing of subjects of labor  $[\theta]_1(\tau, \xi) = g \cdot [\theta]_0(\tau, \xi)$  on the same technological position at constant conveyor speed  $g$  is determined by the difference in the density of subjects of labor at the working technological line segments. With the value of the dimensionless speed of the conveyor  $g=1$  the pace of processing subjects of labor takes the form  $[\theta]_1(\tau, \xi) = [\theta]_0(\tau, \xi)$ . Pic.8 represents considerable practical interest for the design of the conveyor line with displaying family of characteristics  $\xi - g\tau = C_i$  (17). Each of the characteristics  $\xi - g\tau = C_i$  connects values  $\xi$  and  $\tau$ , for which value of interoperable backlogs, and accordingly, the pace of processing subjects of labor is constant and equal to:

$$[\theta]_0(\tau, \xi) = [\theta]_0(C_i) = \psi(C_i + g\tau_0), \quad (37)$$

$$r(\xi, \tau) = C_i - (\xi_0 - g\tau_0)$$

$$[\theta]_0(\tau, \xi) = [\theta]_0(C_i) = \vartheta\left(\frac{\xi_0 - C_i}{g}\right), \quad (38)$$

In the characteristics (17) the value of interoperable backlogs and the pace of processing of subjects of labor are kept constant. The profile, that define the distribution of subjects of labor (or the rate of processing subjects of labor) on technological operations, moves along the conveyor line with constant speed  $g$ . Characteristics cover the whole plane

$(\tau, \xi)$  and not intersect each other. The equation of characteristics can be used to track location of specific batch details in process of treatment in order to determine its status and conducting sampling inspection of party details, and to manage production inventory [16].

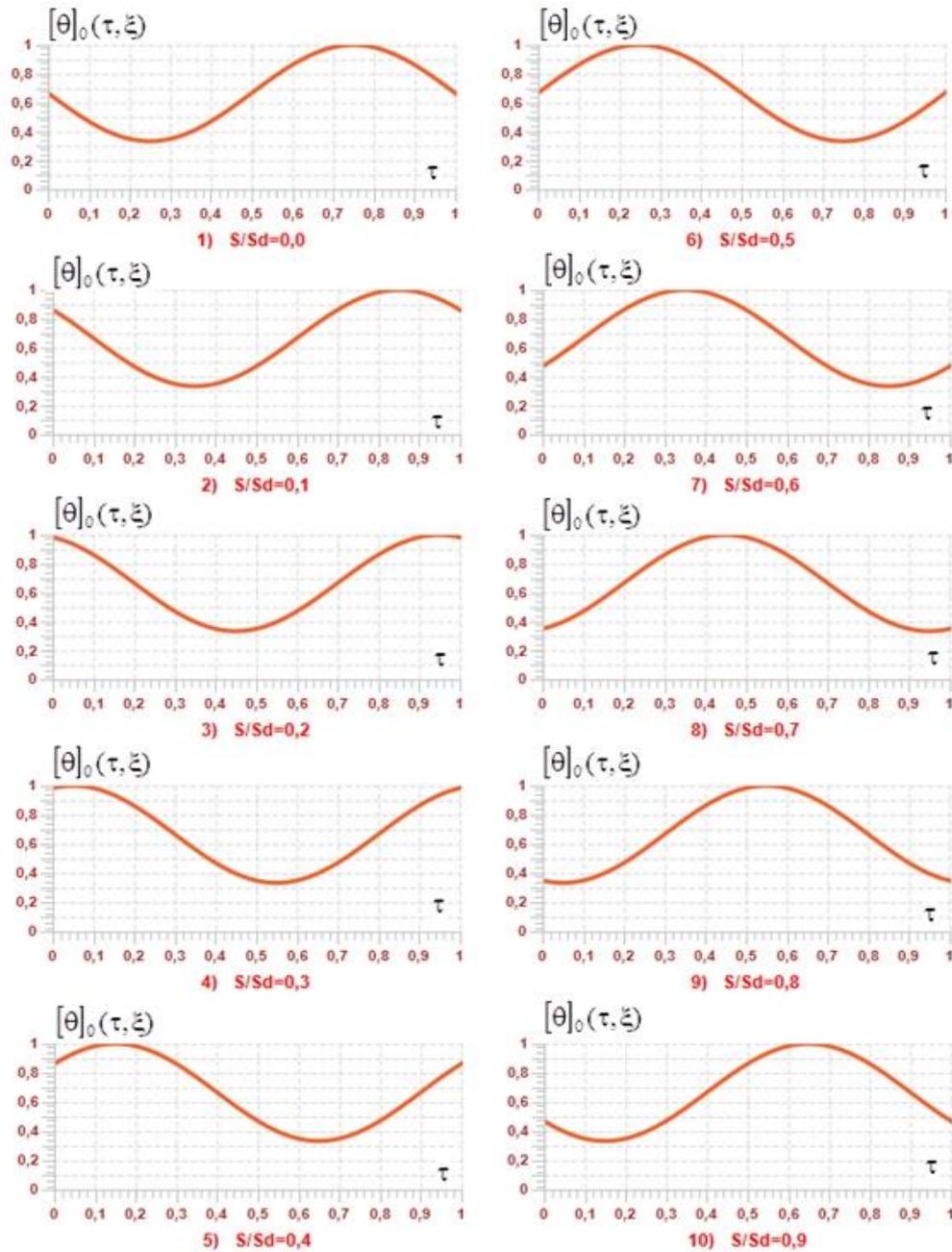
The equations (17) are the equations of motion of individual subjects of labor on technological route along the conveyor line. As expected, movement of a separate subject of labor on the trajectory (17) carried out with a constant speed, which is equal to the speed of the conveyor line [17]. The value of the dimensionless speed  $g$  (11) is determined by selecting value of the characteristic time  $t_d$  to study the parameters of the production line. The increase in value of the characteristic time  $t_d$  towards relative to the amount of the production cycle  $T_d$  leads to a stretching of the graph with the decision  $[\theta]_0(\tau, \xi)$  along the axis OS (transformation pic.4 into pic.9) and to its compression along the axis Ot (transformation pic.6 into pic.10)). At the same time chart with characteristics is compressing (transformation pic.8 into pic.11)). This allows, during the transition from one value of the characteristic time  $t_d$  to another value of characteristic time  $t_d$  use in a manufacturing enterprise the same current graphic and analytical materials.

#### 4. The calculation of the duration of the production cycle of the conveyor line

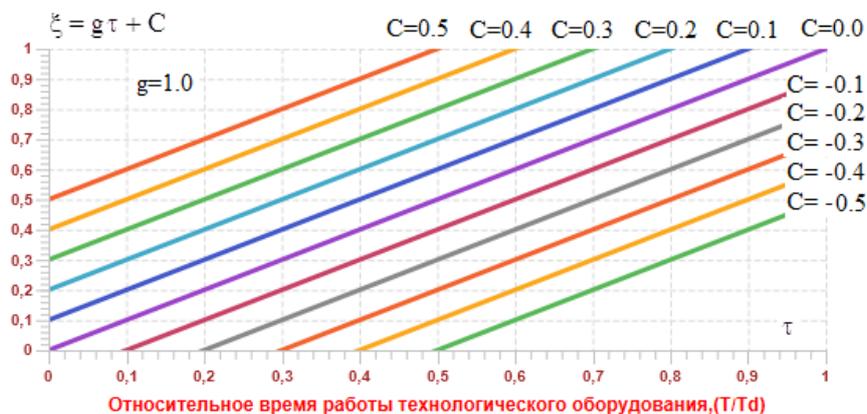
The duration of the production cycle is equal to the length of time, during which the subject of labor goes from the first technological position to the last. The calculation of the production cycle for production systems with the in-line way of organizing production is given in [9–11]. The value of duration of the production cycle of the conveyor type production line can be determined as follows:  $T_d = \int_0^1 \frac{dS}{a}$ .

We introduce the notation for the dimensionless quantity, which characterizes the duration of production cycle  $\tau_d = \frac{T_d}{t_d}$ . Using the notation (7),(8),(11), we obtain

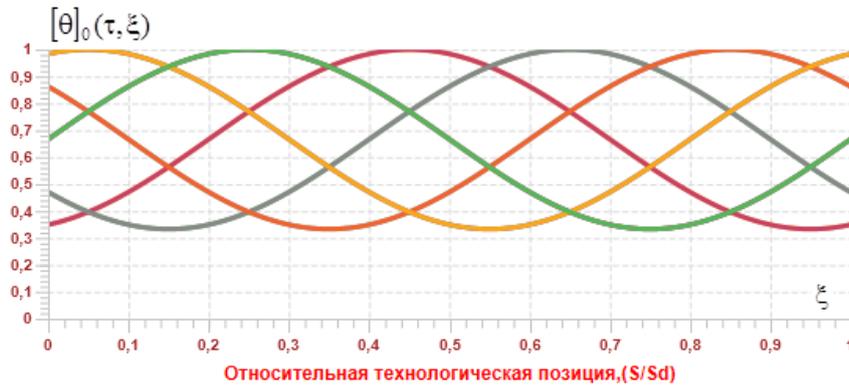
$$\tau_d = \frac{T_d}{t_d} = \frac{1}{t_d} \int_0^1 S_d d\xi = \frac{S_d}{t_d a} \int_0^1 d\xi = \frac{1}{g}$$



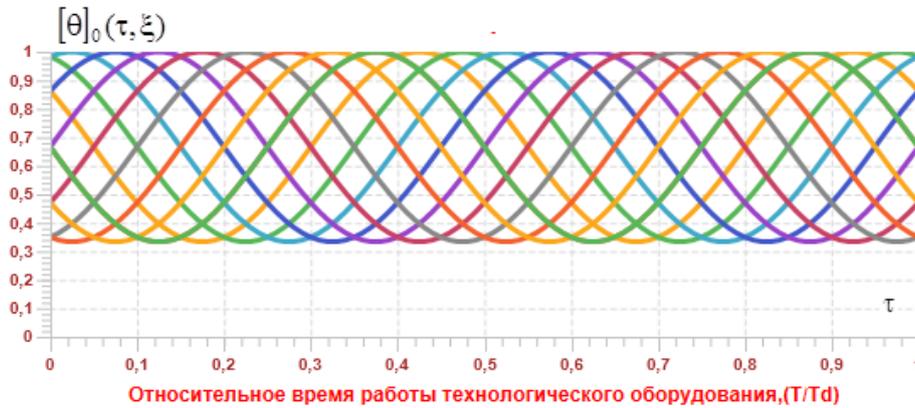
**Pic.7.** The dependence of the number of subjects of labor  $[\theta]_0(\tau, \xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi(\xi - g\tau)))$  from time to time for conveyor position  $\xi = (S/S_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.9; 1.0\}$ ,  $g=1$ . (Expanded view)



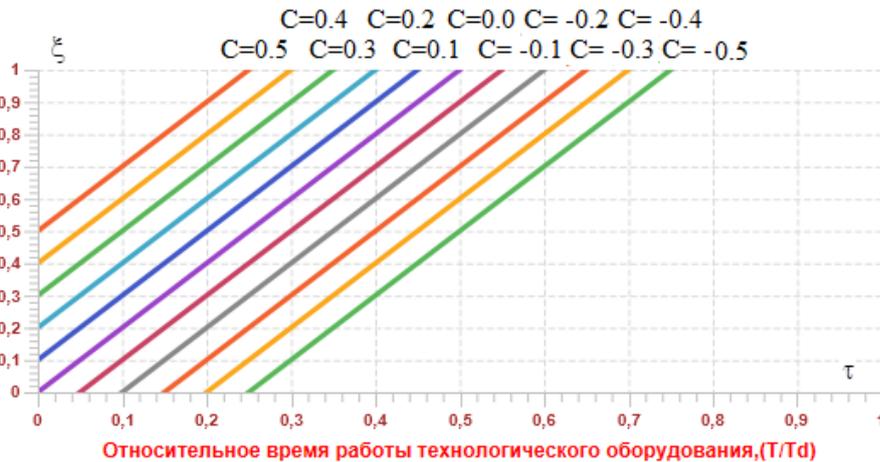
**Pic.8.** The family of characteristics  $\xi = g\tau + C$ ,  $g = 1.0$ ,  $C = \{0.5; 0.4; 0.3; \dots; -0.4; -0.5\}$



**Pic.9.** The distribution of subjects of labor  $[\theta]_0(\tau, \xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi(\xi - g\tau)))$  on technological positions of conveyor for  $\tau = (t/T_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.9; 1.0\}$ ,  $g=2$



**Pic.10.** The dependence of the number of subjects of labor  $[\theta]_0(\tau, \xi) = \frac{1}{3}(2 + \sin(2\pi(\xi - g\tau)))$  from time for conveyor position  $\xi = (S/S_d) = \{0.0; 0.1; 0.2; \dots; 0.9; 1.0\}$ ,  $g=2$



**Pic.11.** The family of characteristics  $\xi = g\tau + C$ ,  $g = 2.0$ ,  $C = \{0.5; 0.4; 0.3; \dots; -0.4; -0.5\}$

The products, that had gone into production in a dimensionless point in time  $\tau_1$ , come out as a finished product at the time  $\tau_2$  with delay  $\tau_d = (\tau_2 - \tau_1)$ , equal to the cycle time. Delay  $(\tau_2 - \tau_1)$  does not depend on the time of order receipt in production, is a constant, is inversely proportional to the dimensionless speed of the conveyor line  $\tau_d = \frac{1}{g}$ . The

output state of parameters of a flow line is determined by the state of production lines at the input with the constant value delay.

### Conclusions

The paper considers the model of the production line of conveyor type with a constant speed of subjects of labor. This method of organizing production is quite common, but

the issue of analysis of PDE- model of conveyor production line in modern literature are not given the necessary attention. Despite the fact that the model of conveyor type has a fairly simple form, which was obtained in the course of its analysis in the present study have important practical significance for the design of control systems. The advantage of the work is that the solution was obtained in an analytical form. This allowed to carry out a detailed analysis of the obtained solution. Clearly demonstrated the relationship between the parameters of various technological operations. Violation of this relationship leads to violations of uninterrupted mode of production, and also to the appearance of instabilities in the behavior of the production line parameters.

Duration of the production cycle have been calculated in this paper. It is shown that in a conveyor way of organizing production with a constant speed of movement of subjects of labor production cycle does not depend on the size of workpieces parties and from the sequence of their arrival in production. Prospects for further research is the analysis of the model of conveyor type production line with the speed of movement of subjects of labor, which depends on the time with a random admission orders in production.

#### REFERENCES

- Pihnastyi O.M. Statistical theory of production systems [Statisticheskaja teoriya proizvodstvennykh sistem], Kharkov: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2007, p. 388. –Available at: <https://goo.gl/dzcEZk>
- Armbruster D. A model for the dynamics of large queuing networks and supply chains. / D.Armbruster, P.Degond, C.Ringhofer – SIAM Journal on Applied Mathematics 83, 2006. – p. 896–920.
- Pihnastyi O.M. On the construction of the target function of the production system [O postroyenii tselevoy funktsii proizvodstvennoy sistemy], *Dopovidi Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, Kyiv, 2007, no.5, pp. 50-55. –Available at: <https://goo.gl/dF18Kx>
- Pihnastyi O.M. About a new class of dynamic models of production line production systems [O novom klasse dinamicheskikh modeley potochnykh liniy proizvodstvennykh sistem], *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific bulletins of the Belgorod State University]*, Belgorod, 2014, - no.31/1. - pp. 147-157. –Available at: <https://goo.gl/IjFEsS>
- Demutskiy V. P., Pihnastaya V. S., Pihnastyi O.M. Theory of the enterprise: Stability of the functioning of mass production and promotion of products on the market [Teoriya predpriyatiya: Ustoychivost' funktsionirovaniya massovogo proizvodstva i prodvizheniya produktsii na rynek.], Kharkov, 2003, p. 272. doi: 10.13140/RG.2.1.5018.7123. –Available at: <https://goo.gl/FGryP6>
- Pihnastyi O.M. Network model of a multi-resource production line [Setevaya model' mnogoresurnoy potochnoy proizvodstvennoy linii], *Nauchnyy rezul'tat. Seriya «Informatsionnyye tekhnologii» [Scientific result. «Information Technologies» Series]*. Belgorod, 2016, – vol.1. no.2, pp. 31–45.
- Armbruster D. A Continuum Model for a Re-entrant Factory / D. Armbruster, D. Marthaler, C. Ringhofer, K. Kempf, Jo T.-C. // Operations research. – 2006. – VOL 54 – №5. – P. 933 - 950
- Colombo R., Guerra G., Herty M., Sachsers V. Modeling and optimal control of networks of pipes and canals. Technical report, Milano Bicocca University, 2008. – Available at: <https://arxiv.org/abs/0802.3613v1>
- Khodusov V.D., Pihnastyi O.M. Calculation of the production cycle using the statistical theory of production and technical systems [Raschet proizvodstvennogo tsikla s primeneniym statis-ticheskoy teorii proizvodstvenno-tekhnicheskikh sistem], *Dopovidi Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, Kyiv: Publishing house "Academperiodica", 2009, no.12, pp. 38 – 44. –Available at: <https://goo.gl/Qw6qqK>
- Pihnastyi O.M., Khodusov V.D. On the use of statistical theory for the calculation of the production cycle [K voprosu ispol'zovaniya statisticheskoy teorii dlya rascheta proizvodstvennogo tsikla], *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu [Journal of Kharkov National University]*, Kharkov, 2009, no.868, pp. 112-118.
- Razumov I. M., Shukhhalter L. YA. Organization and planning of machine-building production [Organizatsiya i planirovaniye mashinostroitel'nogo proizvodstva], *Mashinostroyeniye [Mechanical engineering]*, 1974, p 592.
- Vlasov V.A., Tikhomirov I. A., Loktev I. I. Modeling of technological processes of manufacturing of industrial products [Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya promyshlennoy produktsii], Tomsk, 2006, p 300.
- Voronina Ye. D. Management of flexible production systems [Upravleniye gibkimi proizvodstvennymi sistemami], *Mashinostroyeniye [Mechanical engineering]*, 1987, p. 368.
- Seraya O.V. Multidimensional models of logistics in conditions of uncertainty [Mnogomernyye modeli logistiki v usloviyakh neopredelennosti], Kharkov, 2010, p. 512.
- Khodusov V.D., Pihnastyi O.M. Use of physical kinetics methods to study the fluctuation of the flow line parameters [Ispol'zovaniye metodov fizicheskoy kinetiki dlya issledovaniya kolebaniya parametrov potochnoy linii], *Vostochno-yevropeyskiy fizicheskii zhurnal [Eastern European Physics Journal]*, Kharkov, 2014, vol.1, no.4, pp. 88-95.
- Seraya O.V., Klimenko T.A., Samorodov V.B. Selection of the optimization criterion in the multi-nomenclature inventory management problem [Vybor kriteriya optimizatsii v zadache upravleniya mnogonomenklaturnymi zapasami], *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University]*, 2009, no.45, pp. 31-34.
- Zaruba V. YA., Pihnastyi O.M., Khodusov V.D. Modeling the movement of an object of labor along a technological route in a two-coordinate description [Modelirovaniye dvizheniya predmeta truda po tekhnologicheskomu marshrutu v dvukhkoordinatnom opisani], *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu „Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut”. Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Tekhnichnyy prohres ta efektyvnist' vyrobnystva. [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Collected Works. Series: Technological progress and efficiency.]*, Kharkov, 2015, no.60(1169), pp. 39-45.

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ОДНОУЗЛОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛИНИИ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ

О.М. Пигнастый, Р.О. Корсун

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

**Аннотация.** В данной статье основное внимание уделяется модели производственной линии конвейерного типа. Записана в одномоментном приближении система уравнений для модели конвейерной линии с постоянной скоростью движения предметов труда и получено ее решение в аналитическом виде, что позволило рассчитать параметры системы в произвольный момент времени. Показано, что решение определяется видом начальных и граничных условий. Получено выражение для расчета производственного цикла конвейерной линии.

**Ключевые слова:** поточная линия, PDE-модель, предмет труда, система управления, технологический процесс, полупроводниковое производство, модель конвейера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пигнастый О. М. Статистическая теория производственных систем. / О.М. Пигнастый. – Х.: Изд. ХНУ им. Каразина, 2007. – С. 388. –Available at: <https://goo.gl/dzceZk>
2. Armbruster D. A model for the dynamics of large queuing networks and supply chains. / D.Armbruster, P.Degond, C.Ringhofer – SIAM Journal on Applied Mathematics 83, 2006. – P. 896–920.
3. 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. –Available at: <https://goo.gl/dF18Kx>
4. Пигнастый О. М. О новом классе динамических моделей поточных линий производственных систем / О. М. Пигнастый // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Белгород: БГУ. - 2014. - № 31/1. - С. 147-157. –Available at: <https://goo.gl/IjFEsS>
5. Демуцкий В. П. Теория предприятия: Устойчивость функционирования массового производства и продвижения продукции на рынок / В. П. Демуцкий, В. С. Пигнастая, О. М. Пигнастый. – Харьков: ХНУ, 2003. – 272 с. doi: 10.13140/RG.2.1.5018.7123. – Available at: <https://goo.gl/FGryP6>
6. Пигнастый О.М. Сетевая модель многоресурсной поточной производственной линии / О.М. Пигнастый // Научный результат. Серия «Информационные технологии». Белгород: БГУ. –2016. – Т.1. №2. – С.31–45.
7. Armbruster D. A Continuum Model for a Re-entrant Factory / D. Armbruster, D. Marthaler, C. Ringhofer, K. Kempf, Jo T.-C. // Operations research. – 2006. – VOL 54 – №5. – P. 933 - 950
8. Colombo R., Guerra G., Herty M., Sachers V.. Modeling and optimal control of networks of pipes and canals. Technical report, Milano Bicocca University, 2008. – Available at: <https://arxiv.org/abs/0802.3613v1>
9. Ходусов В.Д. 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. –Available at: <https://goo.gl/Qw6qqK>
10. Пигнастый О. М. К вопросу использования статистической теории для расчета производственного цикла / В. Д. Ходусов, О. М. Пигнастый // - Вісник Харківського національного університету. - Харків: ХНУ. - 2009. - №868, вип.3/43/ Сер. "Фізична". с.112-118.
11. Разумов И. М. Организация и планирование машиностроительного производства / И. М. Разумов, Л. Я. Шухгалтер – М.: Машиностроение, 1974. – 592 с.
12. Власов В.А. Моделирование технологических процессов изготовления промышленной продукции / В. А. Власов, И. А. Тихомиров, И. И. Локтев.–Томск, 2006. – 300 с.
13. Управление гибкими производственными системами / Е. Д. Воронина и др. / общ. ред. С. В. Емельянов. – М.:Машиностроение, 1987. – 368 с.
14. Серая О.В. Многомерные модели логистики в условиях неопределенности / О.В.Серая – Х.: ФОП Стеценко, 2010, 512 с.
15. Ходусов В.Д., Пигнастый О.М. Использование методов физической кинетики для исследования колебания параметров поточной линии // - Восточно-европейский физический журнал. - Харьков: ХНУ. - 2014. - Vol.1. –№4. – С. 88-95.
16. Серая О.В. Выбор критерия оптимизации в задаче управления многономенклатурными запасами/ О.В.Серая, Т.А.Клименко, В.Б.Самородов // Вестник ХНАДУ. - 2009. - Вып. 45. - С. 31-34.
17. Заруба В. Я. Моделирование движения предмета труда по технологическому маршруту в двухкоординатном описании / В. Я. Заруба О. М. Пигнастый, В. Д. Ходусов // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Серія: Технічний прогрес та ефективність виробництва. – Харків: НТУ „ХПІ”. - 2015. - № 60 (1169) – С. 39-45.

УДК 681.518

**ПРИМЕНЕНИЕ ОПТО-ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
БОРТОВЫМ СРЕДСТВОМ ИНДИКАЦИИ**

**Ю.Н. Чуднов<sup>1</sup>, А.В. Гурьянов<sup>2</sup>, А.В. Шукалов<sup>3</sup>, И.Э. Шультайс<sup>4</sup>, М.А. Трушкин<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup>АО «ОКБ «Электроавтоматик», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1,3,4,5</sup>Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> chudnov85@gmai.com

**Аннотация.** В статье кратко рассмотрены вопросы, связанные с анализом тенденций развития многофункциональных цветных индикаторов летательных аппаратов и существующих средств управления индикацией, в том числе, инфракрасные сенсорные панели. Рассмотрен способ повышения энергоэффективности инфракрасных сенсорных панелей. Рассмотрен вопрос побочного облучения рядом расположенных инфракрасных фотоприемников. Приведены способы устранения побочного освещения рядом расположенных фотоприемников.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, многофункциональный цветной индикатор, инфракрасная сенсорная панель, диод, фотоприемник.

### Введение

Современные технологии, получившие широкое распространение в мире, стали неотъемлемой частью в жизнедеятельности человека. Они помогают в повседневной жизни, в планировании предстоящих задач, в поиске оптимальных маршрутов и т.п. Например, один смартфон, обладая малыми габаритами, способен совместить в себе возможности множества устройств (телефона, компьютера и т.д.).

Технологический прогресс не обошел стороной и авиапромышленный комплекс. Известно, что авиастроительная отрасль не является самой массовой в мире, в связи с этим, она заимствует наиболее проверенные технологии из других отраслей, таких как автомобилестроение, информационные технологии, медицина и т.п. Например, ЖК-экраны, получившие широкое распространение, позволили создать на их базе многофункциональные цветные индикаторы (МФЦИ) [1–8]. Появление МФЦИ стало отличной заменой ранее использовавшимся на борту летательных аппаратов (ЛА) электронно-лучевым цветным индикаторам (ЭЛЦИ) [9] на базе электронно-лучевых трубок, которые обладали целым рядом критических недостатков, таких как наличие лучевой трубки, оказывающее негативное влияние на геометрию конструкции ЭЛЦИ, ненадежные высоковольтные источники питания и т.д.

На сегодняшний день два–три МФЦИ в состоянии заменить набор аналоговых приборов ранее использовавшихся на борту летательного аппарата. Таким образом, пилоту современного ЛА не требуется тратить лишнее время на визуальный поиск необходимого прибора, а достаточно нажатием определенной кнопки приборной панели МФЦИ вывести на экран требуемую информацию (индикационный кадр). Такой подход повышает оперативность управления воздушным судном.

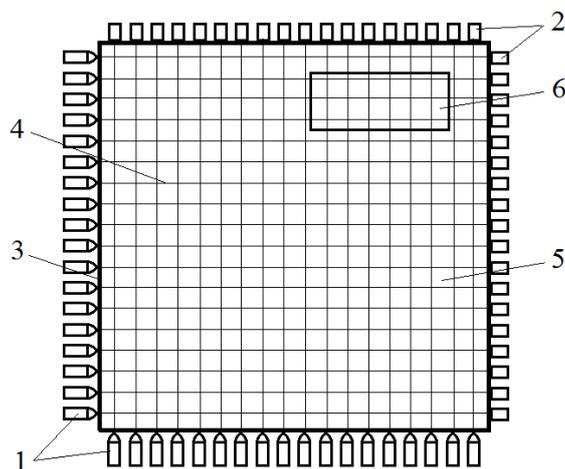
В зависимости от реализованных на борту ЛА ап-

паратно-программных средств МФЦИ способен решать задачи, связанные с приемом, обработкой и отображением всех необходимых навигационно-пилотажных параметров, в том числе, метеообстановку, с отображением предупреждающей информации, контролем силовой установки, проверкой работы самолетных систем (топливной, электроснабжения, кислородной и т.д.), с отображением положений управляющих поверхностей, механизацией, шасси и люков, сигнализацией о выходе за пределы эксплуатационных ограничений, отображением карты контрольной проверки и разделом руководства по летной эксплуатации (РЛЭ) по особым ситуациям и т.д.

### Актуальность работы

Исходя из известной тенденции развития цветных индикаторов [10], заключающейся в стремлении к сокращению их количества на приборной панели ЛА, вероятно, в ближайшее время появится один МФЦИ, обладающий большим (например, пятнадцатидюймовым) ЖК-экраном или экраном, работающим на иных принципах. Такой индикатор должен будет обладать дополнительными функциями, например, возможностью перемещения по полю его экрана элементов индикации (окон, ярлыков, маркеров и т.п.), воздействовать на элементы индикации прикосновением пальца пилота гражданской авиации и т.д. Следовательно, возникает потребность в средствах, способных обеспечить управление этими перспективными индикаторами.

В современных многофункциональных цветных индикаторах переключение отображаемой информации происходит с помощью кнопок управления индикацией. В связи с этим отсутствует возможность перемещения элементов индикации по экрану, что ограничивает функциональные возможности МФЦИ. Наличие дублирующего органа управления индикацией МФЦИ, получивший широкое распространение в России и за



**Рис. 1. ИК сенсорная панель: 1 – горизонтальные и вертикальные излучатели ИК света (диоды); 2 – горизонтальные и вертикальные ИК фотоприемники; 3 – рама; 4 – сетка из сфокусированных ИК лучей; 5 – экран индикатора; 6 – элемент индикации**

рубежом, пульт управления и индикации (ПУИ) [11] также не позволяет перемещать объекты индикации по экрану индикатора.

Применение графического пользовательского интерфейса в современных индикаторах, аналогичного интерфейсу, применяемому в системах персональных компьютеров, позволяет воздействовать на элементы индикации в виде условных символов (иконок, ссылок и т.п.), посредством использования специального манипулятора (устройства управления курсором). Устройством управления курсором выполняется наведение специального маркера (курсора) на элемент индикации с последующей активацией соответствующей функции управления. Таким образом, происходит вызов на экран нужного формата изображения, вызова конкретного меню и выполнения выбора, изменения масштаба карты и т.д. К устройствам управления курсором относятся компьютерная мышь, сенсорная панель, джойстик и трэкбол. В связи с самопроизвольной подвижностью и возможностью падения компьютерная мышь не нашла своего применения на борту ЛА.

Принцип действия выше перечисленных устройств управления курсором различен. Сенсорная панель, представляющая собой чувствительную пластину, работающую от контакта пальца пилота с ней. Имеющиеся в ее составе встроенные чувствительные элементы воспринимают расположение пальца, по отношению к которому позиционируется курсор на экране индикатора. Перемещение курсора при работе с джойстиком происходит с помощью подвижной ручки. Курсор движется в сторону наклона этой ручки. Трэкбол имеет в составе своей конструкции вращающийся шар. Вращение этого шара приводит в действие курсор.

Одним из перспективных средств управления индикацией на борту ЛА может стать инфракрасная (ИК) сенсорная панель [12, 13]. На рис. 1 приведена ИК сенсорная панель, работающая в режиме создания сетки из сфокусированных ИК лучей. Она включает в себя горизонтальные и вертикальные ИК излучатели (диоды) 1 и фотоприемники 2, установленные на раме 3. Сфокусированные лучи ИК света, исходящие из ИК диодов, попадают точно в расположенные напротив фотоприемники. В связи с этим образуется ИК сетка 4 перед экраном индикатора 5, невидимая человеческому глазу.

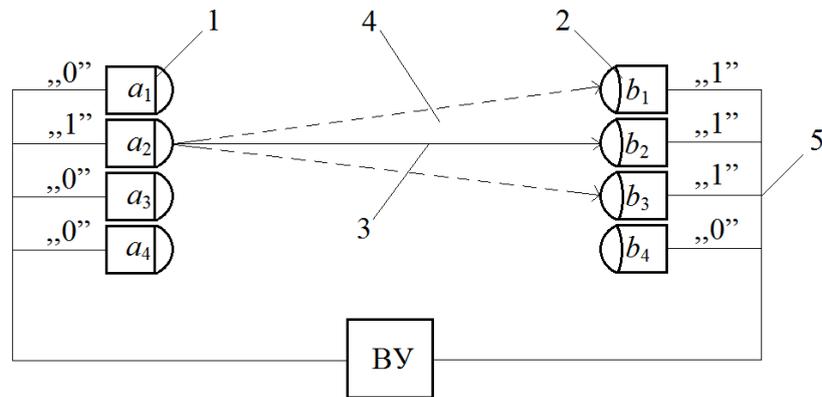
Принцип работы ИК сенсорной панели заключается в одновременном прерывании горизонтальных и вертикальных лучей ИК света. В результате прерывания горизонтального и вертикального ИК луча в «точке пересечения» аппаратным способом в автоматическом режиме определяется место воздействия и совмещается с элементом индикации 6, расположенным в этой области экрана.

### Основные проблемы и решения

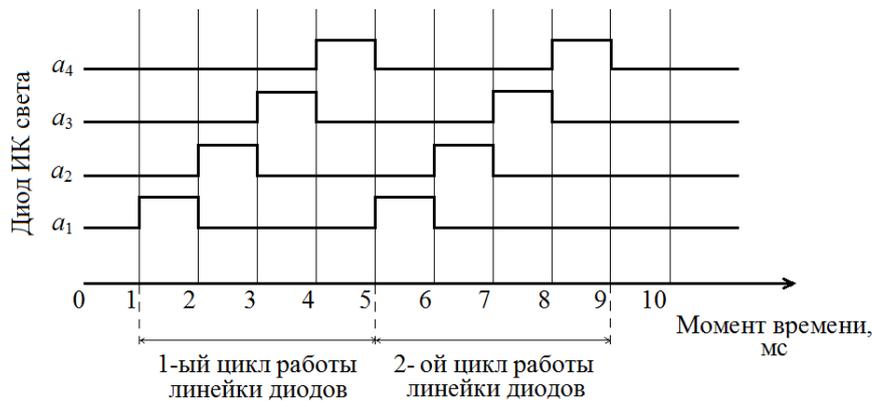
Разрешение ИК сенсорной панели зависит от расстояния между параллельно проходящими лучами ИК света. Чем меньше промежуток между световыми потоками, тем выше разрешение сенсорной панели. Следовательно, точнее будут определяться координаты объектов индикации на поле экрана МФЦИ. Однако, слишком близкое расположение ИК фотоприемников, может привести к ложному срабатыванию тех из них, сигнал от которых должен прерываться в процессе работы пилота гражданской авиации с сенсорной панелью. Это обусловлено фактором их засветки из-за расфокусированного луча ИК света.

На рис. 2 приведена работа ИК сенсорной панели на примере четырех горизонтальных пар ИК излучатель, фотоприемник ( $a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3, a_4b_4$ ). Как видно из рисунка ИК диод  $a_2$  излучает луч ИК света в расположенный напротив фотоприемник  $b_2$ , что обозначено наличием у них логических „1”. Излучатели  $a_1, a_3$  и  $a_4$  находятся в выключенном состоянии, что отмечено логическим „0”. Соответственно фотоприемники  $b_1, b_3$  и  $b_4$  должны также иметь логические „0”. Вопреки этому, приемники ИК света  $b_1$  и  $b_3$  обладают логическими „1”. Это происходит из-за несфокусированности светового потока. Следовательно, эта проблема приведет к некорректной работе сенсорной панели, так как при воздействии на луч ИК света (его прерывании), в момент управления индикацией, фотоприемник, засвеченный отклоненными лучами параллельно идущего светового потока, будет передавать ложное срабатывание в вычислительный узел (ВУ).

Для улучшения оптических свойств излучателей ИК сенсорной панели возможно применение элементов фокусировки на базе линз. Оптические линзы позволят



**Рис. 2. Засветка рядом расположенных фотоприемников, возникновение ложных сигналов:**  
**1 – ИК излучатели (диоды); 2 – фотоприемники (фотодиоды); 3 – луч ИК света; 4 – область не сфокусированного светового потока; 5 – интерфейс; ВУ – вычислительный узел**



**Рис. 3. Временная диаграмма срабатывания диодов ИК света**

сфокусировать луч ИК света, исходящий от диода, точно в расположенный напротив фотоприемник. Это позволит избежать рассеивания светового потока, исключив вероятность возбуждения, близко расположенных друг от друга фотоприемников. Однако такой способ решения проблемы ложного срабатывания фотодиодов обладает недостатками. Во-первых, применение дополнительных средств фокусировки приведет к увеличению массогабаритных характеристик сенсорной панели, что нежелательно для применения на борту воздушного судна. Во-вторых, оптические линзы могут повредиться или полностью разрушиться (например, от вибрации, образующейся в момент полета ЛА), что приведет к искажению исходящего луча ИК света.

Учитывая недостатки выше описанного способа борьбы с засветкой рядом расположенных фотоприемников с помощью фокусировки светового потока оптическими элементами, предлагается альтернативный способ в виде программы обработки, заложенной в ВУ. Функциональные задачи данной программы заключаются в выполнении последовательного включения излучателей линейки ИК диодов и в определении истинных срабатываний фотоприемников. В этом случае излучатели ИК света должны работать в импульсном режиме.

На примере части ИК панели, состоящей из четырех горизонтальных пар: излучатель и фотоприемник ( $a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3, a_4b_4$ ) рассмотрим данный способ. В табл. 1 приведены запрограммированные в ВУ моменты времени срабатывания излучателей ИК света в цикле

работы линейки диодов и запрограммированные истинные моменты времени срабатывания фотоприемников.

При активации ИК сенсорной панели излучатели  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$ , начинают поочередно (согласно установленной программе) включаться в импульсном режиме, отправляя лучи ИК света в расположенные напротив фотоприемники, соответственно  $b_1, b_2, b_3$  и  $b_4$ . Если срабатывание фотодиода совпадает с моментом времени, заложенным в программу, то оно считается истинным, если же нет, то ложным (происходящим в результате попадания световых лучей в фотоприемник от рядом проходящих потоков ИК света).

К пояснению сказанного приведены временная диаграмма срабатывания излучателей ИК света (рис. 3) и временная диаграмма срабатывания фотоприемников, включая засвеченные (рис. 4).

В табл. 2 согласно рассматриваемому примеру, включающему в себя линейку из четырех работающих последовательно ИК излучателей, и парных им фотоприемников. Продолжительность работы диодов составляет два цикла. Моменты времени включения ИК излучателей и моменты времени истинных срабатываний фотоприемников, приведены в табл. 1.

В табл. 2 можно увидеть ячейки, выделенные жирными линиями. Таким способом отмечено, что данные моменты времени срабатывания фотодиодов совпадают с запрограммированными, соответственно считаются истинными, все остальные ложными и игнорируются программой.

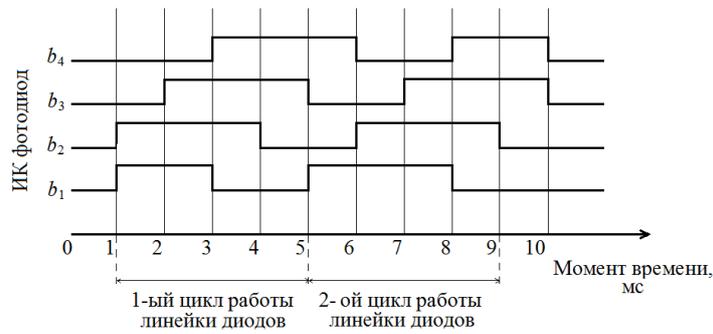


Рис. 4. Временная диаграмма срабатывания ИК фотодиодов, включая засвеченные

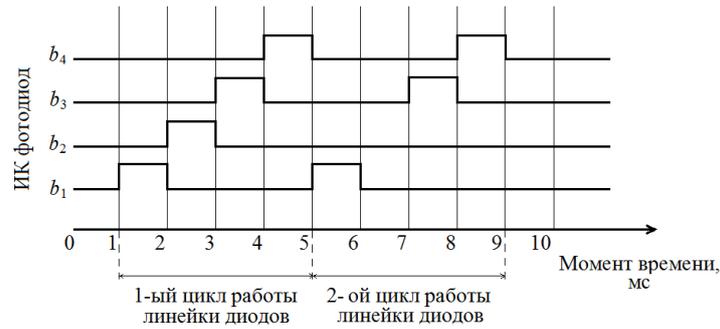


Рис. 5. Временная диаграмма, при несрабатывании фотоприемника в установленное время

Таблица 1

Пример таблицы с запрограммированным временем срабатывания ИК диодов и фотоприемников

ИК излучатель	Запрограммированные моменты времени срабатывания ИК излучателей в цикле работы линейки диодов, мс	ИК фотоприемник	Запрограммированные истинные моменты времени срабатывания ИК фотоприемников в цикле работы линейки фотоприемников, мс
1-й цикл			
$a_1$	1	$b_1$	1
$a_2$	2	$b_2$	2
$a_3$	3	$b_3$	3
$a_4$	4	$b_4$	4
2-ой цикл			
$a_1$	5	$b_1$	5
$a_2$	6	$b_2$	6
$a_3$	7	$b_3$	7
$a_4$	8	$b_4$	8

Таблица 2

Распознавание истинных сигналов, поступающих от ИК фотоприемников

Диод	Моменты времени срабатывания ИК излучателей в цикле работы линейки диодов ИК света, мс	Фотоприемник	Истинные и ложные срабатывания фотоприемников, согласно моментам времени включения диодов ИК света (выделенные ячейки являются истинными срабатываниями ИК фотоприемников)							
			1-ый цикл работы линейки диодов				2-ой цикл работы линейки диодов			
			1 мс	2 мс	3 мс	4 мс	5 мс	6 мс	7 мс	8 мс
$a_1$	1, 5	$b_1$	1	1	0	0	1	1	0	0
$a_2$	2, 6	$b_2$	1	1	1	0	1	0	1	0
$a_3$	3, 7	$b_3$	0	1	1	1	0	1	1	1
$a_4$	4, 8	$b_4$	0	0	1	1	0	0	1	1

Наличие логического „0” у фотоприемника  $b_2$  на 6 мс говорит о том, что в этот момент времени луч ИК света, выпущенный из излучателя  $a_2$ , был прерван. Следовательно, в ВУ это будет считаться как воздействие на элемент индикации.

### Выводы

При фокусировке ИК излучения с помощью оптических линз можно устранить фактор попадания отклоненных лучей в рядом расположенные фотоприемники. Однако, это приведет к нежелательному увеличению геометрических параметров сенсорной панели.

Применение программы, заложенной в ВУ и способной различать истинные срабатывания ИК фотоприемников от ложных, позволит решить проблему засветки рядом расположенных фотодиодов, без увеличения массогабаритных характеристик ИК сенсорной панели.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Парамонов П.П., Копорский Н.С., Видин Б.В., Жаринов И.О. Многофункциональные индикаторы на плоских жидкокристаллических панелях: наукоемкие аппаратно-программные решения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – № 3 (14). – С. 238–245.
2. Парамонов П.П., Бобцов А.А., Видин Б.В., Сабо Ю.И., Шек-Иовсепяц Р.А., Жаринов И.О., Жаринов О.О. Проектирование систем бортового информационного обмена и их функциональных элементов: монография. Тула: Изд-во Гриф и К, 2010. – 208 с.
3. Markelov V.V., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O., Ershov A.N. Constructing and displaying the trajectory path on the aircraft on-board cockpit multi-function displays. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol.9, no.21, art.95219, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i21/95219.
4. Kostishin M.O., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Zharinov O.O., Ershov A.N. Colorimetric features of design and production of aircraft display systems in the product lifecycle. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol.9, no.29, art.99451, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i29/99451.
5. Korobeynikov A.G., Fedosovsky M.E., Maltseva N.K., Baranova O.V., Zharinov I.O., Gurjanov A.V., Zharinov O.O. Use of Information Technologies in Design and Production Activities of Instrument-Making Plants. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol.9, no.44, art.104708, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i44/104708.
6. Zharinov I.O., Zharinov O.O., Kostishin M.O. The research of redundancy in avionics color palette for on-board indication equipment. *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*, Omsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, Russia, Omsk, May 21-23, 2015, pp. 7147313, DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147313.
7. Gatchin Y.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Zharinov O.O. Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems. *Modern Applied Science*, 2015, vol.9, no.5, pp.197-210, DOI: 10.5539/mas.v9n5p197.
8. Aleksanin S.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Perezyabov O.A., Zharinov O.O. Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol.10, no.17, pp.7494-7501.
9. Копорский Н.С., Видин Б.В., Жаринов И.О. Бортовые средства отображения информации современных пилотируемых летательных аппаратов // В кн. *Современные технологии* / Под ред. С.А. Козлова, В.Л. Ткалич. СПб: ГУ ИТМО, 2004, с. 154–165.
10. Кучерявый А.А. Бортовые информационные системы: Курс лекций / А.А. Кучерявый; под ред. В.А. Мишина и Г.И. Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 504 с.
11. Жаринов И.О., Емец Р.Б. Индикационное оборудование в авиации XXI-го века // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. – 2003. – № 5 (11). – С. 193–195.
12. Пат. 2534366 РФ. МПК G06F 3/042. Инфракрасная сенсорная панель, поддерживающая функцию мультитач / Чой Дай-Кю – Заявлено 27.04.2012; Опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33. – 20 с.
13. Чуднов Ю.Н., Чуднова Н.Н., Шультайс И.Э. и др. Перспективное оптическое устройство для управления индикацией // *Высокие технологии в современной науке и технике: труды V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов*. – Томск, 2016. – С. 252–253.

---

## THE OPTICAL-ELECTRONICS TECHNOLOGIES APPLICATION FOR THE FLIGHT INSTRUMENTS HANDLING

Yu.N. Chudnov<sup>1</sup>, A.V. Gurianov<sup>2</sup>, A.V. Shukhalov<sup>3</sup>, I.E. Shultays<sup>4</sup>, M.A. Trushkin<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3,4,5</sup>JSC «Experimental designing bureau «Elektroavtomatika», Saint-Petersburg, Russia  
<sup>1,3,4,5</sup>ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** This article describes briefly possible problems related to the aircraft color multi-function displays development tendency analysis and the existing technologies to be applied for handling these displays including the infrared sensor panels. A way how to increase the infrared sensor panels energy efficiency has been studied. The problem of the undesired illumination from the near-placed infrared photoreceivers has been studied. Some ways how to compensate for the undesired emanation from the near-placed photoreceivers have been given.

**Keywords:** aircraft, color multi-function display, infrared sensor panel, diode, photoreceiver.

### REFERENCES

1. Paramonov P.P., Koporskiy N.S., Vidin B.V., Zharinov I.O. Multi-functional displays on the plane LCD panels: scientific software and hardware solutions, *Published in magazine ITMO University Science and Technical Messenger*, 2004, № 3 (14), pp. 238–245.
2. Paramonov P.P., Bobtsov A.A., Vidin B.V., Sabo Yu.I., Shek-Iovsepyants R.A., Zharinov I.O., Zharinov O.O. *The on-board informative exchange systems and their functional components designing: monography*, City Tula: Publishing company Griph and K, 2010, 208 p.
3. Markelov V.V., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O., Ershov A.N. Constructing and displaying the trajectory path on the aircraft on-board cockpit multi-function displays. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol.9, no.21, art.95219, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i21/95219.
4. Kostishin M.O., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Zharinov O.O., Ershov A.N. Colorimetric features of design and production of aircraft display systems in the product lifecycle. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol.9, no.29, art.99451, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i29/99451.
5. Korobeynikov A.G., Fedosovsky M.E., Maltseva N.K., Baranova O.V., Zharinov I.O., Gurjanov A.V., Zharinov O.O. Use of Information Technologies in Design and Production Activities of Instrument-Making Plants. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol.9, no.44, art.104708, DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i44/104708.
6. Zharinov I.O., Zharinov O.O., Kostishin M.O. The research of redundancy in avionics color palette for on-board indication equipment. *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*, Omsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, Russia, Omsk, May 21-23, 2015, pp. 7147313, DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147313.
7. Gatchin Y.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Zharinov O.O. Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems. *Modern Applied Science*, 2015, vol.9, no.5, pp.197–210, DOI: 10.5539/mas.v9n5p197.
8. Aleksanin S.A., Zharinov I.O., Korobeynikov A.G., Perezyabov O.A., Zharinov O.O. Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol.10, no.17, pp.7494-7501.
9. Koporskiy N.S., Vidin B.V., Zharinov I.O. The informative flight instruments for the modern piloted aircrafts, *Published in book Modern Technologies*, Saint-Petersburg, ITMO University, 2004, pp. 154–165.
10. Kucheryaviy A.A. *The on-board informative systems: Lessons course, 2nd edition, completed and reworked*, City Ulianovsk: University UIGTU, 2004, page 504 p.
11. Zharinov I.O., Emets R.B. Indicative displays for the twenty-first century aviation, *Published in magazine ITMO University Science and Technical Messenger*, 2003, № 5 (11), pp. 193–195.
12. The patent number 2534366 Rus. The patent international code G06F 3/042. The infrared sensor panel which supports Multi-touch function / Choi Dai-Kyu – Claimed 27.04.2012; Published 27.112014, Bulletin № 33, page 20 p.
13. Chudnov Yu.N., Chudnova N.N., Shultays I.E. and others. The perspective optical gadget for handling the indication, *Trudy Vth International Conference for Young Scientists "High technology: research and applications-2016"*, Tomsk, 2016, pp. 252–253.

## ОБЗОР МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ ИНСТРУМЕНТА ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Г.Н. Крахмалев<sup>1</sup>, Д.И. Петрешин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> genakr73@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены методы калибровки центра инструмента, закрепляемого на установочном фланце промышленного робота. Представлены математические модели систем управления промышленных роботов, позволяющие выполнить калибровку. Калибровка инструмента выполняется при оснащении промышленного робота новым инструментом. Первый этап калибровки состоит в определении центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в *TCP*. Данная статья посвящена исследованию первого этапа калибровки инструмента.

**Ключевые слова:** промышленные роботы, калибровка инструмента, математические модели, системы управления.

### Введение

Комплекс мероприятий по оснащению робота новым инструментом предусматривает выполнение процедуры калибровки этого инструмента перед его использованием в работе. Это необходимо для того чтобы система управления промышленного робота могла правильно выполнять перемещение инструмента в рабочем пространстве робота. Для этого математические модели, описывающие преобразования координат в данной модели робота, должны быть дополнены математической моделью сформированной для установленного инструмента. Математические модели, описывающие преобразования координат для инструмента создаются системой управления автоматически при выполнении процедуры калибровки инструмента перед вводом нового инструмента в эксплуатацию. Созданные математические модели сохраняются в постоянной памяти контроллера системы управления в библиотеке инструмента с указанием логического имени, присвоенного данному инструменту. В последующем при программировании движения промышленного робота системе управления указывается устанавливаемый на роботе инструмент путём присвоения специальному параметру логического имени выбранного инструмента.

Процедура калибровки инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в *TCP*. Данная статья посвящена исследованию первого этапа калибровки инструмента, а именно разработке математических моделей систем управления промышленных роботов, предназначенных для калибровки центра инструмента (*TCP*).

Промышленные роботы представляют собой многозвенные механические системы с последовательной структурой, звенья которых образуют друг с другом кинематические пары пятого класса и моделируются твёрдыми телами. Такие многозвенные механические системы называют манипуляционными системами.

Пример манипуляционной системы промышленного робота *KUKA KR6*, имеющего шесть степеней подвижности, представлен на рис. 1. На рисунке изображены контуры звеньев и шарниры с указанием осей относительного вращения соединяемых ими звеньев. К последнему звену манипуляционной системы промышленного робота может быть жестко присоединён инструмент. Для этого в конструкции последнего звена предусматривается присоединительный фланец. На рис.1 присоединительный фланец изображен в форме диска, внутри которого помещен шарнир, ось вращения которого перпендикулярна плоскости диска. В качестве инструмента может быть использовано захватное устройство, сварочная или измерительная головки, а также, например, мотор-шпиндель.

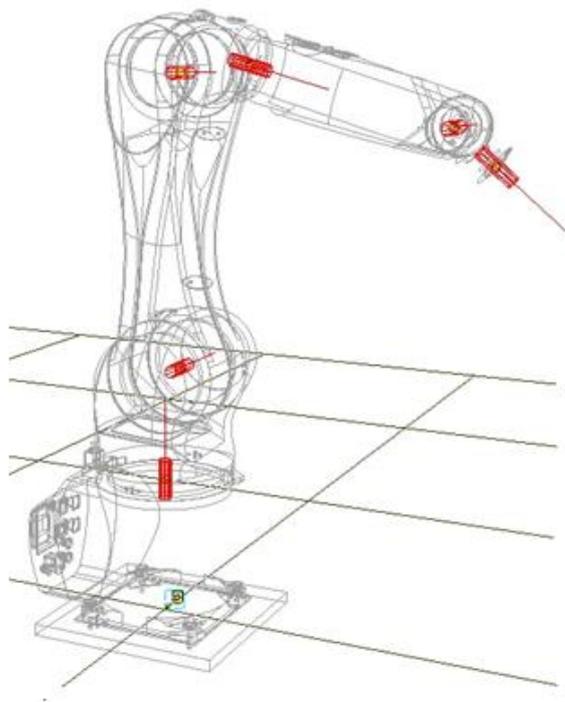


Рис. 1. Манипуляционная система промышленного робота *KUKA KR6*

## Системы координат

Для описания относительного движения звеньев манипуляционных систем используют математические модели, обеспечивающие преобразование координат между системами координат, связываемыми с каждым звеном и системой координат, связываемой с неподвижным основанием. Существуют разные методы задания связанных со звеньями систем координат и построения математических моделей, реализующих преобразования координат между ними, например, метод Денавита – Хартенберга [1], или метод двух связываемых с каждым звеном систем координат [2]. Не вникая в отличительные особенности предложенных методов достаточно отметить, что оба эти метода сводятся к составлению матриц, выполняющих преобразования однородных координат вида:

$$A_{0,k} = A_{0,1}A_{1,2}\dots A_{(i-1),i}\dots A_{(r-1),k} = \prod_{i=1}^k A_{(i-1),i}, k=1,\dots,n, \quad (1)$$

где  $A_{(i-1),i}$  – матрица размера  $4 \times 4$ , выполняющая преобразование однородных координат из системы  $S_i$ , связанной с  $i$ -м звеном в систему  $S_{(i-1)}$ , связанную с  $(i-1)$ -м,  $A_{0,k}$  – матрица размера  $4 \times 4$ , выполняющая преобразование однородных координат из системы  $S_k$ , связанной с  $k$ -м звеном в систему  $S_0$ , связанную с неподвижным основанием,  $n$  – количество звеньев в манипуляционной системе робота.

Для произвольной точки  $M$ , выбранной на  $k$ -м звене, матрицы преобразования однородных координат (1) позволяют получить простую форму математической модели, реализующей эти преобразования [2]

$$r_M^{(0)} = A_{0,k} r_M^{(k)}, \quad (2)$$

где  $r_M^{(0)} = [x_M^{(0)} \ y_M^{(0)} \ z_M^{(0)} \ 1]^T$  – расширенный радиус-вектор точки  $M$  в неподвижной системе  $S_0$ ,  $r_M^{(k)} = [x_M^{(k)} \ y_M^{(k)} \ z_M^{(k)} \ 1]^T$  – расширенный радиус-вектор точки  $M$  в связанной системе  $S_k$  (рис. 2).

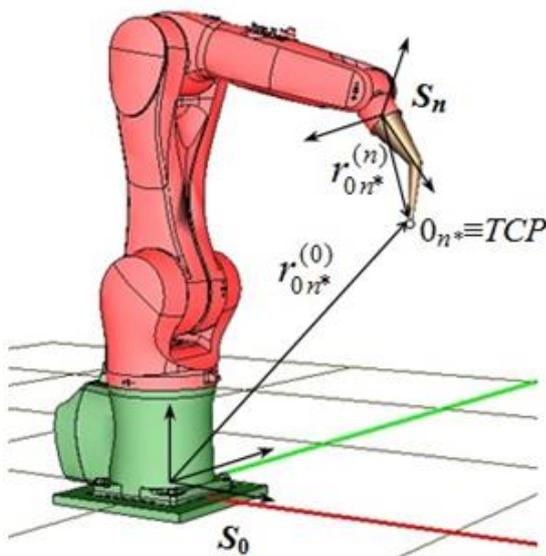


Рис. 2. Системы координат  $S_0 \equiv WORLD$ ,  $S_n \equiv FLANGE$  и точка  $0_n^* \equiv TCP$

В системах управления промышленных роботов неподвижную систему координат  $S_0$  именуют *WORLD* и называют мировой системой координат. Начало системы координат  $S_n$ , связанную с конечным звеном, помещают в центр установочного фланца, а ось  $Z_n$  этой системы координат направляют перпендикулярно плоскости фланца вдоль оси его вращения. Систему координат  $S_n$  именуют *FLANGE*. Точку центра инструмента обозначают  $0_n^*$  и именуют *TCP*. Система координат  $S_n^* \equiv TOOL$  с началом в точке  $0_n^* \equiv TCP$ , связывается с инструментом, присоединяемым к фланцу.

## Методы калибровки TCP

На практике используется несколько методов калибровки центра инструмента (*TCP*).

### Прямой ввод

По данному методу калибровки в систему управления вводят значения  $(x_{0n^*}^{(n)} \ y_{0n^*}^{(n)} \ z_{0n^*}^{(n)})$ , являющиеся координатами точки  $0_n^* \equiv TCP$  в системе координат  $S_n$ . Задача может быть решена двумя способами (рис. 2).

Первый способ основывается на данных, полученных из конструкторской документации, в частности из 3D-модели калибруемого инструмента.

Второй способ является метрологическим и основывается на прямых измерениях. Поскольку при установке инструмента точка центра установочного фланца, являющаяся началом системы координат *FLANGE*, оказывается закрытой и недоступной для прямого измерения, то измеряются координаты  $(x_{0n^*}^{(0)} \ y_{0n^*}^{(0)} \ z_{0n^*}^{(0)})$ , являющиеся координатами точки  $0_n^* \equiv TCP$  в неподвижной системе координат  $S_0 \equiv WORLD$ . Искомые координаты могут быть получены вычислением на основе математической модели полученной преобразованием выражения (2)

$$r_{0n^*}^{(n)} = A_{0,n}^{-1} r_{0n^*}^{(0)}. \quad (3)$$

### Калибровка базовым инструментом

Данный метод позволяет выполнить калибровку нового инструмента на основе использования другого уже откалиброванного базового инструмента.

Последовательность действий:

1. На установочном фланце закрепляется ранее откалиброванный базовый инструмент.
2. Системе управления промышленного робота указывается логическое имя базового инструмента. Выполняется ввод данных о *TCP* базового инструмента.
3. *TCP* базового инструмента подводится к заостренному наконечнику, закреплённому в рабочем пространстве робота и в памяти контроллера системы управления сохраняются данные соответствующие значениям шарнирных координат.
4. Базовый инструмент отводится от наконечника и снимается. Устанавливается новый инструмент.
5. *TCP* нового инструмента подводится к тому же наконечнику и в памяти контроллера системы управления сохраняются данные соответствующие новым значениям шарнирных координат.

6. Выполняется расчёт данных для *TCP* нового инструмента. Данные сохраняются с указанием логического имени нового инструмента.

Математическая модель, обеспечивающая расчет данных для *TCP* нового инструмента по методу калибровки базовым инструментом может быть получена на основе рассмотрения уравнений, полученных на основе (2), для случая подвода к заостренному наконечнику *TCP* базового и нового инструментов (рис. 2).

Для базового инструмента в точке контакта его *TCP* с закрепленным наконечником может быть составлено уравнение:

$$r_{0n^*}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n^*}^{(n)}. \quad (4)$$

Для нового инструмента в точке контакта его *TCP* с закрепленным наконечником может быть составлено уравнение:

$$r_{0n^*}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0,n} {}^{(2)}r_{0n^*}^{(n)}. \quad (5)$$

Левые части уравнений (4) и (5) равны, так как представляю радиус-вектор одной и той же точки (острия наконечника) в неподвижной системе координат  $S_0 \equiv WORLD$ , следовательно, равны и правые части этих уравнений:

$${}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n^*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0,n} {}^{(2)}r_{0n^*}^{(n)}. \quad (6)$$

Окончательно математическая модель для калибровки центра инструмента промышленных роботов по методу калибровки базовым инструментом будет иметь вид:

$${}^{(2)}r_{0n^*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0,n}^{-1} {}^{(1)}A_{0,n} {}^{(1)}r_{0n^*}^{(n)}, \quad (7)$$

где  ${}^{(2)}r_{0n^*}^{(n)} = [x_{0n^*}^{(n)} \ y_{0n^*}^{(n)} \ z_{0n^*}^{(n)} \ 1]^T$  – расширенный радиус-вектор, содержащий координаты *TCP* нового инструмента в системе координат  $S_n \equiv FLANGE$ .

### Метод двух подходов

По методу двух подходов *TCP* калибруемого инструмента дважды подводится к закрепленному наконечнику с разных сторон.

Последовательность действий:

1. На установочном фланце закрепляется калибруемый инструмент.

2. *TCP* калибруемого инструмента подводится к заостренному наконечнику, закреплённому в рабочем пространстве робота и в памяти контроллера системы управления сохраняются значения шарнирных координат соответствующих данному положению манипуляционной системы робота.

3. Инструмент отводится и снова поводится к наконечнику с другого направления. Сохраняются значения шарнирных координат, соответствующих новому положению манипуляционной системы робота.

4. Выполняется расчёт данных для *TCP* калибруемого инструмента. Данные сохраняются с указанием логического имени инструмента.

Математическая модель, обеспечивающая расчет данных для *TCP* калибруемого инструмента по методу двух подходов может быть получена на основе рассмотрения уравнений, полученных на основе (2), для двух случаев подвода *TCP* калибруемого инструмента к закреплённому наконечнику.

Для первого подхода

$$r_{0n^*}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0,n} r_{0n^*}^{(n)}. \quad (8)$$

Для второго подхода

$$r_{0n^*}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0,n} r_{0n^*}^{(n)}. \quad (9)$$

Разность уравнений (8) и (9) имеет вид

$$\left( {}^{(2)}A_{0,n} - {}^{(1)}A_{0,n} \right) r_{0n^*}^{(n)} = 0. \quad (10)$$

Элементы матриц составляющих левую часть уравнения (10) могут быть вычислены по зафиксированным значениям шарнирных координат в первом и втором подходах манипуляционной системы робота. Разность этих матриц представляет собой матрицу известной структуры

$$A = {}^{(2)}A_{0,n} - {}^{(1)}A_{0,n}, \quad (11)$$

позволяющей представить уравнение (10) в виде

$$A r_{0n^*}^{(n)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{0n^*}^{(n)} \\ y_{0n^*}^{(n)} \\ z_{0n^*}^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} = 0. \quad (12)$$

Матрично-векторное уравнение (12) может быть приведено к уравнению

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{0n^*}^{(n)} \\ y_{0n^*}^{(n)} \\ z_{0n^*}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

разрешимому относительно искомых координат  $\begin{pmatrix} x_{0n^*}^{(n)} & y_{0n^*}^{(n)} & z_{0n^*}^{(n)} \end{pmatrix}$ .

Уравнения (11) и (13) представляют собой математическую модель для калибровки центра инструмента промышленных роботов по методу двух подходов. Координаты *TCP* калибруемого инструмента в системе координат  $S_n \equiv FLANGE$  могут быть определены численно, например, одним из методов решения систем линейных уравнений.

Метод двух подходов может быть повторён несколько раз, а полученные результаты усреднены. Это позволит снизить влияние ошибки, связанной с неточностью позиционирования *TCP* калибруемого инструмента на закрепленном наконечнике.

### Заключение

В статье выполнен обзор основных методов калибровки центра инструмента (*TCP – Tool Center Point*) промышленных роботов, применяемых на практике. Представлены математические модели для реализации этих методов в системах управления промышленных роботов. Близкие по данной теме вопросы рассмотрены в работах [3–5].

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шахинпур, М. Курс робототехники / М. Шахинпур. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
2. Крахмалев, О.Н. Математическое моделирование динамики манипуляционных систем промышленных роботов и кранов-манипуляторов: монография / О.Н. Крахмалев. – Брянск: БГТУ, 2012. – 200 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. Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т16. – №7. – С. 491–496.
5. Крахмалев, О.Н. Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами / О.Н. Крахмалев, Л.И. Блейшмидт // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – №1. – С.29–36.

---

## OVERVIEW OF CALIBRATION METHODS FOR INDUSTRIAL ROBOTS

G.N. Krakhmalev<sup>1</sup>, D.I. Petreshin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

**Abstract.** The methods of calibration of the tool center fixed on the mounting flange of an industrial robot are considered. Mathematical models of control systems for industrial robots that allow to perform calibration are presented. The tool is calibrated when the industrial robot is equipped with a new tool. The first step is to define the tool center point (TCP). The second step is to determine the orientation of the Cartesian coordinate system associated with the tool. The origin of this coordinate system is placed in the TCP. This article is devoted to the study of the first phase of the calibration tool.

**Keywords:** industrial robots; tool calibration; mathematical models; control systems.

## REFERENCES

1. Shakhinpur M. Kurs robototekhniki [Course of Robotics], Moscow, Mir, 1990, 527 p.
2. Krakhmalev O.N. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki manipulyatsionnykh sistem promyshlennykh robotov i kranov-manipulyatorov: monografiya [Mathematical modeling of dynamics of manipulation systems of industrial robots and cranes-manipulators: monograph], Bryansk, BGTU, 2012, 200 p.
3. Krakhmalev O.N. Tochnost' upravlyaemogo 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., Petreshin D.I. Korrektsiya integral'nykh otклонений dvizheniya ispolnitel'nykh mekhanizmov promyshlennykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov [Correction of integral deviations in the motion of executive mechanisms of industrial robots and multi-axis machines], Mechatronics, automation, control, 2015, Vol. 16, no. 7, pp. 491–496.
5. Krakhmalev O.N., Bleyshmidt L.I. Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges, Allerton Press, Inc., New York, USA: Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2014, Vol. 43, no. 1, pp. 22–28.

## АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПРИ КОРРЕКТИРОВАНИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

М.С. Бундур<sup>1</sup>, Н.А. Пелевин<sup>2</sup>, В.А. Прокопенко<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> mmfgak@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены особенности расчета параметров коррекции  $RC$  цепью шпиндельного гидростатического подшипника для тяжелого станочного модуля при различных технологических режимах его работы. Разработана программа, позволяющая выполнять построение градиентов запаса устойчивости по фазе и логарифмического декремента колебаний. Предложена методика определения значений гидравлической емкости и сопротивления, основанная на совместном анализе критериев оценки качества системы автоматического регулирования гидростатического подшипника по градиентам.

**Ключевые слова:** гидростатический подшипник, металлорежущий станок, приведенная масса, динамическое качество, запас устойчивости по фазе, логарифмический декремент колебаний, коррекция, колебательность.

Постоянный рост требований, предъявляемых промышленностью к показателям точности и производительности, приводит к тому, что современные металлорежущие станки (МРС) становятся всё более сложными и совершенными машинами, насыщенными различными устройствами и системами автоматизации, измерительными средствами, сервомеханизмами различных типов. Проблема повышения точности, производительности, стабильности и долговечности всегда была основной как при проектировании, так и при эксплуатации станков [1]. Одним из наиболее эффективных средств на пути совершенствования МРС, повышения их производительности и точности является улучшение качества конструкции их отдельных устройств и, в частности, шпиндельных узлов (ШУ), являющихся одним из важнейших составных элементов любого МРС.

Для современных тяжелых МРС таких, как модуль ЛР400ПМФ-4, имеющих в ШУ в качестве опор гидростатические подшипники (ГСП) [2,3] важную задачу представляет выбор параметров корректирующей  $RC$  цепи [4] ( $R_A$  – гидравлическое сопротивление,  $C_A$  – гидравлическая емкость), связанный с необходимостью выполнения обработки как на тихоходных тяжело нагруженных режимах  $n_{\min}=100\dots 500$  об/мин, так и на чистовых быстроходных операциях до  $n_{\max}=3150$  об/мин. Использование средств компьютерного моделирования, прежде всего на базе программного комплекса MATLAB, позволяет проводить многопараметрический анализ динамической модели ГСП в том числе с учетом ее нелинейности [5].

Параметры  $RC$ -цепи могут определяться несколькими способами, наибольшими возможностями из которых обладают расчет и построение градиента запаса по фазе  $\Delta\varphi$ , который получается с помощью разработанной программы  $p\_FG$  [6]. На рис. 1, а представлены зависимости  $\Delta\varphi=grad(C_A; R_A)$  с кривыми уровня  $\Delta\varphi=40^\circ$  и  $\Delta\varphi=55^\circ$  для указанной выше модели МРС при  $n_{\min}$  и приведенной массы  $M_{пр}=50$  кг, соответствующей

отсутствию выдвигания шпинделя.

Кривые уровня обозначают границы [7] различного динамического качества:  $\Delta\varphi < 40^\circ$  – низкое;  $40^\circ < \Delta\varphi < 55^\circ$  – невысокое;  $\Delta\varphi \geq 55^\circ$  – высокое. Для точки 3 (рис. 1, а) параметры  $R_A=15,0 \cdot 10^9$  Па·с/м<sup>3</sup>,  $C_A=5,3 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/Па при реализации гидроемкости с помощью стандартного сильфона [6] типоразмера 11x10x0,12 – 36НХТЮ ГОСТ 21482-76 [8] в области кривой  $\Delta\varphi=55^\circ$ , соответствующей системе автоматического регулирования (САР) высокого качества [7], обеспечивают неколебательный переходный процесс (ПП) САР (рис. 2), в отличие от исходного некорректированного варианта ШУ. Как установлено ранее [9], при энергетических процессах, происходящих на режимах  $n_{\max}$  снижается вязкость рабочей жидкости и обусловленное этим появление колебательности у ПП.

Для повышения динамического качества в таких условиях может быть использован стандартный сильфон с  $C_A=21,0 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/Па (18x10x25 – 36НХТЮ ГОСТ 21482-76) [8]. При этом кривая градиента с  $\Delta\varphi=55^\circ$  имеет для  $n_{\min}$  два варианта исполнения коррекции (рис. 1, а): точка 1 и точка 2. Варианту 2 (точка 2 на рис. 1, а) соответствует неколебательный ПП в отличие от варианта 1 (рис. 2), где проявляется колебательность САР. Таким образом, при одинаковой величине критерия  $\Delta\varphi$  динамические свойства ГСП существенно отличаются, что делает необходимым проведения соответствующей дополнительной проверки, которая может выполняться различными способами.

Один из них – это расчет и построение упомянутых ПП, которые позволяют в основном качественно сравнивать рассматриваемые варианты коррекции. К его недостаткам относится необходимость в наличии соответствующих программ и возможность только относительного сравнения динамического качества САР.

В соответствии с другим способом оценка производится при построении асимптотических логарифмических амплитудно-частотных характеристик (АЛЧХ),

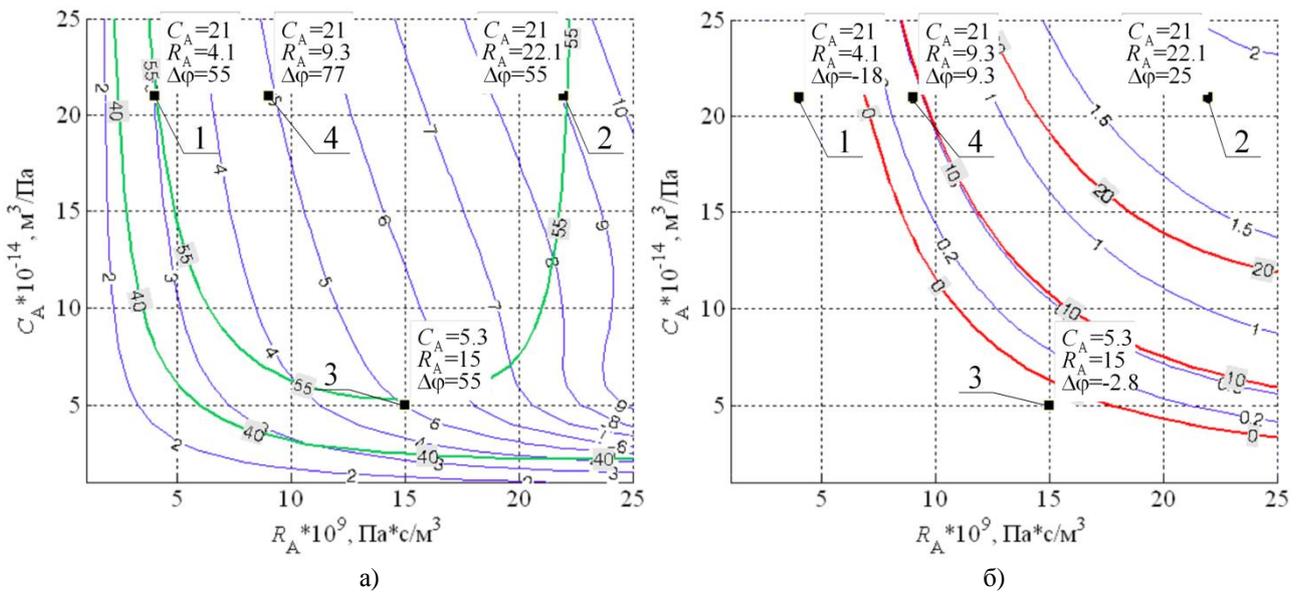


Рис. 1. Зависимости  $\Delta\varphi = \text{grad}(C_A; R_A)$  и  $\lambda = \text{grad}(C_A; R_A)$  для:  
 а)  $n_{\min}$ ,  $M_{\text{пр}}=50$  кг; б)  $n_{\max}$ ,  $M_{\text{пр}}=300$  кг

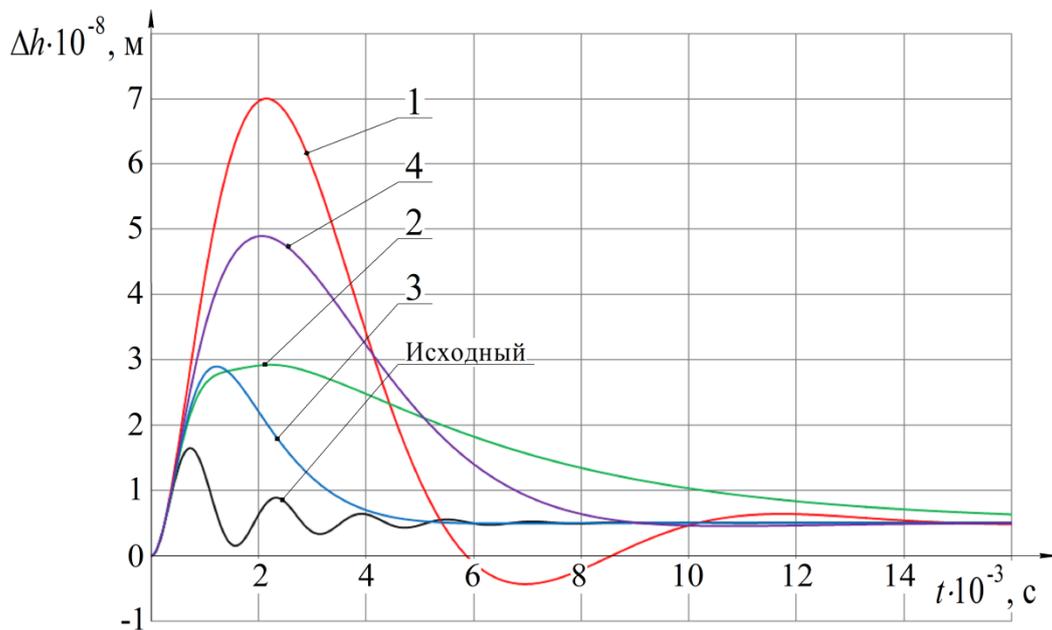


Рис. 2. Переходные процессы для  $R_n=100$  Н при  $n=0$  об/мин и  $M_{\text{пр}}=50$  кг

отличие которых проявляется в различных наклонах (-20 дБ/дек и -40 дБ/дек) ломаных до частоты среза ( $\omega_{\text{ср}}$ ) и в сочетании различной протяженности участков с наклоном -20 дБ/дек до  $\omega_{\text{ср}}$  и величины самой  $\omega_{\text{ср}}$  (рис. 3). Для ломаной 1 пересечение ломаной с осью частот происходит с наклоном -40 дБ/дек и САР является колебательной. При этом для ломаных 2 и 3 участок с наклоном -20 дБ/дек до  $\omega_{\text{ср}}$  имеет различную протяженность.

Для ломаной 2 протяженность участка с указанным наклоном до  $\omega_{\text{ср}}$  больше чем для ломаной 3 (соответствующей меньшему значению  $R_a$ ), что свидетельствует о лучших динамических показателях соответствующей САР. При таком способе возможна только качественная оценка вариантов.

Осуществить количественную оценку вариантов можно при расчете коэффициента колебательности  $M$  [10] для САР по АЛЧХ используя зависимость [11]:

$$M = \left( 1 - \frac{1}{T \omega_{\text{ср}}} \right)^{-1},$$

где,  $T$  – постоянная времени соответствующая сопряженной частоте до  $\omega_{\text{ср}}$  каждой из АЛЧХ.

Однако не во всех случаях выполнен расчет  $M$ , так как необходимое пересечение на  $\omega_{\text{ср}}$  с наклоном -20 дБ/дек не всегда может быть обеспечено, например, как на рис. 3.

В результате выполнения исследований установлена возможность использования в качестве критерия количественной оценки динамического качества САР ГСП – логарифмического декремента колебаний ( $\lambda$ ). Особенность применения такого способа связана с тем, что определение  $\lambda$  по ПП невозможно при отсутствии его колебательности (например, кривая 3 на рис. 2). В этом случае для получения  $\lambda$  может быть использована ампли-

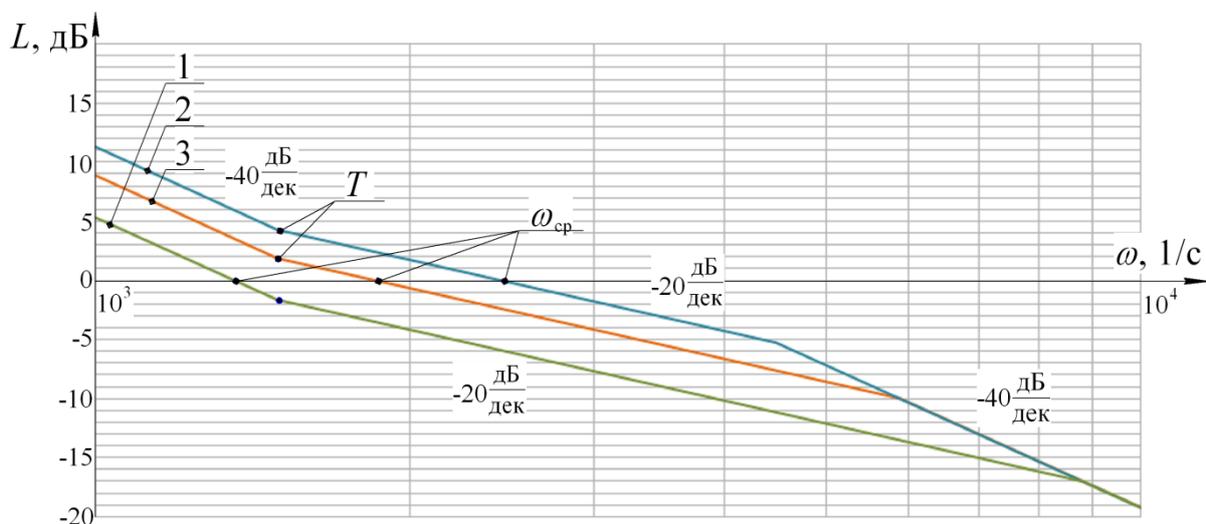


Рис. 3. Асимптотические ЛАЧХ для вариантов скорректированных ГСП

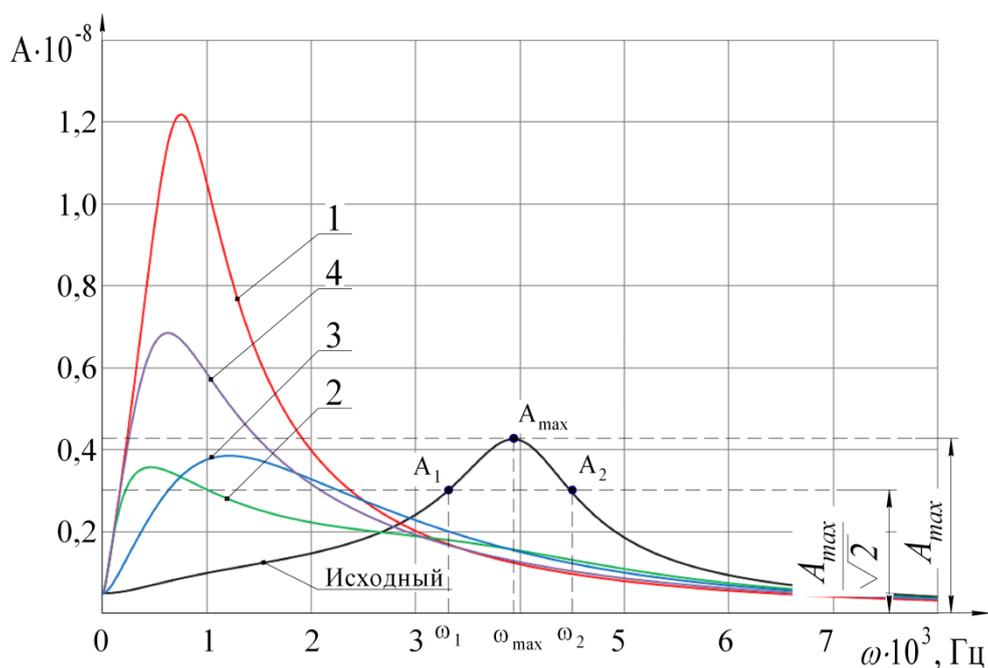


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики

тудно-частотная характеристика (АЧХ) САР. Для ее расчета и построения используется программа *p\_ACH*.

Алгоритм программы предусматривает ее работу следующим образом: после ввода исходных данных в программу (аналогично программам для других динамических расчетов [9]), исполняется подпрограмма расчета начальных параметров управляющего устройства *sp\_SC*. При этом все задаваемые и вычисляемые параметры записываются в соответствующие им массивы рабочего пространства MATLAB – *Workspace*.

Основу алгоритма составляет интерфейс расчета и линеаризации модели САР ГСП методом пространства состояний –  $[A, B, C, D]$  – с помощью стандартной функции *linmod* [12]. Применяя функцию *linmod* к исследуемой модели ГСП по следующей функции  $[A, B, C, D] = \text{linmod}('nl\_PP\_dd')$ , создаются массивы **A**, **B**, **C**, **D**. Модель 'nl\_PP\_dd' отличается от других [9] тем, что в ней вводятся вход и выход структуры. После этого по функции  $[\text{mag}, \text{phase}] = \text{bode}(\text{sys}, \text{w})$  (где,

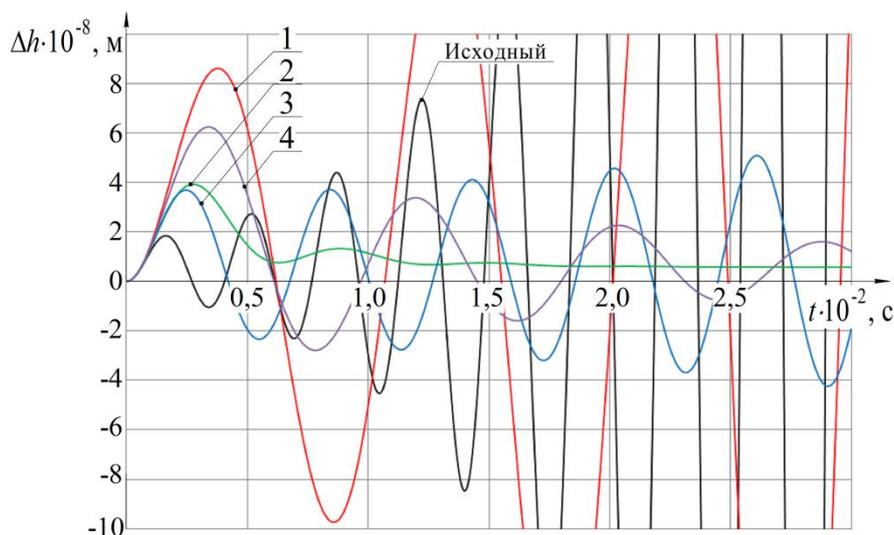
$\text{sys} = \text{ss}(A, B, C, D)$ , а **w** – исследуемый диапазон частот) рассчитывается диапазон значений амплитуд (**mag**) АЧХ. Далее в графическое окно MATLAB выводится АЧХ.

Полученные АЧХ для тех же выделенных для рис. 1, а вариантов и исходного показаны на рис. 4. По анализу амплитудного пика ( $A_{\max}$ ) АЧХ расчет  $\lambda$  производится в соответствии с известной зависимостью [13]  $\lambda = \pi(\omega_2 - \omega_1) / \omega_{\max}$ , где  $\omega_{\max}$  – частота, соответствующая  $A_{\max}$ ;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – частоты, соответствующие уровню  $A = A_{\max} / \sqrt{2}$  [10].

Для возможности выполнения оценки динамического качества по  $\lambda$  при выборе параметров корректирующих RC-цепей должны быть построены соответствующие кривые градиентов  $\lambda = \text{grad}(C_A; R_A)$ . Для этой цели была доработана используемая ранее для построения  $\Delta\varphi = \text{grad}(C_A; R_A)$  программа *p\_FG* [6]. Разработанная на ее основе программа *p\_GFL* позволяет вычислять массивы  $\Delta\varphi$  и  $\lambda$  для совместного их использования при построении градиентов. Алгоритм программы представ-

Результаты расчета параметров коррекции для САР ГСП

Условия расчета			$\Delta\phi$		$\lambda$	
Точки	$C_A, \text{ м}^3/\text{Па}$	$R_A, \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$	$n=0$ об/мин, $M_{\text{пр}}=50 \text{ кг}$	$n=3150$ об/мин, $M_{\text{пр}}=300 \text{ кг}$	$n=0$ об/мин, $M_{\text{пр}}=50 \text{ кг}$	$n=3150$ об/мин, $M_{\text{пр}}=300 \text{ кг}$
Исходный	–	–	16	-12,7	0,93	–
1	21	4,1	55	-18	3	–
2	21	22,1	55	25,0	9	1,85
3	5,3	15	55	-2,8	5,03	–
4	21	9,3	77,1	9,3	5	0,47

Рис. 5. Переходные процессы для  $R_b=100 \text{ Н}$  при  $n=3150 \text{ об/мин}$  и  $M_{\text{пр}}=300 \text{ кг}$ 

ляет собой циклический расчет параметров  $\lambda$  и  $\Delta\phi$  в зависимости от диапазонов  $C_A$ ,  $R_A$  и установленных для них шагов с формированием соответствующих массивов данных:  $\lambda$  (LL),  $\Delta\phi$  (FF),  $C_A$  (CA) и  $R_A$  (RA). В скобках приведены обозначения, принятые в MATLAB. Основу алгоритма составляют упомянутая программа  $p\_ACH$  и программа  $p\_LH$  [9] при исполнении которых, на каждом этапе расчета создаются массивы **mag**, **w** (со значениями амплитуды и частоты АЧХ) и **Pm** (по  $p\_LH$ , соответствующее значению  $\Delta\phi$ ).

Далее встроенными стандартными операторами MATLAB вычисляется максимальное значение  $\max(\mathbf{mag})$  и соответствующий этой ячейке индекс. По индексу из массива **w** определяется величина частоты  $\omega_{\max}$  соответствующая  $A_{\max}$ . Затем вычисляется расчетное значение амплитуды  $-A_{\max}/\sqrt{2}$ . По данной величине с помощью стандартных операторов находятся две ячейки в массиве **mag** со значениями наиболее близкими к расчетному. По индексам ячеек определяются соответствующие значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . После этого по упомянутой формуле рассчитывается величина  $\lambda$ . Построение объединенных градиентов осуществляется с помощью функций **hold on**, **contour(CA, RA, LL)** и **contour(CA, RA, FF)** с дополнительными настройками по толщине кривых, обозначению кривых, их количеству и цвету.

Для рассматриваемого ГСП полученные зависимости  $\lambda=\text{grad}(C_A; R_A)$  приведены совместно с кривыми  $\Delta\phi=\text{grad}(C_A; R_A)$  на рис. 1, где тонкими кривыми изображены линии уровня  $\lambda$ . Анализ представленных

материалов (рис. 1, а) показывает, что для точки 2 значение  $\lambda=9$ , что существенно больше, чем для точки 3 ( $\lambda=5$ ). Наименьшее значение ( $\lambda=3$ ) соответствует точке 1. Проверка для сравнения динамики в точке 4, где при  $C_A=21,0\cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$  значение  $\Delta\phi$  существенно превышает  $55^\circ$ , составляя около  $77^\circ$ , показывает по ПП (рис. 2), что динамическое качество САР, тем не менее не является наибольшим. Это же и без построения ПП подтверждает значение соответствующего  $\lambda=5$ . Сопоставление критериев  $\Delta\phi$  и  $\lambda$  в совокупности со значениями параметров коррекции приведено в таблице.

Худшими условиями работы ГСП является сочетание режимов при  $n_{\max}=3150 \text{ об/мин}$  и наибольшем значении  $M_{\text{пр}}=300 \text{ кг}$  [6]. Полученные для них кривые  $\Delta\phi=\text{grad}(C_A; R_A)$  и  $\lambda=\text{grad}(C_A; R_A)$  приведены на рис. 1, б. Они показывают, что работа ШУ без коррекции практически не возможна, а для рассмотренных вариантов RC-цепи работоспособным по критерию  $\Delta\phi$  является условие только для точки 2. При этом кривые градиента запаса по фазе находятся за пределами САР низкого качества [7]. Причем даже вариант, соответствующий точке 4, близок к границе устойчивости. Значения  $\lambda$  также в полной мере сказанное подтверждают (табл.).

Дополнительно построенные ПП показывают практическую приемлемость коррекции для условий точки 2 (рис. 5), так как собственная частота САР примерно на порядок превышает требуемое значение критерия виброустойчивости для ШУ [14]. Для точки 4 ПП колебательный и слабодемпфированный ( $\lambda=0,5$ ). ПП

для вариантов 1, 3 и исходного показывают, что САР неустойчива. Из этого следует, что наиболее удовлетворяющим вариантом по работоспособности является ГСП с параметрами коррекции  $R_A=22,1 \cdot 10^9$  Па·с/м<sup>3</sup>,  $C_A=21,0 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/Па.

Разработана для программного комплекса MATLAB программа для расчета и построения с учетом энергетических процессов градиентов  $\Delta\varphi=grad(C_A; R_A)$  и  $\lambda=grad(C_A; R_A)$  для возможности совместного анализа и количественного определения параметров RC-цепи в исследуемом диапазоне  $C_A$  и  $R_A$ . Справедливость выбора подтверждается расчетом соответствующих переходных процессов. Данную методику и программу можно рекомендовать для инженеров-конструкторов и технологов при модернизации и проектировании различных шпиндельных узлов с гидростатическими подшипниками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бушуев В.В., Кузнецов А.П., Сабиров Ф.С., Хомяков В.С., Молодцов В.В. Состояние и направления развития научных исследований в станкостроении // СТИН, № 11, 2015. С. 12-20.
2. Бушуев В. В. Гидростатическая смазка в станках – 2-е изд. М: Машиностроение, 1989. 176 с.
3. W. Brian Rowe. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design. Oxford: Elsevier, 2012. 334 pp.
4. Прокопенко В.А., Яцкевич А.А. Динамические характеристики ГСП тяжелых МРС. // В кн.: Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Л: ЛГТУ, 1990. 7-14 с.
5. Бундур М. С., Пелевин Н. А., Прокопенко В. А. Возможности применения системы MATLAB SIMULINK при моделировании систем управления гидростатическими подшипниками // Концепт. Современные научные исследования. - ART 55142. - URL: <http://e-konceplru/2014/55142.htm>, № 2, 2014.
6. Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Динамика высокоскоростных шпиндельных узлов тяжелого станочного оборудования // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Т. 238, № 1, 2016. С. 145-154.
7. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М: Машиностроение, 1983. 608 с.
8. Государственный стандарт союза СССР ГОСТ 21482-76 Сильфоны однослойные измерительные металлические. Технические условия. М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1976.
9. Пелевин Н.А. Компьютерное моделирование энергетических процессов в шпиндельных гидростатических подшипниках // КОМОД 2015: труды международной научно-технической конференции. 1-3 июля 2015 года, 2015. С. 74-82.
10. Бесекерский В.А., Попов Е. Н. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, пере раб. и доп. СПб: Изд-во «Профессия», 2003. 752 с.
11. Лещенко В.А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. М.: «Машиностроение», 1975. 288 с.
12. Brian D. Hahn, Daniel T. Valentine. Essential MATLAB® for Engineers and Scientists. Third edition ed. Oxford: Elsevier, 2007. 449 pp.
13. Определение динамических характеристик горизонтально-расточных станков (Тема 148-72). Отчет №528. Ленинград: ОКБС, 1972. 33 с.
14. Пуш А.В. Шпиндельные узлы. Качество и надежность. М: Машиностроение, 1992. 287 с.

## THE ANALYSIS OF CRITERIA FOR EVALUATION OF DYNAMIC QUALITY BY A CORRECTING OF HYDROSTATIC BEARINGS OF SPINDLE UNITS

M.S. Bundur<sup>1</sup>, N.A. Pelevin<sup>2</sup>, V.A. Prokopenko<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

**Abstract.** Features of calculation of parameters of correction of RC by a chain of the hydrostatic bearing for spindle unit for the heavy metal-cutting machine module are considered at various technological modes of its work. The program allowing to carry out creation of gradients of a phase margin and logarithmic decrement of fluctuations is developed. The technique of definition of values of hydraulic capacity and resistance based on the joint analysis of criteria for evaluation of quality of system of automatic control of the hydrostatic bearing on gradients is offered.

**Keywords:** hydrostatic bearing, metal-cutting machine, equivalent mass, dynamic quality, phase margin, logarithmic decrement of fluctuations, correction, oscillation.

#### REFERENCES

1. Bushuev V.V., Kuznecov A.P., Sabirov F.S., Homyakov V.S., Molodcov V.V. State and the directions of development of scientific research in machine-tool construction [Sostoyaniye i napravleniya razvitiya nauchnyh issledovaniy v stankostroenii], STIN [Russian Engineering Research], 2015, no. 11. pp. 12-20.
2. Bushuev V. V. Gidrostatischeckaya smazka v stankah [Hydrostatic lubricant in machines], SSSR, second edition, M: Mashinostroenie, 1989. 176 p.
3. W. Brian Rowe. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid

- 
- Bearing Design. Oxford: Elsevier, 2012. 334 pp.
4. Prokopenko V.A., Yackevich A.A. Dynamic characteristics of HSB of heavy metal-cutting machines [Dinamicheskie karakteristiki GSP tyazelykh MRS], V kn.: Progressivnye tehnologicheskie processy v mashinostroenii [In the book: Progressive technological processes in mechanical engineering]. L: LGTU, 1990. pp. 7-14.
  5. Bundur M. S., Pelevin N. A., Prokopenko V. A. Possibilities of use of the MATLAB SIMULINK system when modeling control systems of hydrostatic bearings [Vozmozhnosti primeneniya sistemy MATLAB SIMULINK pri modelirovanii sistem upravleniya gidrostaticheskimi podshipnikami] // *Koncept. Sovremennye nauchnye issledovaniya* [Concept. Modern scientific research], no. 2, 2014. Available at: <http://e-koncept.ru/2014/55142.htm> (accessed 1 July 2015).
  6. Bundur M.S., Pelevin N.A., Prokopenko V.A. Dynamics of high-speed spindle units of the heavy machine equipment [Dinamika vysokoskorostnykh shpindelnykh uzlov tyazelogo stanochnogo oborudovaniya] // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPBGPU* [St.Petersburg State Politechnical Universiti Journal], 2016, no. 1(238), pp. 145-154.
  7. Ivaschenko H.H. *Avtomaticheskoe regulirovanie. Teoriya i elementy sistem* [Automatic control. Theory and elements of systems], SSSR, M: Mashinostroenie, 1983. 608 p.
  8. Gosudarstvennyj standart sojuza SSSR GOST 21482-76 Sil'fony odnoslojnye izmeritel'nye metallicheskie. Tehnicheskie uslovija. [State standard of the union of the USSR of GOST 21482-76 Bellow valves single-layer measuring metal. Specifications], M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam, 1976.
  9. Pelevin N.A. Computer modeling of power processes in hydrostatic bearings of spindle unit [Kompyuternoe modelirovanie energeticheskikh processov v shpindelnykh gidrostaticheskikh podshipnikah], KOMOD 2015: trudy mejdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii [DRESSER of 2015: works of the international scientific and technical conference], 2015. pp. 74-82.
  10. Besekerskiy V.A., Popov E. N. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of systems of automatic control], fourth edition, Russia, SPb: Publ «Professiya», 2003. 752 p.
  11. Leschenko V.A. *Gidravlicheskie sledyaschie privody stankov s programmnyim upravleniem* [The hydraulic watching drives of machines with program control], M.: «Mashinostroenie», 1975. 288 p.
  12. Brian D. Hahn, Daniel T. Valentine. *Essential MATLAB® for Engineers and Scientists*. Third edition ed. Oxford: Elsevier, 2007. 449 pp.
  13. *Opredelenie dinamicheskikh karakteristik gorizontalnorastochnykh stankov (Tema 148-72)* [Definition of dynamic characteristics of horizontally boring machines (Subject 148-72)], Otchet no. 528. SSSR, L.: OKBS, 1972. 33 p.
  14. Push A.V. *Shpindelnye uzly. Kachestvo i nadejnost* [Spindle units. Quality and reliability], Russia, M: Mashinostroenie, 1992. 287 p.

УДК 004:37

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА  
«ПАСПОРТИЗАЦИЯ УЧЕБНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ»**

**В.Д. Тутарова<sup>1</sup>, И.Г. Зорина<sup>2</sup>, Т.О. Скачков<sup>3</sup>, О.А. Турбина<sup>4</sup>, И.О. Кожевников<sup>5</sup>**  
<sup>1,2,3,4,5</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»,  
Многопрофильный колледж,  
г. Магнитогорск, Россия

<sup>1</sup>vlasta\_dev@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен процесс разработки автоматизированной информационной системы «Паспортизация учебных помещений», целью которой является автоматизация процесса формирования паспорта учебного помещения для учебных заведений среднего профессионального образования для выявления соответствия помещений ФГОС при подготовке специалистов, по наличию материально-технической базы, обеспечивающей проведение всех видов лабораторных работ и практических занятий, дисциплинарной, междисциплинарной, модульной подготовки и учебной практики.

**Ключевые слова:** лещадность; анализ изображения; определение контуров; центробежные дробилки; анализ свойств материалов в потоке.

### Введение

В настоящее время уровень информатизации общества – это один из основных критериев оценки степени развития государства, важнейший фактор его экономического, политического и военного могущества. В связи с этим ведущие страны мира придают созданию информационной индустрии и использованию современных средств информационных технологий исключительно большое значение, направляя на решение этих задач громадные ресурсы и усилия [1].

Отечественная система образования стремительными шагами вливается в процесс создания современной национальной информационной среды, совершенствуя методы и модели педагогической практики, внедряя дистанционное обучение и повышая квалификацию преподавателей в области современных информационных технологий. Кроме того, повсеместное распространение средств современной вычислительной техники и развитие информационных технологий стимулируют разработку автоматизированных информационных систем для решения задач управления образованием. Умение воспользоваться всем вышеперечисленным определяет информационную культуру педагога.

Автоматизированные информационные системы – системы сбора, хранения, переработки, передачи и представления информации, базирующиеся на электронной технике и системах телекоммуникации. Их совершенствование и развитие оказывает существенное влияние на характер производства, научных исследований, образование, культуру, быт, социальные отношения и структуры. Это оказывает как прямое влияние на содержание образования, связанное с уровнем научно-

технического прогресса, так и косвенное, связанное с появлением новых информационных и производственных технологий, с появлением новых профессиональных умений и навыков, потребность в которых резко возрастает [2].

В соответствии с ФГОС образовательная организация, реализующая программы подготовки специалистов, должна располагать материально-технической базой, обеспечивающей проведение всех видов лабораторных работ и практических занятий, дисциплинарной, междисциплинарной и модульной подготовки, учебной практики, предусмотренных учебным планом образовательной организации. Материально-техническая база должна соответствовать действующим санитарным и противопожарным нормам. При этом в каждом ФГОС оговорен перечень кабинетов, лабораторий, мастерских и других помещений для организации учебного процесса.

### Постановка задачи

Учебное помещение – это помещение, оснащенное наглядными пособиями, учебным оборудованием, мебелью и техническими средствами обучения, в котором проводится учебная, факультативная и внеклассная работа со студентами в полном соответствии с действующими ФГОС СПО, учебными планами, основными профессиональными образовательными программами и программами подготовки квалифицированных рабочих, служащих [3].

Цель паспортизации помещений учебного заведения – проанализировать состояние помещения, его готовность к обеспечению требований стандартов образования, соответствия санитарно-

эпидемиологическим требованиям, требованиям пожарной безопасности, определить основные направления работы по приведению помещения в соответствие требованиям учебно-методического, материально-технического обеспечения образовательного процесса по реализуемым программам.

Обязательная паспортизация помещений аудиторного фонда учебного заведения разрабатывается в соответствии с действующим законодательством РФ:

- типовые положения об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении), утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 14 февраля 2008 г. № 71 и среднего профессионального образования (среднем специальном учебном заведении), утвержденное постановлением Правительства РФ от 18 июля 2008 г. № 543 [4,5];
- Закон РФ 29 декабря 2012 года N 273-ФЗ "Об образовании в Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями) [6];
- Федеральные государственные образовательные стандарты высшего и среднего профессионального образования;
- санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.4.2.2821-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях» (с изменениями и дополнениями) [7];
- Устав образовательной организации.

Паспортизация помещений учебного заведения проводится ежегодно в начале учебного года, результаты данной процедуры учитываются вручную в паспортах в бумажном виде.

В каждой образовательной организации создается своя форма паспорта аудитории, где, как правило, фиксируются такие характеристики, как информация о номере кабинета и его функциональном назначении; фамилия ответственного за кабинет; площадь кабинета; перечень имеющейся в нем мебели, оборудования, в том числе, компьютерного, приборов, технических средств, наглядных пособий, таблиц, карт, учебников, методических пособий и т. д. с указанием количества и инвентарных номеров.

Не всегда данное представление отражает в полной мере характеристику помещения и соответствие его назначению.

С целью рационального и эффективного использования рабочего времени ответственных за оформление данной документации, а также для унификации внешнего представления паспортов в Многопрофильном колледже ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» было принято решение разработать автоматизированную информационную систему (АИС) «Паспортизация учебных помещений», которая позволит хранить и редактировать информацию об аудиторном фонде, его материальном, техническом и эргономическом обеспечении, выполнять поисковые запросы административным работникам, формировать паспорта помещений в едином стиле, создавать отчеты. Сформированный паспорт должен проходить процедуру согласования и утверждения.

## Проектные решения

Были проанализированы процедура паспортизации учебных помещений и учитываемые характеристики при составлении паспортов на многочисленных примерах различных образовательных организаций, представляющие приказы, рабочие инструкции, положения о проведении паспортизации учебных помещений, наполнение самих паспортов и порядок ввода их в действие. На основе анализа разработана схема функционирования бизнес-процессов (рис. 1) после разработки и ввода АИС «Паспортизация учебных помещений» в эксплуатацию и структура паспорта, учитывающая основные характеристики помещения для представления его соответствия назначению (рис.2).

Для хранения большого объема информации была спроектирована база данных Passport, состоящая из 40 сущностей (рис.3).

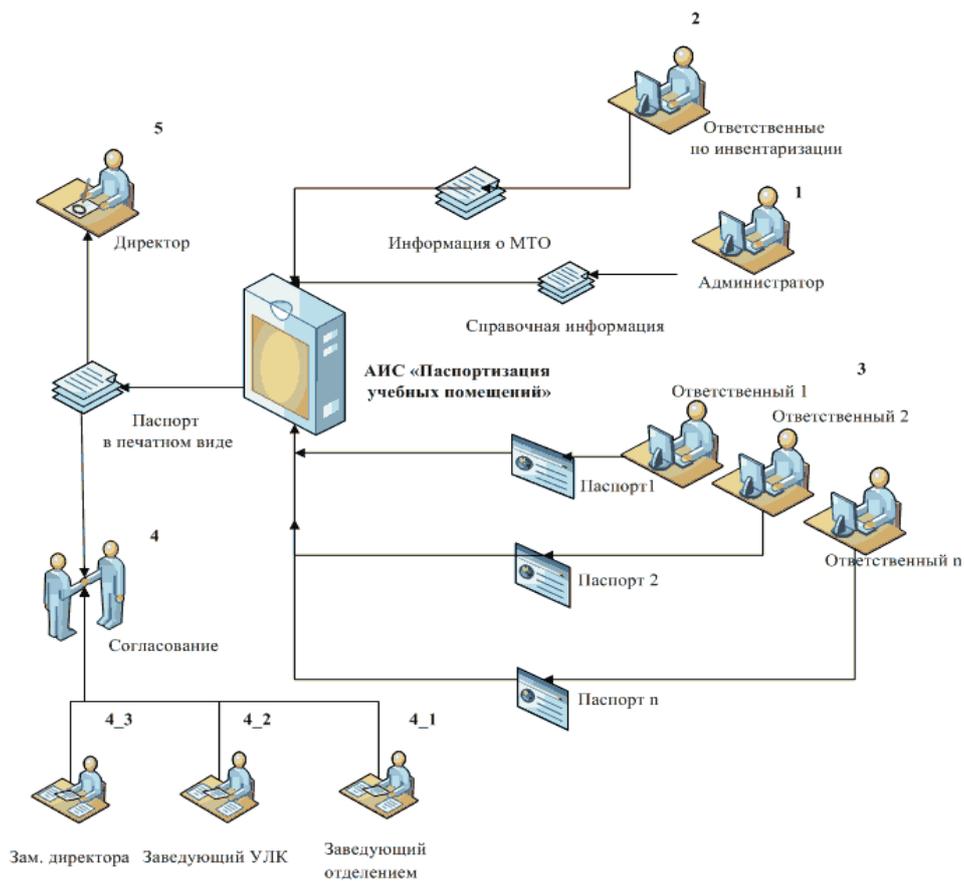
Система реализует сбор, хранение и обработку данных по основным характеристикам учебных помещений образовательной организации, имеет клиент-серверную архитектуру, работает в локальной сети университета, с использованием Intranet технологии.

## Реализация системы

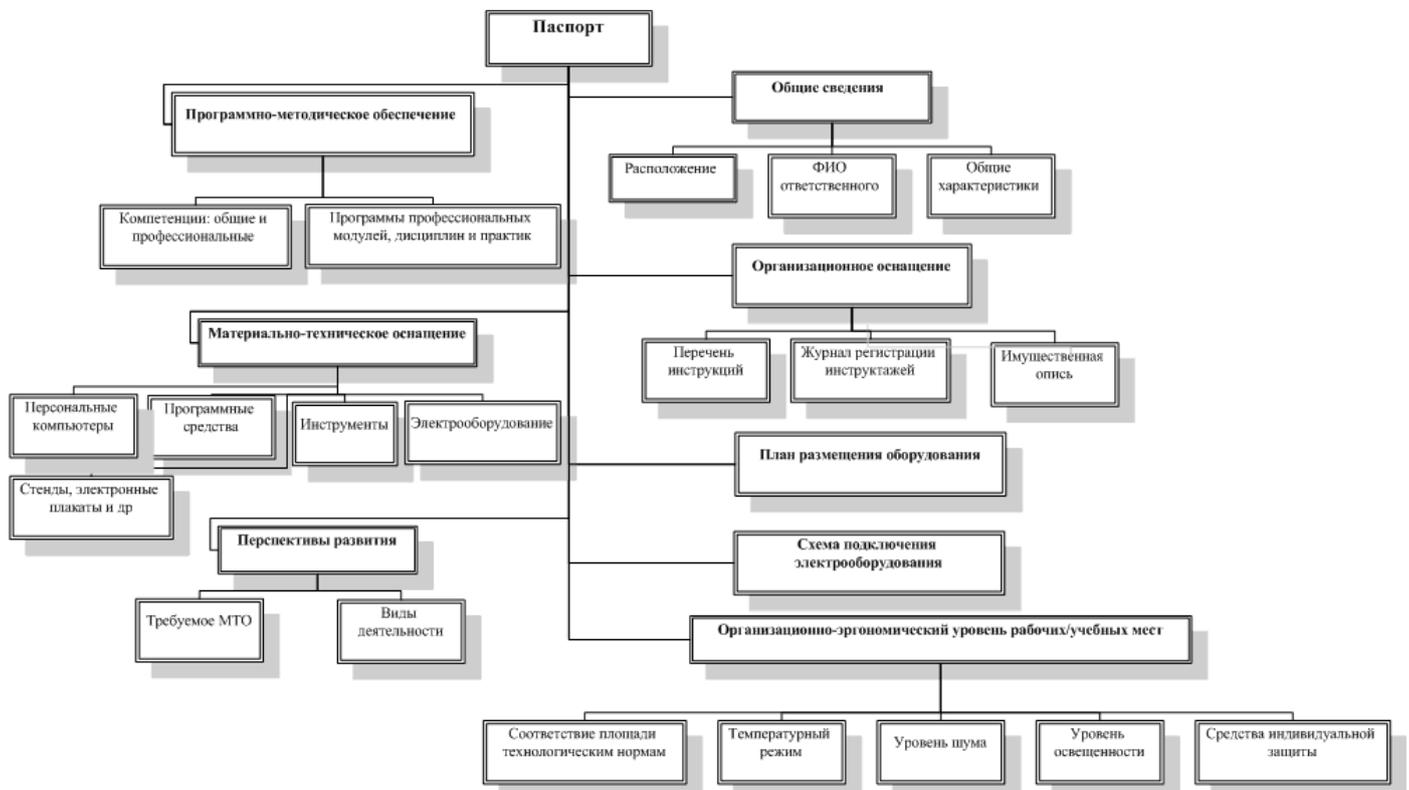
В качестве серверной платформы для предоставления веб-сервиса в локальной сети используется OpenServer 5.2.5 с многофункциональным, удобным продуманным интерфейсом, обладающим мощными возможностями по администрированию и настройке компонент. На сервере локальной сети размещена база данных Passport, созданная средствами MySQL 5.5.50, обеспечивающая хранение больших объемов информации, ее обработку и представление пользователям в сетевом режиме. Для написания кода на скриптовом языке общего назначения php, прототипно-ориентированном сценарном языке программирования js, стандартизированном языке разметки документов html и языке структурированных запросов sql был использован уникальный редактор JetBrains PhpStorm 2016.2.1. Планы размещения оборудования и схемы подключения электрооборудования были подготовлены в системе автоматизированного проектирования Компас3D-V14.

Для обеспечения безопасности и разграничения доступа данная система содержит аутентификацию и авторизацию. Для аутентификации пользователя вводится имя и пароль, после чего ему предоставляется вход в систему. После того, как подсистема произвела аутентификацию пользователя, она определяет набор, разрешенных ему действий для доступа к данным, а именно:

- ответственные за помещение имеют доступ к заполнению и редактированию паспорта только закрепленной за ними распоряжением директора лаборатории/мастерской/кабинета;
- ответственные по инвентаризации – права на редактирование, добавление и удаление информации о МТО;
- заведующий учебно-лабораторным комплексом (УЛК) – полный доступ к информации в АИС, формирование поисковых запросов для составления отчетной документации;
- администратор – полный доступ к системе.



**Рис.1. Схема взаимодействия бизнес-процессов при паспортизации учебных помещений**



**Рис.2. Структура паспорта учебного помещения**

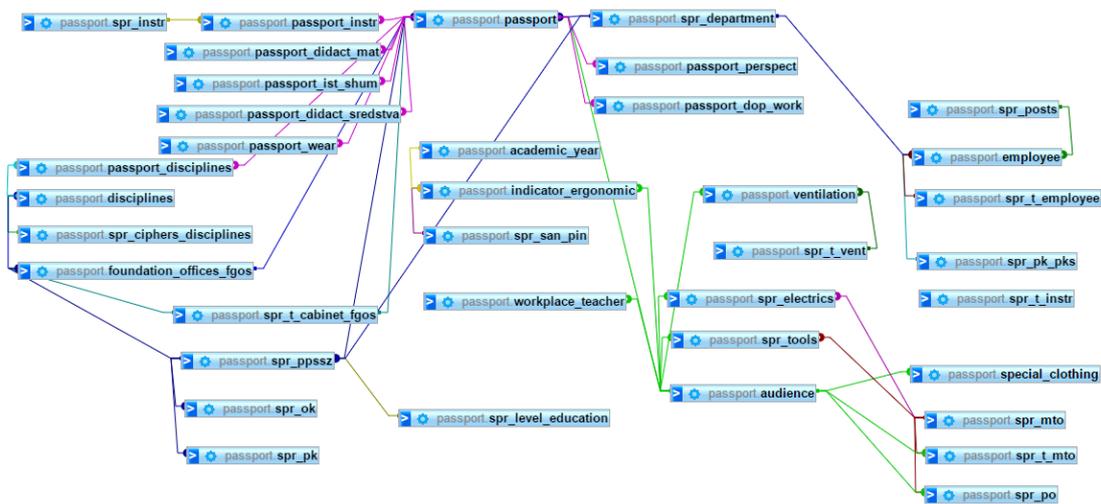


Рис. 3. Схема базы данных Passport

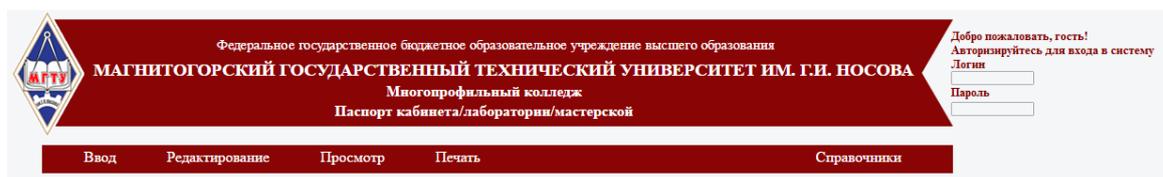


Рис. 4. Фрагмент интерфейса

Тип:

Специальность:

Лаборатория:

**2. Программно-методическое обеспечение**

2.2. Программы профессиональных модулей, дисциплин и практик

МДК.01.02 Прикладное программирование

МДК.02.02 Технология разработки и защиты баз данных

Выберите ПМ, дисциплину или практики

№ протокола ПЦК  Дата утверждения:

2.3. Перечень таблиц, плакатов и других дидактических материалов

Наименование	Кол
<input type="text"/>	<input type="text"/>

**3. Организационная оснащенность**

3.1. Инструкции по ТБ, ОТ, ПБ и ОТ при проведении лабораторно-практических работ

SMK-ИОТ-01-12 Инструкция по оказанию доврачебной помощи при несчастных случаях

SMK-ИОТ-ПВЭМ-01-12 По охране труда для пользователей персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ)

SMK-МПБ-01-12 Инструкция о мерах пожарной безопасности

Инструкции по ТБ, ОТ, ПБ и ОТ

3.2. Журнал регистрации инструктажей на рабочем месте

ведется с

Рис. 5. Фрагмент окна при заполнении данных

Интерфейс системы выполнен в соответствии с концепцией, атрибутами бренда и руководством по фирменному стилю «МГТУ им. Г.И. Носова».

Для заполнения пользователю необходимо выбрать пункт меню «Ввод», затем из выпадающего списка специальность, тип и название аудитории в соответствии с ФГОС. В разделе «2.2. Программы профессиональных модулей, дисциплин и практик» пользователь в поле мно-

жественного выбора вводит искомые сочетания названий дисциплин (при этом осуществляется фильтрация) и отмечает затарифицированные за ним. Аналогичным образом заполняется раздел «3.1. Инструкции по ТБ, ОТ, ПБ и ОТ при проведении лабораторно-практических работ». Для удобства работы с датами используется выпадающий календарь. Фрагмент окна при заполнении данных представлен на рис.5.

Стул	<input type="text" value="36"/>	Удалить
Шкаф для документов	<input type="text" value="2"/>	Удалить
Стол офисный	<input type="text" value="1"/>	Удалить

**4. Материально-техническое оснащение**  
*Перечень электронных плакатов, дидактических средств и прочих материалов*

Наименование	Инвентаризационный номер	Кол-во	Год приобретения	
Блок системный Intel CeleronD351 3200MHz/GA-81945GZME(-RH)	C01360694	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2007"/>	Удалить
Компьютер Intel Pen Core 2 Duo + LCD Acer 19"	B1101040237	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2008"/>	Удалить
Компьютер iRU Corp 510 2,8/4/500 + LCD 19"	400009849	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2012"/>	Удалить
Компьютер Техникон 51001+мон.Aser TFT 19"	400007700	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2011"/>	Удалить
Компьютер Техникон 51001+мон.Aser TFT 19"	400007701	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2011"/>	Удалить
Компьютер Техникон 51001+мон.Aser TFT 19"	400007702	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2011"/>	Удалить
Компьютер Техникон 51001+мон.Aser TFT 19"	400007703	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2011"/>	Удалить
Монитор LCDLGL1751SQ	C01360635	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="2005"/>	Удалить

*Добавление электронных плакатов, дидактических средств и прочих материалов*

Наименование	Инвентаризационный номер	Кол-во	Год приобретения	Тип
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Рис. 6. Фрагмент окна при заполнении табличных данных**

7.1. Соответствие площади технологическим нормам

Количество учебных мест

Количество рабочих мест

7.2. Температурный режим

Температура в летний период, град. С	Температура в зимний период, град. С
<input type="text" value="19"/>	<input type="text" value="19"/>

7.3. Уровень шума

Фактический уровень шума, Дб	Источник шума
<input type="text" value="48"/>	<input type="text"/>

7.4. Уровень освещенности

Вид освещенности	Фактическая освещенность
Естественная, КЕО(%)	<input type="text" value="1.5"/>
Искусственная, Люкс	<input type="text" value="500"/>

**Рис. 7. Фрагмент окна для ввода данных по оценке организационно-эргономического уровня учебных/ рабочих мест**

Информация разделов «2.3. Перечень электронных плакатов, дидактических средств и прочих материалов», «3.3. Имущественная опись», «4. Материально-техническое оснащение», «7.5. Обеспеченность спецодеждой и индивидуальными защитными средствами», «8.1. Требуемое материально-техническое оснащение» и «8.2. Виды деятельности» содержится в виде таблиц. Они имеют единый стиль заполнения с возможностью добавления, удаления и редактирования строк (рис. 6).

Кроме того пользователю необходимо заполнить и отредактировать сведения для оценки организационно-эргономического уровня учебных/ рабочих мест (рис. 7).

Заполнение паспорта заканчивается при нажатии на кнопку .

Для внесения изменений пользователь выбирает пункт меню «Редактирование», вносит необходимые коррективы в паспорт и нажимает кнопку .

С полной версией паспорта пользователь может ознакомиться при выборе пункта меню «Просмотр». При этом формируется электронная и печатная формы паспорта, где отображены все сведения о помещении (рис.8).

Работа с системой организована таким образом, чтобы пользователь самостоятельно вводил как можно меньше информации. Для формирования паспорта вся необходимая справочная информация содержится в базе данных и подгружается независимо. К такой информации относятся адреса расположения помещений, ранее введенный список профессиональных и общекультурных компетенций для конкретной специальности и дисциплины, материально-техническое оснащение помещения и т.п. Для добавления справочной информации в верхней правой части интерфейса расположена панель со структурированной информацией по видам справочника. При выборе вида справочника, в рабочем окне открывается его представление с возможностью внесения изменений и дополнений (рис.9).

Заведующий УЛК, как было выше сказано, имеет полный доступ к информации в АИС. При входе им в систему для составления отчетов по соответствию помещений ФГОС при подготовке специалистов, по наличию материально-технической базы, обеспечивающей проведение всех видов лабораторных работ и практических занятий, дисциплинарной, междисципли-

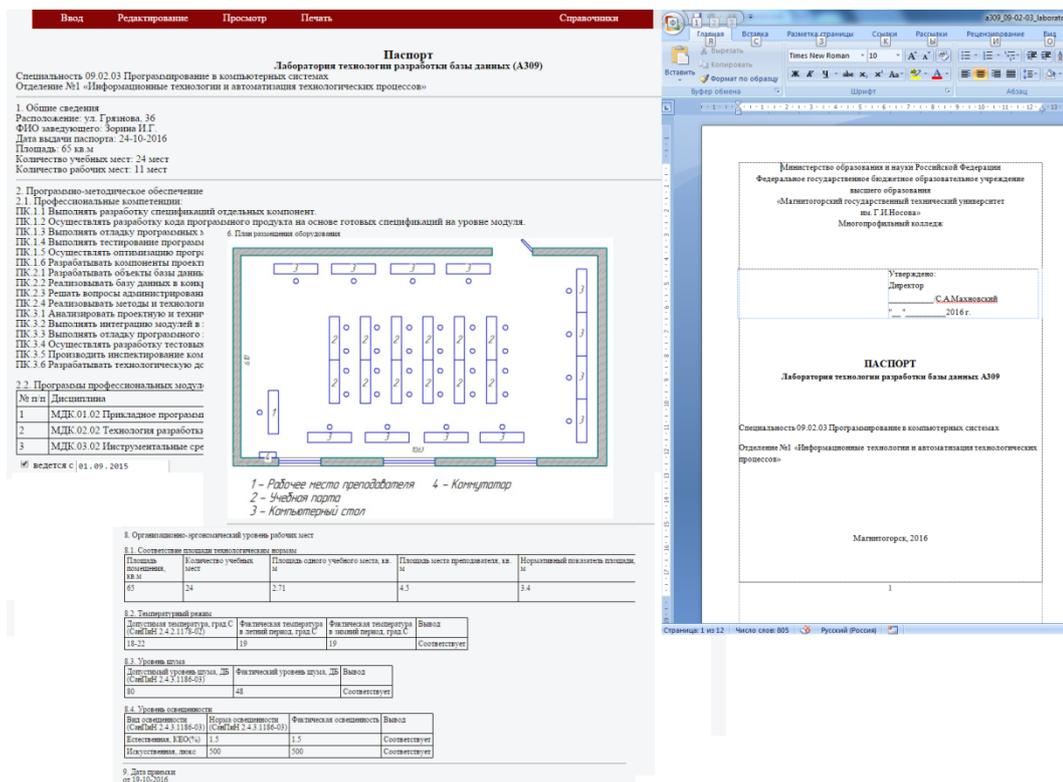


Рис. 8. Фрагменты электронной и печатной формы паспорта

Показатель	Показатель значения	Дополнительные показатели	Аудитория		
Естественное освещение учебно-производственных мастерских	1.61		119	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Искусственное освещение учебно-производственных мастерских	650.00		119	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Температура воздуха в учебных мастерских	21.00		119	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Естественное освещение учебно-производственных мастерских	2.30		120	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Искусственное освещение учебно-производственных мастерских	427.00		120	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Предельно допустимая концентрация силикатосодержащей пыли, силикатов, алумосилика	2.00		120	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Температура воздуха в учебных мастерских	22.30		120	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Естественное освещение учебно-производственных мастерских	1.15		85	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Искусственное освещение учебно-производственных мастерских	485.00		85	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Температура воздуха в учебных мастерских	21.40		85	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Естественное освещение учебно-производственных мастерских	1.45		142	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Искусственное освещение учебно-производственных мастерских	450.00		142	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Шум класса 3.1 на рабочем месте	57.00		2016/2017	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Предельно допустимая концентрация аммиака	2.34		2016/2017	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>
Предельно допустимая концентрация озона	0.02		2016/2017	<a href="#">Удалить</a>	<a href="#">Изменить</a>

Рис. 9. Фрагмент окна при работе со справочниками

нарной и модульной подготовки, учебной практики в строке меню появляется команда «Отчеты». Заведующий УЛК может сформировать отчет по своему поисковому запросу или выбрать один из видов, прописанных в системе и вывести его на печать.

междисциплинарной и модульной подготовки, учебной практики, рационально и эффективно использовать рабочее время ответственных за оформление паспортов и унифицировать их внешнее представление.

### Заключение

АИС «Паспортизация учебных помещений» проходит апробацию с сентября 2016 года в Многопрофильном колледже ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова». Внедрение АИС в управление образованием позволило выявлять соответствие помещений ФГОС при подготовке специалистов по наличию материально-технической базы, обеспечивающей проведение всех видов лабораторных работ и практических занятий, дисциплинарной,

### ЛИТЕРАТУРА

1. Основные факторы информатизации образования/ [Электронный ресурс] <http://www.wikiznanie.ru/b/index.php> (дата обращения 20.10.2016)
2. Основные факторы информатизации образования/ [Электронный ресурс] <http://babylon.wiki-wiki.ru/b/index.php> (дата обращения 20.10.2016)
3. Паспорт кабинета. УМО (учебно-методическое обеспечение) / [Электронный ресурс]

- 
- <http://nsportal.ru/user/167590/page/pasport-kabineta-umo-uchebno-metodicheskoe-obespechenie> (дата обращения 20.10.2016)
4. Постановление Правительства РФ от 14.02.2008 N 71 (ред. от 02.11.2013) "Об утверждении Типового положения об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении)" / [Электронный ресурс] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_75\\_013](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75_013) (дата обращения 20.10.2016)
  5. Постановление Правительства РФ от 18.07.2008 N 543 "Об утверждении Типового положения об образовательном учреждении среднего профессионального образования (среднем специальном учебном заведении)" / [Электронный ресурс] <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/93595/> (дата обращения 20.10.2016)
  6. Федеральный закон "Об образовании в Российской Федерации" от 29.12.2012 N 273-ФЗ (действующая редакция, 2016) / [Электронный ресурс] [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_140\\_174](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140_174) (дата обращения 20.10.2016)
  7. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 29 декабря 2010 г. N 189 г. Москва "Об утверждении СанПиН 2.4.2.2821-10 "Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях"" (16 марта 2011 г. Российская газета - Федеральный выпуск №5430 (54)) [Электронный ресурс] <https://rg.ru/2011/03/16/sanpin-dok.html> (дата обращения 20.10.2016)
- 

## AUTOMATED INFORMATION SYSTEM «THE CERTIFICATION OF CLASSROOMS»

**V.D. Tutarova<sup>1</sup>, I.G. Zorina<sup>2</sup>, T.O. Scachkov<sup>3</sup>, O.A. Turbina<sup>4</sup>, I.O. Kogevnikov<sup>5</sup>**  
<sup>1,2,3,4</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Multiprofile college,  
Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** This article describes the process of developing of the automated information system «The certification classrooms». This system aims to automation the process of creating the certificate of classrooms in a college. The system must reveal the satisfaction of classrooms to requirements of the Federal State Educational Standards which ensure the adequate of the material technical basis to these requirements for performing laboratory and research work, disciplinary and multidisciplinary preparation, module and practical educational process.

**Keywords:** automated information system, professional education, certificate, classroom.

### REFERENCES

1. Osnovnie factori informatizacii obrazovaniya / [elektronnii resurs] URL: <http://www.wikiznanie.ru/b/index.php> (accessed 20 October 2016)
2. Osnovnie factori informatizacii obrazovaniya / [elektronnii resurs] URL: <http://babylon.wiki-wiki.ru/b/index.php> (accessed 20 October 2016)
3. Passport kabineta. UMO (uchebno-metodicheskoe obespechenie) / [elektronnii resurs] URL: <http://nsportal.ru/user/167590/page/pasport-kabineta-umo-uchebno-metodicheskoe-obespechenie> (accessed 20 October 2016)
4. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 14.02.2008 N 71 (red. ot 02.11.2013) "Ob utvergdenii Tipovogo pologeniya ob obrazovatelnom uchregdenii vishego professionalnogo obrazovaniya (vishem uchebnom zavedenii)" / [elektronnii resurs] URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_75\\_013](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_75_013) (accessed 20 October 2016)
5. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 18.07.2008 N 543 "Ob utvergdenii Tipovogo pologeniya ob obrazovatelnom uchregdenii srednego professionalnogo obrazovaniya (srednem specialnom uchebnom zavedenii)" / [elektronnii resurs] URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/93595/> (accessed 20 October 2016)
6. Federalniy zakon "Ob obrazovanii v Rossiiskoi Federacii" ot 29.12.2012 N 273-FZ (deistvuyschaya redakciya, 2016) / [elektronnii resurs] URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_140\\_174](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140_174) (accessed 20 October 2016)
7. Postanovlenie glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiiskoi federacii ot 29 decabrya 2010 g. N 189 g. Moskva "Ob udtverzjdenii SaNPIn 2.4.2.2821-10 "Sanitarno-epidemeologicheskie trebovaniya k usloviyam i organizacii obucheniya v obsheobrazovatelnih uchregdeniyah"" (16 marta 2011 g. Rossiyskaya gazeta - Federalniy vipusk №5430 (54)) [Electronniy resurs] URL: <https://rg.ru/2011/03/16/sanpin-dok.html> (accessed 20 October 2016)



