

На правах рукописи



Мазанова Валентина Ивановна

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЗАКАЛКИ СТЕКЛА
ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА**

Специальность

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Макаров Руслан Ильич

Официальные оппоненты:

Денисов Артём Руфимович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Костромской государственной университет имени Н.А. Некрасова», г. Кострома, заведующий кафедрой «Биотехнические, технологические и информационные системы»

Смирнов Николай Иванович, кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, доцент кафедры «Автоматизированные системы и управление тепловыми процессами»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль

Защита состоится 28 мая 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.025.01, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ауд.335-1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ВлГУ: diss.vlsu.ru

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу совета университета: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ученому секретарю диссертационного совета Д.212.025.01.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Давыдов Н.Н.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Конкуренция в условиях рыночной экономики обязывает стекольные заводы уделять значительное внимание проблеме качества. Успешное решение проблемы качества возможно путем совершенствования технологии производства и повышения ее экономичности. Важную роль в повышении качества продукции играет автоматизация производственных процессов. Перспективы развития российского производства автомобильного стекла и стекольной промышленности в целом связаны, в первую очередь, с расширением спроса на продукцию, как на внутреннем, так и на внешнем рынке. Автопроизводители вынуждены переходить на качественно новый уровень организации производства. Для этого используют различные подходы, концепции, методы эффективного менеджмента: *TQM*, *FMEA*, *SPS*, *SW*, *Just-in-time*, канбан, «Шесть сигм», *PPAP*, *MSA*, *5S*, *Lean production* и др. На сегодняшний день многие российские поставщики производят качественную продукцию, которой комплектуются иномарки, производимые в России. Автосборщики стремятся к унификации требований для своих поставщиков. Таким документом в России стали технические условия ИСО/ТУ 16049:2002. В ИСО/ТУ 16049 содержатся требования к системе менеджмента качества в области автомобилестроения, основанные на требованиях как международного (*ISO 9001:2000*), так и национальных стандартов. ИСО/ТУ 16049, приняты как альтернатива этим стандартам и применяются у поставщика при предъявлении такого требования сборщиком.

В проведении научно-исследовательских работ с целью усовершенствования производства и повышения качества выпускаемой продукции заинтересованы ведущие предприятия стекольной промышленности, среди которых ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод», ОАО «Саратовстройстекло», ОАО «Салаватстекло», ОАО «Саратовский Институт Стекла» и другие.

Вопросам управления качеством посвящены исследования ученых разных стран: В. Шухарта, Э. Деминга, А. Фейгенбаума, Венецкого И.Г., Дина А.М. и др. Важность внедрения интегрированных систем менеджмента для российских предприятий отражена в работах Адлера Ю.П., Бочарова В.В., Василевской С.В., Гусевой Т.В., Никифорова А.Д., Свиткина М.З., Хорошевой Е.Р., и др. В последние годы выполнены исследования по внедрению систем менеджмента качества в производство автомобильного стекла, которые отражены в работах Макарова Р.И., Тарбеева В.В., Суворова Е.В., Чуплыгина В.Н. и др.

Важное значение в повышении качества автомобильного стекла имеет автоматизация управления технологическими процессами, что определяет актуальность диссертационной работы. В диссертации решена задача повышения качества вырабатываемого стекла за счет автоматизации управления технологическим процессом закалки автомобильных стекол с использованием моделей на нейронных сетях.

Объект исследования – технологический процесс производства безопасно закаленного гнутого бесцветного стекла для автомобильного транспорта.

Предмет исследования – математические модели и алгоритмы управления технологическим процессом производства закаленного стекла.

Целью диссертационной работы является повышение качества вырабатываемого закаленного стекла для автомобильного транспорта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- исследовать технологический процесс производства гнутого закаленного стекла для автомобильного транспорта, как объекта управления, оценить точность, стабильность процессов и качество вырабатываемой продукции;
- создать формализованное описание технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта. Выявить критичные технологические стадии процесса, влияющие на качество вырабатываемого стекла;
- разработать и исследовать нейросетевые модели, описывающие зависимость характеристик закаленного стекла от режимных параметров;
- разработать алгоритмы управления технологическим процессом закалки гнутого стекла. Имитационным моделированием технологического процесса закалки с разработанным алгоритмом управления доказать возможность увеличения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

Научная новизна. Новые научные результаты, полученные в диссертации, состоят в следующем:

- разработано формализованное описание технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта, а также модели на нейронных сетях, более точно описывающие зависимость отклонения формы стекла и показателей характера разрушения при испытании изделий от режимов закалки;
- предложен алгоритм управления технологическим процессом закалки гнутого стекла, основанный на использовании нейросетевых моделей и учитывающий нестационарность протекающих процессов;
- доказана перспективность использования разработанных математических моделей и алгоритма управления с целью повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров;
- введен комплексный критерий для оценки качества вырабатываемого закаленного автомобильного стекла, учитывающий отклонение гнутых изделий от заданной формы и показатели характера разрушения изделий при испытаниях.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- доказана применимость методики аксиоматического анализа для оценки точности и стабильности технологического процесса производства закаленного стекла;
- применительно к проблематике диссертации результативно использованы статистические и аксиоматические методы оценки надежности технологической системы;
- изложены доказательства эффективности использования моделей на нейронных сетях для управления технологическим процессом закалки автомобильных стекол;
- раскрыто несоответствие результатов оценки стабильности и точности технологического процесса, получаемых с использованием традиционных статистических методов и с помощью аксиоматического анализа;
- изучены зависимости показателей качества стекла от режимных переменных технологических стадий процесса закалки;
- проведена модернизация алгоритмов управления технологическими режимами процесса закалки стекла.

Практическая значимость работы

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что были:

- разработаны новые математические модели, алгоритм контроля и управления технологическим процессом закалки гнутого автомобильного стекла, получены акт внедрения и положительные заключения о полезности;
- определены перспективы практического использования методики аксиоматического анализа стабильности технологического процесса, моделей на нейронных сетях и алгоритма управления в системах менеджмента качества предприятий, производящих закаленное автомобильное стекло;
- создана система практических рекомендаций по контролю стабильности и точности технологического процесса закалки стекла и выработке управляющих решений по коррекции технологических режимов закалки;
- представлены предложения по использованию технологами производства разработанного алгоритма управления для выработки решений по коррекции режимов закалки в производстве гнутых автомобильных стекол.

Методы исследования

Поставленные задачи решались с использованием статистических методов и процессного подхода к управлению, методов теории управления, системного анализа, математического моделирования, а также имитационного моделирования на ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

- формализованное описание технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта позволило выявить ключевые показатели процессов и характеристики закаленного стекла, наиболее критичные с точки зрения качества;
- применение аксиоматического анализа для контроля стабильности и точности технологического процесса закалки позволяет оперативнее и достовернее оценивать характеристики технологического процесса по выборке малого объема;
- разработанные нейросетевые модели, описывающие отклонение гнутых изделий от заданной формы и показатели характера разрушения при испытаниях изделий в зависимости от режимов стадий технологического процесса закалки, отличаются высокой точностью по сравнению с регрессионными моделями;
- предложенный алгоритм управления технологическим процессом закалки гнутого стекла обеспечивает возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что:

- для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном оборудовании ПКО «Автостекло» ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод», показана воспроизводимость результатов исследования на различных видах изделий;
- теория построена с использованием статистических методов теории управления, системного анализа, математического моделирования, имитационного моделирования на ЭВМ и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме;
- идея базируется на анализе практики повышения качества закаленного безопасного стекла для автомобильного транспорта, обобщении передового опыта автопроизводителей, а также на основах теории управления, имитационного моделирования, методах системного анализа и математической статистики;
- использованы сравнения авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике в работах авторов Макарова Р.И., Суворова Е.В. и др.;
- установлено качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;
- использованы современные методики сбора и обработки исходной информации.

Апробация результатов

На разработанные математические модели и алгоритм управления получены положительные заключения от ОАО «Эй Джи Си Борский стекольный завод» и ЗАО «Стромизмеритель»; основные результаты работы используются в учебном

процессе на кафедре «Информационные системы и программная инженерия» ВлГУ. Заключение и акт приведены в приложениях А-В.

Результаты диссертации обсуждались на XXI международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-21, Осенняя школа молодых ученых, ТГТУ, г. Тамбов, 2008г.), на XXII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-22, Летняя школа молодых ученых, ИГХТУ, г. Иваново, 2009г.), на XXIII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-23, СГТУ, г. Саратов, 2010г.), на II международной молодежной научно-практической школе «Информационный менеджмент социально-экономических и технических систем» (г. Москва, 2011г.), на II открытой городской научно-практической конференции школьников и студентов «Решение-2013» (Березниковский филиал ПГНИУ, г. Березники, 2013г.), на IX международной научно-практической конференции «Перспективные разработки науки и техники 2013» (г. Пшемьсль (Przemysl), Польша, 2013г.), на межвузовских научно-практических конференциях ВЗФЭИ (г. Владимир, 2007-2009гг.), на научно-технических конференциях ВлГУ, (г. Владимир, 2007-2013гг.).

Основное содержание диссертации отражено в 16 публикациях, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК России.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Содержит 122 страницы основного текста, включает 30 рисунков, 28 таблиц, 3 приложения, список литературы из 124 наименований.

II ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и определены решаемые в диссертации научные задачи. Указана научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость. Обоснованы выбранные методы исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Обоснована степень достоверности выполненных исследований, указана апробация результатов.

В первой главе «Технологический процесс производства закаленного стекла для автомобильного транспорта и обеспечение качества» дана характеристика технологического процесса производства гнутого закаленного стекла для автомобильного транспорта и обеспечение его качества. Описаны показатели назначения закаленного стекла, которые разделяются на две группы: производственные и потребительские. К производственным относятся: *Yield* – выход продукции, *Cadence* – ритмичность производства, *CU* – коэффициент использования оборудования, *PPM (part per million)* - доля дефектов на миллион изделий (возможностей) и др. К потребительской группе показателей относятся толщина стекла, размеры, отклонение гнутых изделий от заданной формы, светопропускание, оптические искажения, механическая прочность, характер разрушения при испытаниях и др.

Наиболее общими и важными в отношениях между автосборщиками и поставщиками комплектующих является качество продукции. Это и определило тематику научных исследований, решающую задачу повышения качества закаленного стекла. Для уменьшения влияния случайных факторов на качество, таких как плохая наладка оборудования, смена операторов, ошибки операторов, неконтролируемые возмущающие воздействия и др., создаются системы управления качеством, которые оказывают постоянное воздействие на процесс производства продукции с целью поддержания соответствующего уровня качества изделий.

Современная технология производства закаленного стекла представляет автоматизированное поточное производство, состоящее из последовательных технологических стадий (процессов). В главе приведено формализованное описание технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта с использованием методологии *IDEF0*. Модель технологического процесса представляет иерархически организованную совокупность диаграмм. Диаграмма первого уровня декомпозиции представлена на рисунке 1.

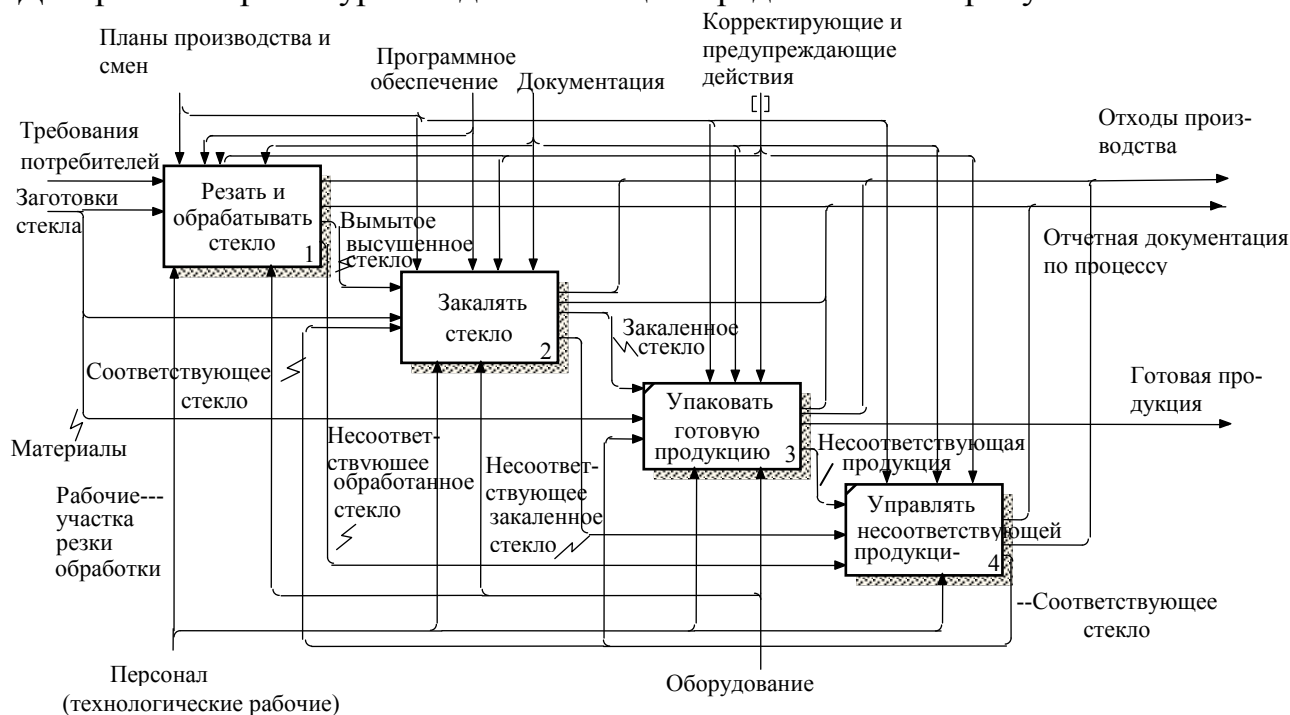


Рисунок 1- Декомпозиция контекстной диаграммы модели технологического процесса производства закаленного стекла

Выявлены критичные технологические процессы. Закалка является одним из процессов, влияющих на качество вырабатываемого стекла, что и определило объект исследований диссертационной работы. Предметом исследования явились математические модели и алгоритм управления технологическим процессом закали стекла.

Во второй главе «Оценка качества технологической системы и технологических процессов производства закаленного стекла» определены возможности анализируемого технологического процесса для изготовления изделий с требуемыми характеристиками, оценены изменения характеристик технологической си-

стемы во времени и определено их соответствие требованиям, установленным в нормативной документации, получена информация для регулирования технологического процесса.

Одним из основных показателей качества технологического процесса является его надежность. Надежность является комплексной характеристикой, единичными показателями которой служат: выработка закаленного стекла по месяцам, ритмичность *CADENCE*, уровень дефектности *PPM*, коэффициент использования оборудования *CU*, выход годного стекла *Yield* и др. Указанные характеристики оценивались традиционными статистическими методами по данным за анализируемые месяцы вырабатываемой продукции.

Функционирование технологической системы характеризуется нестабильностью. В показателях выявлен временной тренд и сезонная компонента, отрицательно влияющие на стабильность и точность анализируемых показателей. Упорядоченная во времени последовательность анализируемых показателей адекватно описывается временным рядом, порождаемым аддитивным случайным процессом:

$$Y_t = T_t + S_t + e_t, \quad (1)$$

где T_t - тренд; S_t - сезонная компонента; e_t - случайная компонента; t - уровни наблюдения, $t=1, 2, \dots$

Оценки параметров временных рядов, описывающих показатели надежности производства закаленного стекла, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценки параметров временных рядов показателей надежности

Показатели	Тренд во времени	Сезонная компонента	
		Амплитуда	Период (месяцы)
Выработка, шт/месяц	$-12707*t$	50000	12
Ритмичность, шт/час	$0,2t^3 - 5,02t^2 + 23,9t$	24,19	5,47
Коэффициент использования оборудования, %	$-0,000t^2 + 0,0028t$	0,13	3,17
Выход годного стекла, %	$-0,95t^2 + 10,2t$	33,8	2,57
Уровень дефектности	$29,64t^2 - 543,5t$	800	12

Закалка является критическим процессом, определяющим форму гнутых изделий и характеристики готовых стекол. Закалка протекает в горизонтальной печи непрерывного действия (см. рисунок 2).

Точность и отлаженность технологического процесса закалки стекла определяет качество вырабатываемой продукции. В главе оценивалась стабильность и точность технологических режимов стадий процесса закалки с применением аксиоматического анализа. Аксиоматический анализ контроля процессов лишен недостатков традиционных методов, рассчитанных на анализ нормально распределенных процессов. Доказана применимость аксиоматического анализа для оценки точности и стабильности технологического процесса производства закаленного стекла.

Анализ стабильности и точности технологических режимов заключается в определении репрезентативности выборки относительно однородной невидимой генеральной совокупности (ОНГ). Анализ стабильности состоит в проверке выполнения условий трех принципов: принцип порядка, принцип сходства, принцип соответствия.

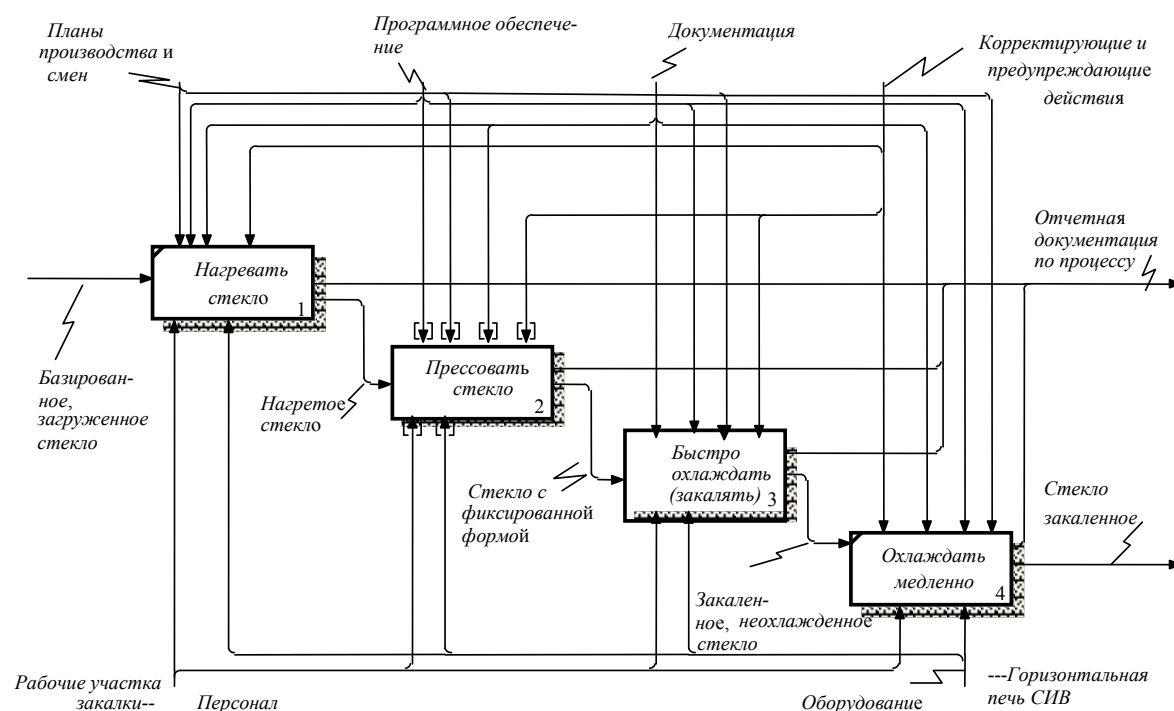


Рисунок 2- Закалка стекла в горизонтальной печи

В случае выполнения трех принципов предпосылка о репрезентативной однородности выборки подтверждается. Результаты проверки стабильности режимных переменных процесса закалки стекла представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оценки стабильности температуры в печи нагрева

Результаты проверки	Температура в камерах нагрева печи закалки							
	T_2	T_4	T_{15}	T_{16}	T_{18}	T_{20}	T_{30}	T_{32}
Обозначение переменной								
Принцип порядка	+	+	+	+	+	+	+	+
Тип распределения	D	D	D	D	D	D	D	D
P	0,78	0,79	0,75	0,71	0,66	0,73	0,69	0,66
K_c	0,49	0,66	0,84	0,88	0,87	0,39	0,55	-0,18
Принцип сходства	-	+	+	+	+	-	+	-
$Sk(T_k)$	-	-1,75	-0,90	-1,01	0,06	-	-0,42	-
Принцип соответствия	-	+ тип D	+ тип D	+ тип D	+ тип D	-	+ тип D	-

Обозначения: P - вероятность появления благоприятного события (ОНГ)

K_c – коэффициент сходства

$Sk(T_k)$ – коэффициент асимметрии

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что температурный режим закалки стекла нестабильный. Раскрыто несоответствие результатов оценки стабильности и точности технологического процесса, получаемых с использованием традиционных статистических методов и с помощью аксиоматического анализа. Неоднородность данных температурного режима закалки ограничивает возможность корректного использования традиционных методов контроля, так как это может привести к ошибочным выводам о стабильности анализируемого процесса.

Анализ технологических режимов стадии прессования показал, что процесс прессования стекла нестабильный. Нестабильность может быть вызвана плохой наладкой оборудования, периодической перенастройкой оборудования на выработку изделий разных типов, сменой операторов, ошибками при ручном ведении процесса и т.д.

В главе дана оценка отлаженности технологического процесса закалки по отклонению характеристик вырабатываемых изделий от заданных требований. Проведен анализ вида дефектов, встречающихся в выработанных закаленных стеклах. Значительное количество дефектной продукции связано с отклонением формы гнутого стекла, царапинами, боем, потерями при переналадках оборудования и дефектами черного канта.

Уровень дефектности вырабатываемых изделий аппроксимирован временным рядом, порождаемым аддитивным случайным процессом. Дефектность *PPM* вырабатываемого закаленного стекла характеризуется нестабильностью. В ней присутствуют временной тренд и гармоническая составляющая.

В третьей главе «Исследование и разработка моделей, описывающих процесс закалки автомобильного стекла» обоснован выбор типа математических моделей, информативных переменных, приведены результаты исследований и разработки математических моделей на нейронных сетях, описывающих зависимость характеристик закаленного стекла от параметров режима закалки.

Для построения моделей использовались данные пассивного эксперимента, представляющие результаты измерения режимных переменных и показателей качества вырабатываемого стекла в режиме нормальной эксплуатации технологического оборудования.

Для уменьшения размерности решаемой задачи контроля и управления технологическим процессом закалки были отобраны информативные переменные технологических режимов и характеристик вырабатываемого закаленного стекла. Контроль технологического процесса достаточно вести по 18 режимным переменным, а характеристики вырабатываемого стекла оценивать по четырем показателям: отклонению формы стекла от шаблона в двух точках измерения на смежных сторонах стекла по периметру, характер разрушения при испытаниях достаточно оценивать по минимальному количеству осколков и максимальной длине.

Определены требования к точности разрабатываемых моделей. Допустимая погрешность модели принималась равной погрешности измерения показателей качества закаленного стекла. В таблице 3 приведены значения абсолютной по-

грешности измерительного инструмента и среднеквадратичная погрешность моделей, рассчитанная при условии нормального закона распределений погрешностей измерений (с вероятностью 0,95).

Таблица 3– Измерительный инструмент и значения погрешностей

Показатель качества	Наименование измерительного инструмента	Абсолютная погрешность измерений (Δ), мм	Среднеквадратичная погрешность моделей (Se), мм
Неприлегание сторон к контуру шаблона	Щуп (ГОСТ 882–75)	0,1	0,05
Отклонение образующей линии от цилиндрической поверхности	Линейка (ГОСТ 427–75)	1,0	0,5

В главе проведен выбор архитектуры нейронной сети и алгоритмов обучения с помощью автоматического конструктора сети *Intelligent Problem Solver* пакета *ST Neural Networks*.

Разработаны модели, адекватно описывающие зависимость отклонения формы стекла (y_1 - y_5) и характера разрушений при испытаниях (y_6 - y_8) от технологических режимов стадий процесса закалки. Архитектура и характеристики моделей представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики нейросетевых моделей

Модель	Архитектура сети (k - m - i)	Коэффициент детерминации R^2 , %	F-критерий	Среднее значение стандартной ошибки, S , мм	Коэффициент корреляции расчетных данных с реальными данными
y_1	8-4-1	60,2	1,89	0,203	0,78
y_2	3-4-1	82,6	5,95	0,089	0,91
y_3	18-8-1	97,1	4,04	0,227	0,99
y_4	12-3-1	73,2	5,45	0,135	0,86
y_5	7-4-1	89,9	11,09	0,083	0,98
y_6	3-3-1	97,5	104	7,80	0,99
y_7	4-5-1	87,8	8,66	4,915	0,94
y_8	3-5-1	84,7	6,64	3,44	0,93

где k – размерность входного сигнала; i – размерность выходного сигнала; m – число нейронов в скрытом слое

Изучено влияние технологических режимов стадий процесса закалки на характеристики вырабатываемого закаленного стекла. Установлено влияние формы стекла (левое, правое) и размеров на его характеристики.

Проведен сравнительный анализ точности разработанных нейросетевых моделей с регрессионными моделями. Нейросетевые модели отличаются высокой точностью по сравнению с регрессионными, однако, достигнутая точность моделей, оцениваемая величиной среднеквадратичной погрешности, не удовлетворяет заданным требованиям.

Нейросетевые модели, обученные на фиксированной выборке, не обеспечивают заданную точность описания технологического процесса в широком диапазоне изменения режимных переменных процесса закалки. Для повышения точности предлагается корректировать параметры нейросетевых моделей в процессе их эксплуатации - инициировать алгоритм адаптации при превышении ошибки модели допустимой величины.

В четвертой главе «Алгоритм управления технологическим процессом закалки стекла» приведено формализованное описание задачи управления, разработан алгоритм управления, приведены результаты имитационного моделирования функционирования технологического процесса закалки с предложенным алгоритмом управления, доказывающие возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

В связи с нестабильностью формы вырабатываемых изделий из закаленного стекла, предложен комплексный критерий для оценки качества автомобильного стекла, учитывающий отклонение гнутых изделий от заданной формы и показатели характера разрушения изделий при испытаниях.

Критерий управления вычисляет отклонение характеристик изделия от заданной формы. При этом накладываются ограничения на максимальную величину отклонений в точках контроля на четырех сторонах стекла и отклонение образующей цилиндра. Показатели характера разрушения изделий при испытаниях должны удовлетворять требованиям ГОСТ. Учитываются так же ограничения, накладываемые на диапазон изменения режимных переменных. С учетом данных условий задача управления технологическим процессом закалки стекла принимает следующий вид:

$$K = \min \sum_{i=1}^5 y_i, \quad (2)$$

при выполнении ограничений:

$$y_i \leq y_{i, \text{зад}} \text{ для } i=1, 2, \dots, 5, \quad (3)$$

$$y_j \leq y_{j, \text{зад}} \text{ для } j=6, 8, \quad (4)$$

$$y_7 \geq y_{7, \text{зад}}, \quad (5)$$

$$x_{n, \text{min}} \leq x_n \leq x_{n, \text{max}} \text{ для } n=1, 2, \dots, 18. \quad (6)$$

где $y_{i, \text{зад}}$ – ограничения на величину отклонения от заданной формы гнутого стекла в точках контроля; $y_{6, \text{зад}} - y_{8, \text{зад}}$ - ограничения на показатели характера разрушения.

Неравенства (3) задают ограничения на максимальную величину отклонения формы стекла по сторонам $y_{i, \text{зад}}$, $i=1-4$ и отклонение образующей цилиндра $y_{5, \text{зад}}$. Ограничения (4, 5) определяются требованиями на характер разрушения стекла при испытаниях. Максимальное число осколков должно быть не более $y_{6, \text{зад}}$, минимальное количество не менее $y_{7, \text{зад}}$. Длина осколков не должны превышать $y_{8, \text{зад}}$. Требования указаны в технических условиях на конкретные изделия и определены ГОСТ 5727. Последнее неравенство (6) отражает допустимый по техноло-

гии диапазон изменения режимных переменных стадий процесса закалки автомобильных стекол.

Сформулированная задача условной оптимизации (2–6) представляет собой задачу математического программирования. Высокая размерность задачи управления и большое число ограничений создают неудобства в её практическом использовании. В связи с этим задача управления была скорректирована: «жесткие» ограничения (3-5) заменены «нежесткими». Задача условной оптимизации была сведена к решению задачи безусловной оптимизации с использованием метода штрафных функций.

Критерием управления выбрана штрафная функция F , имеющая следующий вид:

$$\begin{aligned}
 F = & \sum_{i=1}^4 \lambda_i \left| \max(y_i - y_{i \text{зад}}, 0) \right| \frac{1}{y_{i \text{max}}} + \lambda_5 \left| \max(y_5 - y_{5 \text{зад}}, 0) \right| \frac{1}{y_{5 \text{max}}} + \\
 & + \lambda_6 \left| \max(y_6 - y_{6 \text{зад}}, 0) \right| \frac{1}{y_{6 \text{max}}} + \lambda_7 \left| \min(y_7 - y_{7 \text{зад}}, 0) \right| \frac{1}{y_{7 \text{max}}} + \\
 & + \lambda_8 \left| \max(y_8 - y_{8 \text{зад}}, 0) \right| \frac{1}{y_{8 \text{max}}}
 \end{aligned} \quad (7)$$

где λ_i – коэффициенты веса слагаемых штрафной функции, которые принимаются равными 0,125.

Разработан алгоритм управления процессом закалки стекла, позволяющий вычислять оптимальные значения режимов стадий процесса закалки. Учитывая нелинейность нейросетевых моделей и случайный характер контролируемых переменных, поиск оптимальных режимов проводится численным методом с использованием алгоритма покоординатного спуска.

Величина шага изменения режимных переменных при поиске не превышала 10% диапазона изменения режимных переменных.

Для повышения точности вычислений параметры нейросетевых моделей корректируются в процессе эксплуатации с использованием текущей информации о характеристиках вырабатываемого стекла и технологических режимах стадий процесса закалки.

Имитационным моделированием функционирования технологического процесса закалки оценивалась эффективность разработанного алгоритма управления. Вычислительный эксперимент проводился с использованием ретроспективных данных процесса закалки при производстве бесцветных гнутых боковых стекол для автомобиля *DAEWOO Lanos (ZAZ Lanos)*. Результаты имитационного моделирования алгоритма управления и ручного ведения процесса закалки приведены в таблице 5.

Предложенный алгоритм управления позволяет вырабатывать закаленное стекло с заданными характеристиками: отклонение формы стекла по сторонам не превышает 1,39 мм, отклонение образующей цилиндра не больше 0,46 мм. Показатели характера разрушения изделий при испытаниях удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Имитационным моделированием функционирования технологического процесса закалки с предложенным алгоритмом управления доказана возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

В главе даны предложения по использованию разработанного алгоритма управления в действующих и создаваемых системах поддержки принятия решений для технологов производства, позволяющего вырабатывать эффективные решения по коррекции режимов стадий процесса закалки в производстве гнутых автомобильных стекол.

Таблица 5- Сравнительные характеристики вырабатываемых изделий при оптимальном управлении и ручном ведении процесса закалки

Характеристика стекла	Кодированное значение	Ручное ведение процесса		Результаты моделирования	
		Среднее значение	Коэффициент вариации	Среднее значение	Коэффициент вариации
Отклонение на стороне <i>A-B</i> , мм	y_1	0,95	0,29	0,32	0,17
Отклонение на стороне <i>B-C</i> , мм	y_2	1,12	0,47	1,10	0,05
Отклонение на стороне <i>C-D</i> , мм	y_3	1,18	0,39	1,15	0,24
Отклонение на стороне <i>D-F</i> , мм	y_4	1,31	0,31	1,39	0,10
Отклонение образующей цилиндра, мм	y_5	0,44	0,77	0,46	0,04
Максимальное количество осколков, шт	y_6	175,8	53,2	160,5	7,3
Минимальное количество осколков, шт	y_7	65,1	13,76	62,4	1,42
Длина осколков, мм	y_8	52,8	11,61	53,6	2,1

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа состояния современных систем управления производством закаленных стекол для автомобильной промышленности показана актуальность проведения теоретических исследований и разработок, направленных на совершенствование систем управления технологическими процессами.

2. Создано формализованное описание технологического процесса производства закаленного стекла для автомобильного транспорта. Выявлены критичные технологические стадии процесса закалки, влияющие на качество вырабатываемого стекла.

3. Показана целесообразность использования методики аксиоматического анализа для контроля стабильности и точности технологического процесса закалки.

ки, которая позволяет оценивать характеристики процесса по выборке малого объема.

4. Разработаны нейросетевые модели, описывающие отклонение формы и показатели характера разрушения при испытании изделий в зависимости от режимов стадий технологического процесса закалки.

5. Разработано формализованное описание задачи управления технологическим процессом закалки гнутого стекла. Критерий управления оценивает отклонение гнутых изделий от заданной формы и показатели характера разрушения изделий при испытаниях. Управляющими воздействиями выбраны технологические режимы стадий процесса закалки.

6. Предложен алгоритм управления технологическим процессом закалки гнутого стекла. Результаты имитационного моделирования функционирования технологического процесса закалки с предложенным алгоритмом управления доказали возможность повышения на действующем производстве точности изготовления гнутых закаленных стекол и стабилизации их параметров.

7. Разработанные модели, алгоритм контроля и управления технологическим режимом закалки рекомендуются использовать в производстве закаленных автомобильных стекол.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК:

1. Мазанова, В.И. Процессный подход и статистические методы в управлении качеством закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова, Р.И. Макаров, Ю.М. Обухов // Стекло и керамика. – 2008. – №9. – С.36-38. (Соискатель – 70%).

2. Мазанова, В.И. Анализ процесса закалки гнутых автомобильных стекол и выработка предложений для повышения качества выпускаемых изделий [Электронный ресурс] / В.И. Мазанова, Р.И. Макаров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/113-11478> (дата обращения: 01.01.2014) (Соискатель – 90%).

В прочих изданиях:

3. Мазанова, В.И. Обзор научных исследований в области автоматизации технологических процессов производства листового стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Вестник филиала Всероссийского заочного финансово-экономического института в г. Владимире. Выпуск 2. – Владимир, 2007. – С.127.

4. Мазанова, В.И. Ключевые показатели технологического процесса производства безопасного закаленного стекла для наземного транспорта [Текст] / В.И. Мазанова, Ю.М. Обухов // Трансформация экономики регионов в условиях устойчивого развития: теория и практика. Материалы межвузовской научно-практической конференции. - Владимир: ВЗФЭИ, 2008. – С.209 (Соискатель – 80%).

5. Mazanova V.I. The process approach and statistical methods in quality control of hardened glass / V.I. Mazanova, R.I. Makarov, Yu. M. Obukhov // Glass and Ceramics, Springer US, 2009.- vol.65, no.9, pp.328 (Соискатель – 70%).

6. Мазанова, В.И. Ключевые характеристики технологического процесса производства безопасного закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Математические методы в технике и

технологиях (ММТТ-21): сб. тр. XXI Междунар. науч. конф.: В 11 т. Т.11: Осенняя школа молодых ученых / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.С. Балакирева; Тамб. гос. техн. ун-та. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – С.131.

7. Мазанова, В.И. Оценка технологического процесса производства закаленного автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Алгоритмы, методы и системы обработки данных: Сборник научных статей / Под ред. С.С. Садыкова, Д.Е. Андрианова – М.: «Центр информационных технологий в природопользовании», 2008. – С.83.

8. Мазанова, В.И. Исследование и разработка математических моделей технологического процесса производства закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Современные технологии и методы исследований. Сборник материалов межвузовской студенческой научной конференции. Владимир. ВЗФЭИ, 2009. – С.23.

9. Мазанова, В.И. Исследование моделей закалки автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб. трудов XXII Междунар. науч. конф.: в 11 т. Т.11: Летняя Школа молодых ученых / под общ.ред. д.т.н., проф. В.С. Балакирева; Иваново: изд-во Ивановского гос. хим.-технол. ун-та, 2009. – С.279.

10. Мазанова, В.И. Анализ моделей нейронных сетей, описывающих зависимость формы стекла от режима закалки [Текст] / В.И. Мазанова // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23 [текст]: сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.10. Секция 11 / под общ. ред. В.С. Балакирева. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. – С.51.

11. Мазанова, В.И. Исследование моделей нейронных сетей, описывающих зависимость формы стекла от режима закалки [Текст] / В.И. Мазанова // Вестник Костромского гос. ун-та имени Н.А. Некрасова. Серия: Технические и естественные науки «Системный анализ. Теория и практика». – 2010. – № 1. – С.44.

12. Мазанова, В.И. Исследование моделей нейронных сетей, описывающих зависимость механической прочности стекла от режима закалки [Текст] / В.И. Мазанова // Вестник Костромского гос. ун-та имени Н.А. Некрасова. Серия: Технические и естественные науки «Системный анализ. Теория и практика». – 2010. – № 2. – С.23.

13. Мазанова, В.И. Структуризация целей и задачи управления производством закаленного автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Информационный менеджмент социально-экономических и технических систем – 2011: сборник материалов II Международной молодежной научно-практической школы (г. Москва). – Владимир: Транзит-ИКС, 2011. – С.35.

14. Мазанова, В.И. Анализ технологического процесса производства закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова, Е.Ю. Шагивалеева // Материалы Второй открытой городской научно-практической конференции школьников и студентов «Решение – 2013», Березники, 18 октября 2013. – Пермь: Березниковский филиал Перм. гос. национ. иссл. политехн. ун-та, 2013. – С.63 (Соискатель – 80%).

15. Мазанова, В.И. Анализ стабильности и точности технологических режимов производства закаленного стекла [Текст] / В.И. Мазанова, Е.Ю. Шагивалеева // Алгоритмы, методы и системы обработки данных: сборник научных статей; Выпуск 26/Под ред. С.С. Садыкова, Д.Е. Андрианова – Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО ВлГУ, 2013. – С.3 (Соискатель – 80%).

16. Мазанова, В.И. Управление процессом закалки гнутого автомобильного стекла [Текст] / В.И. Мазанова // Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2013» Volume 40. Techniczne nauki. Fizyka.: Przemysł. Nauka i studia, 2013. – С.12.

Подписано в печать __.04.2014.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ ____ – 2014 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в АНО «Типография на Нижегородской»
600020, Б. Нижегородская, 88-Д.