

На правах рукописи



**РОДЕНКОВ ЕГОР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧИ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕЗИНФЕКЦИИ  
ПЭТ-БУТЫЛОК С ПОМОЩЬЮ ОЗОНА  
(на примере розлива пива)**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в пищевой промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2005

Работа выполнена на кафедре “Автоматизация технологических процессов” Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет пищевых производств».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Благовещенская Маргарита Михайловна**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Матисон Валерий Арвидович**

доктор технических наук, профессор  
**Ивашкин Юрий Алексеевич**

**Ведущая организация:** ГУП НИИ «Мир-Продмаш»

Защита состоится «12» мая 2005 г. в 10<sup>00</sup> час. на заседании Диссертационного Совета Д 212.148.02 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: г. Москва, Волоколамское ш., д.11, ауд. 302

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское ш., д.11, ГОУ ВПО МГУПП, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.148.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО МГУПП.

Автореферат разослан «8» апреля 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.148.02,  
к.т.н., доцент



Н.О. Воронина

2005-4  
42939

2038647

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время пивоваренная промышленность вступила в период бурного развития. В связи с ростом конкуренции на данном рынке для каждого отдельного предприятия актуален вопрос производства высококачественного пива с длительным сроком хранения. Для повышения конкурентоспособности показатели качества готовой продукции должны соответствовать международному стандарту ISO 9000.

Дезинфекция технологического оборудования, производственных помещений, тары и т.д. является обязательной и в то же время трудоемкой операцией на всех пивоваренных предприятиях, во многом предопределяющей биологическую ценность, сроки хранения и безопасность потребления пищевых продуктов.

На сегодня основным проблемным местом производства пива по микробиологической нестабильности является конечный этап, а именно, его розлив. Это объясняется тем, что воздух внутри цеха розлива не стерилен, внутренние и наружные поверхности бутылок и пробок не стерильны, бугылки и пробки транспортируются цеховым воздухом в зону розлива, принося в неё большое количество бактерий и создавая эффект накопления. Известные решения проблемы обеспечения микробиологической чистоты ПЭТ-бутылок, пока не соответствуют современному уровню техники и технологии, каковым является розлив пива в ПЭТ-бутылки.

Анализ современных тенденций в исследованиях ведущих отечественных и зарубежных ученых показывает, что для дезинфекции наиболее перспективным является способ, реализующий обработку поверхностей бутылок озono-воздушной смесью. Одним из неоспоримых преимуществ этого способа является возможность механизации и автоматизации процесса.

Решение данной проблемы позволит значительно повысить и стабилизировать качество производимых напитков, избежать длительных, в течение 48 часов, лабораторных анализов. Кроме того, своевременная корректировка процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок с учетом оперативно получаемой информации об основных показателях состояния процесса позволит достичь оптимального соотношения между себестоимостью и качеством готовой продукции, решить чрезвычайно важную задачу экономии энергоресурсов.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является разработка научных основ автоматизации процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок в потоке с помощью озона, в том числе разработка, научное обоснование и создание методов и средств контроля состояния этого процесса, обеспечивающих выработку пивоваренной продукции стабильно высокого качества с повышенным сроком ее хранения.

**Основные задачи исследования.** Для достижения поставленной цели определены следующие задачи исследований.

- обоснование принципов решения проблемы и выбор средства дезинфекции ПЭТ-бутылок, отвечающего возможностям автоматизации;
- разработка принципиальной схемы ведения процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок, предопределяющей дальнейшую автоматизацию;
- выявление и анализ основных особенностей и закономерностей процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок с применением озона;
- проведение анализа и классификация градаций качества дезинфекции ПЭТ-бутылок на основе исследования экспериментальных данных по контролируемым параметрам этого процесса;
- разработка метода, позволяющего в реальном времени установить соответствие процесса дезинфекции определенной градации качества;
- разработка математического описания технологического процесса дезинфекции с взаимозависимыми параметрами;
- разработка и обоснование математической модели контроля состояния процесса дезинфекции в пространстве значений обобщенных показателей;
- разработка алгоритма контроля состояния технологического процесса дезинфекции;
- разработка на базе современного программного и аппаратного обеспечения технических решений АСУ ТП для реализации предложенного метода контроля процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок.

**Методы и средства исследований.** Для решения поставленных задач в работе используются методы индукции и дедукции, теории автоматического управления, математического и физического моделирования, элементы теории принятия решений, теории множеств, методы системного анализа, планирования и обработки результатов экспериментов. Экспериментальные исследования проведены с помощью стандартных методик и поверенных приборов, персонального компьютера (ПК) Pentium-4 с использованием пакетов прикладных программ Neural Analyser 3.0, MatLab 6.5.

**Научная новизна** исследования, обеспечивающая достижение цели работы, заключается в следующем:

- разработана принципиальная схема ведения процесса дезинфекции, а также применявшийся ранее способ решения проблемы обеспечения микробиологической чистоты ПЭТ-бутылок в процессе розлива с помощью озono-воздушной смеси, отвечающий возможностям автоматизации и соответствующий современному уровню техники и технологии;
- разработан общий подход к контролю состояния процессов дезинфекции ПЭТ-бутылок с помощью озона;

Анализ проведенных исследований показал, что наиболее целесообразным путем решения этих проблем является:

- локализация и автономизация транспортного потока бутылок в среде рабочей зоны в едином герметичном пространстве;
- совмещение функций накопления и стерилизации пустых бутылок и дальнейшее транспортирование их стерильным воздухом;
- стерилизация всех поверхностей бутылки и газовой рабочей среды транспортирующей установки;
- использование наиболее экологичного дезинфектанта в минимально возможных концентрациях для стерилизации, с его дальнейшей простой и эффективной нейтрализацией;
- исключение влияния дезинфектанта на разливаемое пиво.

Выбор озона в качестве дезинфектанта определяется рядом преимуществ:

- не влияет на материал бутылки;
- обеспечивает высокий бактерицидный эффект и создает благоприятные условия для разработки полностью автоматизированных систем дезинфекции;
- бактерицидные компоненты создаются под действием высоковольтного газового разряда, при отключении которого самопроизвольно нейтрализуются в течение определенного временного интервала, не загрязняя объект и атмосферу остаточными продуктами

**Вторая глава** посвящена: разработке принципиальной схемы процесса; исследованию процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок озono-воздушной смесью как объекта управления и методов автоматизированного контроля его состояния

Возможность реального использования озono-воздушной смеси в качестве эффективного дезинфектанта ПЭТ-бутылок при работе линии розлива подтверждена проведенными в производственных условиях экспериментами.

Основной задачей технологического процесса дезинфекции является обеспечение равномерного контакта определенной продолжительности между озono-воздушной смесью в требуемой концентрации и всей площадью внутренней и внешней поверхностей бутылки, а также выдержки бутылок в течение определенного времени с целью их стерилизации и деструкции озono-воздушной смеси

Выявленные задачи и преимущества призваны реализоваться в разработанных автором совместно с кафедрой АТП ГОУ ВПО МГУПП предполагаемых изобретениях: «Способ переноса и стерилизации пустых бутылок и установка для его осуществления» заявка на изобретение №2004104185 и «Способ непрерывной озonoвой стерилизации мелких предметов» заявка на изобретение №2004104186.

На рис.1 представлена принципиальная схема способа дезинфекции ПЭТ-бутылок в потоке.

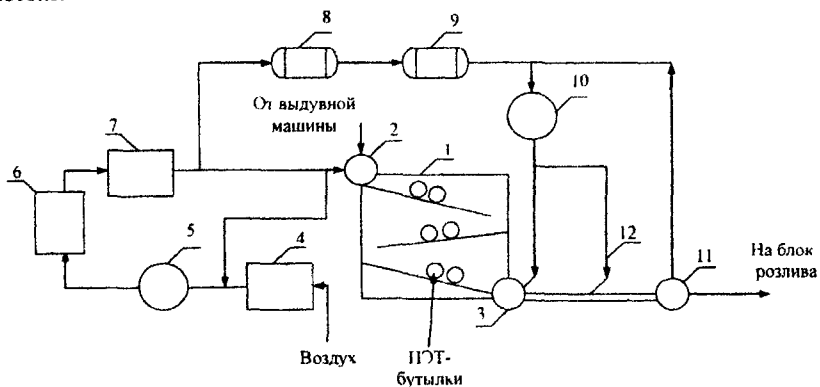


Рис 1 Принципиальная схема способа для дезинфекции ПЭТ-бутылок

1- накопительный бункер, 2- приемный шлюзовой затвор. 3- выпускной шлюзовой затвор, 4- блок очистки воздуха, 5- компрессор, 6- блок осушки воздуха 7- генератор озона, 8- ресивер озono-воздушной смеси, 9- ресивер стерильного воздуха, 10- компрессор, 11- прямо-передающая шлюзовая станция, 12- дополнительные сопла

Предлагаемый способ осуществляется следующим образом Пустые бутылки, ориентированные горлышком в сторону обрабатывающих сопел, поступают из выдувной машины через приемный шлюзовой затвор 2 в накопительный бункер 1 Его объем и количество полок должны обеспечивать запас бу гылок от 30 минут до 1 часа работы линии розлива с заданной производительностью

Через сопла в шлюзовом затворе 2 на внутреннюю и наружную поверхность бутылки подается озono-воздушная смесь, с концентрацией озона  $Co_3$  При этом воздух из бутылки вытесняется. Внешний воздух проходит через блок очистки 4 и с помощью компрессора 5 подается в блок осушки воздуха 6. Подготовленный таким образом воздух с температурой  $t$  и влажностью  $W$  подается под давлением  $P$  в генератор озона 7. Концентрация озона в озono-воздушной смеси на выходе генератора зависит от частоты  $f$  источника питания и температуры воды  $t_w$ , охлаждающей электроды.

Все изученные методы дезинфекции озонoм основаны на намеренном значительном завышении концентрации озона, с целью предотвращения влияния возможных возмущений Величина концентрации озона в этом случае служит основным критерием качества, только впоследствии подтверждаемым контрольными лабораторными исследованиями.

Анализ проведенных исследований показал, что наиболее целесообразным путем решения этих проблем является:

- локализация и автономизация транспортного потока бутылок в среде рабочей зоны в едином герметичном пространстве;
- совмещение функций накопления и стерилизации пустых бутылок и дальнейшее транспортирование их стерильным воздухом;
- стерилизация всех поверхностей бутылки и газовой рабочей среды транспортирующей установки;
- использование наиболее экологичного дезинфектанта в минимально возможных концентрациях для стерилизации, с его дальнейшей простой и эффективной нейтрализацией;
- исключение влияния дезинфектанта на разливаемое пиво.

Выбор озона в качестве дезинфектанта определяется рядом преимуществ:

- не влияет на материал бутылки;
- обеспечивает высокий бактерицидный эффект и создает благоприятные условия для разработки полностью автоматизированных систем дезинфекции;
- бактерицидные компоненты создаются под действием высоковольтного газового разряда, при отключении которого самопроизвольно нейтрализуются в течение определенного временного интервала, не загрязняя объект и атмосферу остаточными продуктами.

**Вторая глава** посвящена: разработке принципиальной схемы процесса; исследованию процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок озono-воздушной смесью как объекта управления и методов автоматизированного контроля его состояния.

Возможность реального использования озono-воздушной смеси в качестве эффективного дезинфектанта ПЭТ-бутылок при работе линии розлива подтверждена проведенными в производственных условиях экспериментами.

Основной задачей технологического процесса дезинфекции является обеспечение равномерного контакта определенной продолжительности между озono-воздушной смесью в требуемой концентрации и всей площадью внутренней и внешней поверхностей бутылки, а также выдержки бутылок в течение определенного времени с целью их стерилизации и деструкции озono-воздушной смеси.

Выявленные задачи и преимущества призваны реализоваться в разработанных автором совместно с кафедрой АТП ГОУ ВПО МГ УПИ предполагаемых изобретениях: «Способ переноса и стерилизации пустых бутылок и установка для его осуществления» заявка на изобретение №2004104185 и «Способ непрерывной озonoвой стерилизации мелких предметов» заявка на изобретение №2004104186.

На рис.1 представлена принципиальная схема способа дезинфекции ПЭТ-бутылок в потоке.

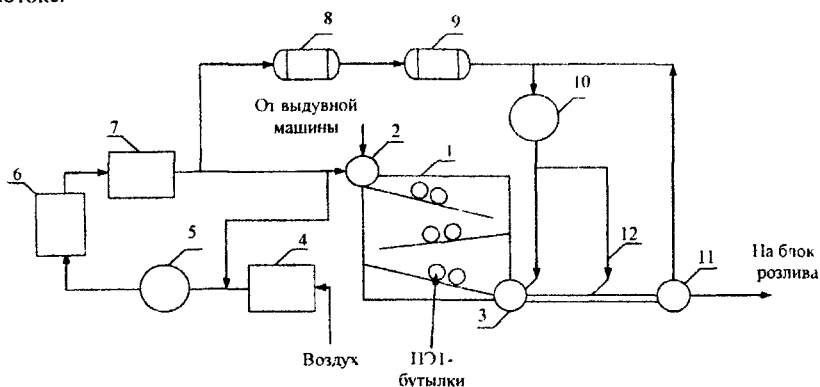


Рис 1 Принципиальная схема способа для дезинфекции ПЭТ-бутылок

1- накопительный бункер, 2- приемный шлюзовой затвор 3- выпускной шлюзовой затвор, 4- блок очистки воздуха, 5- компрессор, 6- блок осушки воздуха, 7- генератор озона, 8- ресивер озono-воздушной смеси 9- ресивер стерильного воздуха, 10- компрессор, 11- прямо-передающая шлюзовая станция, 12- дополнительные сопла

Предлагаемый способ осуществляется следующим образом. Пустые бутылки, ориентированные горлышком в сторону обрабатывающих сопел, поступают из выдувной машины через приемный шлюзовой затвор 2 в накопительный бункер 1. Его объем и количество полок должны обеспечивать запас бутылок от 30 минут до 1 часа работы линии розлива с заданной производительностью

Через сопла в шлюзовом затворе 2 на внутреннюю и наружную поверхность бутылки подается озono-воздушная смесь, с концентрацией озона  $Co_3$ . При этом воздух из бутылки вытесняется. Внешний воздух проходит через блок очистки 4 и с помощью компрессора 5 подается в блок осушки воздуха 6. Подготовленный таким образом воздух с температурой  $t$  и влажностью  $W$  подается под давлением  $P$  в генератор озона 7. Концентрация озона в озono-воздушной смеси на выходе генератора зависит от частоты  $f$  источника питания и температуры воды  $t_w$ , охлаждающей электроды.

Все изученные методы дезинфекции озонem основаны на намеренном значительном завышении концентрации озона, с целью предотвращения влияния возможных возмущений. Величина концентрации озона в этом случае служит основным критерием качества, только впоследствии подтверждаемым контрольными лабораторными исследованиями.



Проведенный нами обзор и анализ научно-технической информации показал, что основным выходным параметром, определяющим качество работы предложенного способа, является проба бутылок на общее микробное число (ОМЧ).

К сожалению, измерительные средства, позволяющие определять значения ОМЧ в потоке или, хотя бы, делать экспресс анализ ОМЧ в настоящее время отсутствуют, и вряд ли следует ожидать их создания в ближайшем будущем. На сегодняшний день значение ОМЧ определяется лабораторным способом. Время анализа составляет в среднем 48 часов, что не дает возможности включать ОМЧ в список параметров, пригодных для использования в режиме реального времени.

Одним из косвенных показателей качества является концентрация озона в озонозвоздушной смеси, подаваемой в бутылку. Это подтверждается опубликованными экспериментальными зависимостями выживаемости микрофлоры от концентрации озона. Однако влияние многих неконтролируемых факторов, таких как начальная зараженность бутылки и природная изменчивость микроорганизмов, зависящая от колебаний температуры и влажности, приводят к низкой сходимости результатов процесса.

Дополнительными косвенными показателями качества процесса дезинфекции могут служить направленность воздействия, скорость истечения озонозвоздушной смеси, а также форма внутренней поверхности сопла, определяющие объем наполнения и характер омывания поверхностей бутылки, что в свою очередь влияет на летальность микроорганизмов, расположенных на поверхностях сосуда.

Таким образом, интерес представляет постановка и решение задачи обеспечения группирования (кластеризации) реализаций процессов по всем косвенным, измеряемым в потоке параметрам. Решение указанной задачи позволит прогнозировать качество продукта (степень «чистоты» бутылок) в ходе протекания процесса дезинфекции и корректировать ситуацию так, чтобы обеспечить гарантированное качество при минимально возможных экономических затратах.

**Третья глава** посвящена разработке метода и алгоритма кластеризации процессов дезинфекции ПЭ-бутылок в реальном времени.

В работе показано, что объединение процессов в группы по градациям качества, характеризующим эффективность их проведения, успешно применяется при решении задач контроля и управления микробиологическими, химическими и др. процессами. Используя для группировки значение целевого признака, выделяют "плохие" и "хорошие" процессы. Граничные значения целевого признака при этом либо обосновывают теоретически, либо определяют экспериментально. В нашем случае будем опираться на практически сложившиеся граничные значения.

Анализ экспериментальных данных показывает, что из всех процессов дезинфекции только 28.3% признаны «плохими» (у которых ОМЧ > 50 кол-во/см<sup>3</sup>), но исправимыми при

соответствующем вмешательстве. Остальные 71,7% признаны как «хорошие». Кроме того, данные показывают, что для снижения ОМЧ ниже 20 кол-во/см<sup>3</sup> необходимо резкое увеличение концентрации озона, подаваемого в бутылку. Это экономически нецелесообразно, так как приводит к увеличению потребляемой мощности, расхода подаваемого воздуха и охлаждающей электроды воды, а также возрастают коррозионная агрессивность и токсичность озона, время его диссоциации после завершения дезинфекции. Поэтому, исходя из соображений экономного и рационального использования материальных и энергетических ресурсов на производстве, в традиции качества «хорошие» выделена ещё одна группа процессов. Таким образом, реализации процессов дезинфекции разделены на следующие группы:

1. Группа нормальных процессов (НП) с  $20 < \text{ОМЧ} < 50$  - вмешательство с целью исправления качественных параметров не требуется.
2. Группа экономически невыгодных процессов (ЭНП) с  $\text{ОМЧ} < 20$  – вмешательство в ход процесса целесообразно по экономическим соображениям.
3. Группа восстановимых процессов (ВП) с  $\text{ОМЧ} > 50$  вмешательство в ход процесса позволит достичь желаемых качественных показателей, тогда как отсутствие вмешательства, с большой долей вероятности, приведет к неудовлетворительному качеству.

Подобное разделение позволит описать все возможные ситуации, возникающие в ходе технологического процесса и решать задачи прогнозирования итоговых качественных характеристик.

Рассмотренный в диссертационной работе процесс дезинфекции характеризуется вектором параметров состояния согласно таблице 1.

Параметры, контролируемые в ходе процесса дезинфекции бутылок

Таблица 1

Условное обозначение	Наименование	Единицы измерения	Пределы изменения	Примечание
X <sub>1</sub>	Концентрация озона – O <sub>3</sub>	мг/м <sup>3</sup>	20 50	Измеряется автоматически
X <sub>2</sub>	Частота источника питания - f	кГц	4 6	— „ —
X <sub>3</sub>	Температура воздуха - t	К	293 313	— „ —
X <sub>4</sub>	Влажность воздуха - W	%	10 20	— „ —
X <sub>5</sub>	Температура охл. воды - t <sub>в</sub>	К	313 333	— „ —
X <sub>6</sub>	Давление воздуха - P	кН/м <sup>2</sup> (бар)	100 200 (1 2)	— „ —
X <sub>7</sub>	ОМЧ	кол-во/см <sup>3</sup>	0 70	Определяется по результатам лабораторных исследований

Исследования проведенные автором, позволяют сделать заключение о возможности однозначного определения, к какой группе (НП, ЭНП, ВП) можно отнести ту или иную реализацию процесса, если для неё определено ОМЧ.

Для выбора подхода к решению задачи предварительно был сделан корреляционный анализ вектора параметров состояния, подтвердивший предположение о тесной статистической связи между параметрами состояния и ОМЧ и, как следствие, о принципиальной возможности получения достаточно полной информации о ходе процесса без учета ОМЧ.

С целью решения задачи группировки (кластеризации) реализаций процесса на НП, ЭНП, ВП были применены нейросетевые технологии, в частности, самоорганизующиеся карты Кохенена (SOM).

Применение SOM позволяет максимально уменьшить пространство состояний процесса, то есть получить некий обобщенный показатель, однозначно трактуемый, к какой из групп следует отнести реализацию. Особенностью применения SOM, существенно облегчающей решение рассматриваемой задачи, является наличие в обучающей выборке параметра ОМЧ, который может быть использован в качестве эталона на этапе обучения (обучение с учителем), а также для проверки правильности кластеризации.

Для моделирования самоорганизующейся карты использована программа SOMap Analyzer v3.0, разработанная фирмой Base Group Labs. Для начала работы была проведена проверка имеющихся исходных данных на достоверность.

По итогам обучения SOM получена карта (рис.2), показывающая разделение исходных данных на кластеры.

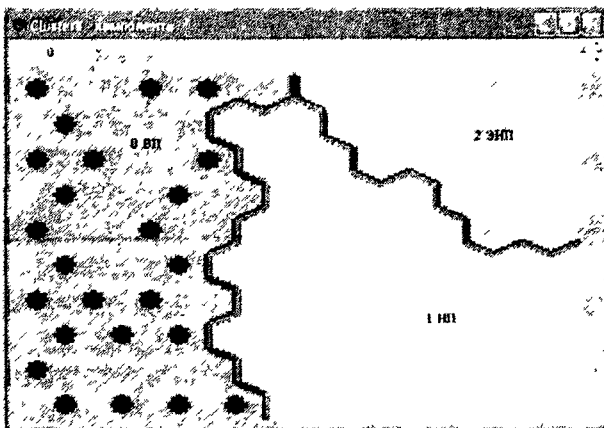


Рис. 2 Карта, реализующая разделение на кластеры

По итогам кластеризации получено однозначное отделение «экономически невыгодных» процессов от всех остальных. Однако группа «нормальных» процессов представлена не полностью, так как часть из них попадает в группу «восстановимых» процессов, а часть в группу «экономически невыгодных». Проведенный в главе расчет показывает, что точность распознавания карты составляет 92,0%

$$T = \frac{n - n_{nr}}{n} 100\%, \quad (1)$$

где  $n$  – общее количество процессов,  $n_{nr}$  – количество неправильно распознанных процессов.

При проверке качества настройки с помощью гестового множества данных получена итоговая точность распознавания карты равная 88,0%

В результате моделирования получена карта, однозначно разделяющая процессы по выбранным градациям качества в режиме реального времени без проведения длительного лабораторного анализа. Действительно, при поступлении данных  $X_1 \dots X_6$  в момент времени  $t$  карта отнесет текущий процесс к одной из градаций качества. Вмешательство в ход процесса необходимо для градаций качества ВП и ЭНП.

**Четвертая глава** посвящена разработке теоретических положений метода контроля состояния процесса дезинфекции по обобщенным показателям.

Для математического описания процесса использован метод главных компонент (ГК), позволяющий судить о состоянии процесса по некоррелированным признакам (функциям от параметров процесса). Протекание процесса дезинфекции сопровождается изменением параметров согласно таблице 1 и каждый из них может быть представлен временным рядом, содержащим  $N$  наблюдений

$$x_i(t) = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^p\}, \quad i \in \overline{1, N}, \quad t \in \overline{1, n}$$

Совокупность значений параметров является многомерным процессом вида  $\chi = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$  отображающим (в условиях реального наблюдения) изменения  $n$  параметров. Для обеспечения сопоставимости параметров, имеющих различную физическую природу, использована процедура нормирования, выражающаяся в преобразовании

$$z_i^t = \frac{x_i^t - \bar{x}_i}{S(x_i)} \quad (2)$$

где  $\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_i^t$  – среднее значение  $i$ -го параметра;

$S(x_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (x_i^t - \bar{x}_i)^2}$  – среднее квадратическое отклонение  $i$ -го параметра

Для вычисления значений главных компонент используется выражение

$$V_j^i = \sum_{l=1}^p u_{jl} z_l^i, \quad j \in \overline{1, p}. \quad (3)$$

где  $u_{jl}$  – нагрузка (коэффициент)  $i$ -го параметра при  $j$ -й главной компоненте.

Установлено, что эмпирические данные многомерного процесса  $Z = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)\}$  можно выразить через главные компоненты следующим образом

$$z_i^t = \sum_{j=1}^p u_{ij} V_j^i, \quad p \leq n, \quad i \in \overline{1, n} \quad (4)$$

Полученное выражение показывает способ разложения эмпирических функций  $z_i(t)$  по статически ортогональным главным компонентам, трактуемым как обобщенные показатели состояния, и дает математическое описание протекания процесса.

По методу главных компонент проведена обработка эмпирических данных о ходе группы процессов дезинфекции бутылок. В таблице 2 приведены полученные значения величин, необходимых для вычисления трех обобщенных показателей в соответствии с выражением 3.

Величины для вычисления обобщенных показателей

Таблица 2

Параметр	$\bar{X}_i$	$S(z_i)$	Нагрузки параметров		
			$u_{1i}$	$u_{2i}$	$u_{3i}$
$x_1$	32,0142	8,7772	0,5443	-0,1404	0,2102
$x_2$	5,0083	0,5570	0,3851	-0,0618	-0,8480
$x_3$	24,9887	0,8250	-0,2249	-0,6602	-0,1074
$x_4$	15,0175	1,7382	-0,4853	0,1064	0,0865
$x_5$	45,1121	0,9398	-0,1015	-0,7147	0,0561
$x_6$	1,5887	0,1788	0,5089	-0,1358	0,4632

Для оценки доли суммарной вариабельности исходных эмпирических данных, отображаемой в  $p$  обобщенных показателях использован критерий вида

$$\eta_p = \sum_{j=1}^p \lambda_j / \sum_{i=1}^n S^2(z_i), \quad p \leq n, \quad (5)$$

где  $\lambda_j$  – дисперсия  $j$ -й ГК,  $S^2(z_i)$  – дисперсия  $i$ -го параметра.

Учтенная в  $p$  обобщенных показателях часть дисперсии  $i$ -го параметра процесса определяется из выражения

$$S^-(z_i) = \sum_{j=1}^p S_j^2(z_i) = \sum_{j=1}^p u_{ij}^2 \lambda_j \quad (6)$$

Величины  $\eta_p$  и  $\sum_{j=1}^p S_j^2(z_i)$  используются для оценки точности аппроксимации эмпирических данных по  $p$  обобщенным показателям. В таблице 3 приведены их значения для рассмотренного примера.

Оценка точности аппроксимации

Таблица 3

Число обобщенных показателей	$\sum_{j=1}^p \lambda_j$	$\eta_p$	Учтенная дисперсия					
			$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
1	2,82	0.47	0,83	0.41	0.34	0.36	0.49	0.39
2	4,5	0.75	0,90	0.68	0.69	0.57	0.71	0.95
3	5,24	0.87	0,93	0.74	0.78	0,98	0.85	0.96

В главе также приведены методические приемы, используемые при анализе эмпирических данных с применением метода главных компонент для оценки статистической значимости различий между ( $n-p$ ) исключаемыми обобщенными показателями и определения группировки параметров по типу функциональной связи. Установлено, что первые три обобщенных показателя обеспечивают отображение 87% суммарной вариабельности параметров обучающей выборки процессов

Анализ нагрузок параметров  $u_j$  позволяет установить, что обобщенные показатели могут интерпретироваться в понятиях свойств технологического процесса: первый обобщенный показатель связан с концентрацией озона, второй – с давлением воздуха и третий – с влажностью воздуха. Для уточнения интерпретации обобщенных показателей проведена процедура упрощения факторной структуры, состоящая в определении нагрузок, обеспечивающих максимизацию величины варимакс – критерия  $w$

$$w = n \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_{ij}}{\lambda_j} \right)^4 - \sum_{j=1}^p \left( \sum_{i=1}^n \frac{(u_{ij})^2}{\lambda_j^2} \right)^2 \rightarrow \max_w \quad (7)$$

Значения нагрузок, при которых величина  $w$  равна максимуму, определяют группировку исходных параметров, позволяющую просто интерпретировать общие свойства процессов.

Для расчета граничных значений ГК использован подход, основанный на элементах теории нечеткой логики (процедуры фазификации и дефазификации). Согласно этому подходу, для каждого момента контроля  $t$  заданы функции принадлежности вида

$$\mu(V_{ij}) = e^{-\left| \frac{V_{ij} - a}{\varepsilon} \right|^m}, \quad (8)$$

где  $V_{ij}$  –  $i$ -я реализация для  $j$ -ой компоненты одного из множества ГК  $A_{ин}^{I_k}, A_{ви}^{I_k}$ ;  $a$  – значение ГК наиболее близкое к граничному (в идеале – ГК, соответствующее границе);  $\varepsilon$  –  $1/2$  диапазона пограничной области для  $j$ -ой ГК;  $m \geq 1$  – показатель, определяющий ширину функции принадлежности (на практике рекомендуется выбирать  $m=2$ )

Для расчета граничных значений  $\hat{V}_j$  применен метод центра тяжести, согласно которому

$$\hat{V}_j(t) = \frac{\sum_{i=1}^N V_{ij}(t) \mu_{i,j}}{\sum_{i=1}^N \mu_{i,j}}, \quad (9)$$

где  $N$  – количество реализаций.

Выражение (9) использовано для расчета  $\hat{V}_j(t)$  применительно к границам для ЭНП и ВП. Рассчитывая граничные значения ГК для оставшихся моментов контроля, получим матрицу граничных значений для всего процесса

Для построения процедуры управления определим параметры  $\tilde{V}_j(t) (j = \overline{1, p}, t = \overline{1, N})$ , соответствующие эталонному процессу дезинфекции. Значения  $V_{ij}(t)$  выбираются из архива главных компонент, используемого для расчета нагрузок, и должны соответствовать наиболее приемлемому с точки зрения требований к качеству процессу

Альтернативой указанному подходу к выбору  $\tilde{V}_j(t)$  может служить задание “желаемых” значений для  $\tilde{V}_j(t)$  на основе конструкторско-технологических соображений

Поставим задачу управления в форме оптимизационной задачи с критерием вида

$$J(t) = \sum_{j=1}^p \left( \tilde{V}_j(t) - \sum_{i=1}^n u_{ij} \hat{x}_i(t) + u_{0j} \right)^2 \rightarrow \min \quad \forall \hat{x}_i \in H'_{v_i}. \quad (10)$$

где  $p$  – количество главных компонент;  $u_{ij}$  – факторная нагрузка при  $i$ -м управляющем входе для  $j$ -й главной компоненты;  $u_{0j}$  – константа, включающая в себя сумму произведений факторных нагрузок на входные параметры, не являющиеся управляющими

$\hat{x}_i(t)$  входные управляющие параметры,  $Wx_i$  – область допустимых значений для управляющих параметров (автономные ограничения на каждую управляющую переменную)

Критерий (10) соответствует требованию минимизации суммы квадратов расстояний от “эталонной точки” до точки, реализуемой в ходе решения задачи управления в пространстве главных компонент, при условии соблюдения автономных ограничений на управляющие переменные

Задача (10) относится к классу задач безусловной оптимизации. Необходимые условия оптимальности

$$\frac{\partial I(t)}{\partial \hat{x}_i(t)} = 0, \quad \forall i = \overline{1, n} \quad (11)$$

приводят к системе из  $n$  уравнений вида

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \left( \hat{v}_j(t) - \sum_{i=1}^n u_{ji} \hat{x}_i(t) \right) u_{1j} = 0 \\ \sum_{j=1}^n \left( \hat{v}_j(t) - \sum_{i=1}^n u_{ji} \hat{x}_i(t) \right) u_{2j} = 0 \\ \sum_{j=1}^n \left( \hat{v}_j(t) - \sum_{i=1}^n u_{ji} \hat{x}_i(t) \right) u_{pj} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{v}_j(t) = \tilde{v}_j(t) + u_{0j}, \quad \forall j = \overline{1, p} \quad (12a)$$

Особенность системы алгебраических уравнений (12)–(12a) состоит в их линейности относительно управляющих переменных  $\hat{x}_i(t)$

Таким образом, если решение существует, эту систему можно разрешить относительно  $\hat{x}^*(t)$  с помощью правил Крамера. Посредством несложных математических выкладок уравнения (12)–(12a) приводятся к виду

$$\begin{cases} a_{11} \hat{x}_1(t) + a_{12} \hat{x}_2(t) + \dots + a_{1j} \hat{x}_j(t) = b_1 \\ a_{21} \hat{x}_1(t) + a_{22} \hat{x}_2(t) + \dots + a_{2j} \hat{x}_j(t) = b_2 \\ \dots \\ a_{p1} \hat{x}_1(t) + a_{p2} \hat{x}_2(t) + \dots + a_{pj} \hat{x}_j(t) = b_p \end{cases} \quad (13)$$

где  $a_{ij}$  – коэффициенты, зависящие от нагрузок;

$b_j$  – свободный член, зависящий от нагрузок и эталонных главных компонент

Решение задачи (при  $\Delta \neq 0$ )

$$\hat{x}_i^*(t) = \Delta x_i / \Delta, \quad \forall i = \overline{1, n} \quad (14)$$



где  $\Delta = \det \begin{bmatrix} a_{1i} & a_{1j} \\ a_{i1} & a_{ij} \end{bmatrix} \Delta x$  получается из  $\Delta$  заменой  $i$ -го столбца столбцом свободных слагаемых.

Полученные оптимальные решения следует использовать в качестве задающих воздействий в системе управления

Оптимальные решения (14) следует определять для каждого  $t$ -го момента времени в соответствии с заданным интервалом дискретизации  $T_0$ . Интервал дискретизации рекомендуется задавать, исходя из следующих основных условий:

- 1) для каждого  $t$ -го момента времени должны быть известны эталонные значения главных компонент;
- 2) временной интервал между  $(t-1)$  и  $t$ -й точками измерения должен быть с одной стороны достаточно большим, чтобы переходные процессы в системе завершились, с другой стороны не должен приводить к потере информации. В ходе исследований получено, что  $T_0$  следует выбирать из диапазона 5 – 10 минут

**Пятая глава** посвящена разработке алгоритмов управления и системы автоматизации процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок

Реализация разработанного метода контроля состояния процесса дезинфекции осуществляется в три этапа. На первом этапе настраивают самоорганизующуюся карту. Такая необходимость существует при первом пуске установки дезинфекции ПЭТ-бутылок. При этом архивы данных для проведения процедуры настройки берут от аналогичной установки. В случае отсутствия данных архивов необходимо провести серию экспериментов, целью которых является для каждого  $t$ -го момента времени контроля получение значений контролируемых параметров  $X_1 \div X_6$  и проведение отбора проб для анализа ОМЧ. После проведения лабораторного исследования (длится 48 часов) значения ОМЧ вводятся в программу.

Для корректировки SOM или изменении граничных ГК, процедуру настройки можно повторить, допустим, через год работы установки. Решение о повторной настройке принимает технолог.

На следующем этапе при помощи ГК получают математическое описание процесса и определяют параметры модели контроля. На последнем этапе по текущим значениям параметров технологического процесса при помощи SOM проводится оперативный контроль состояния процесса, а далее с помощью обобщенных показателей получают значения параметров процесса, выступающих в качестве задания регуляторам.

В общем виде, алгоритм управления представлен на рис.3. Для работы данного алгоритма необходимо иметь настроенную SOM и граничные значения ГК. Работа алгоритма начинается с получения вектора значений контролируемых параметров  $X$  в момент времени  $t$ . Далее эти значения поступают на вход SOM, которая относит

протекающий процесс к одной из градаций качества. Сами значения и присвоенная им градация качества заносятся в архив

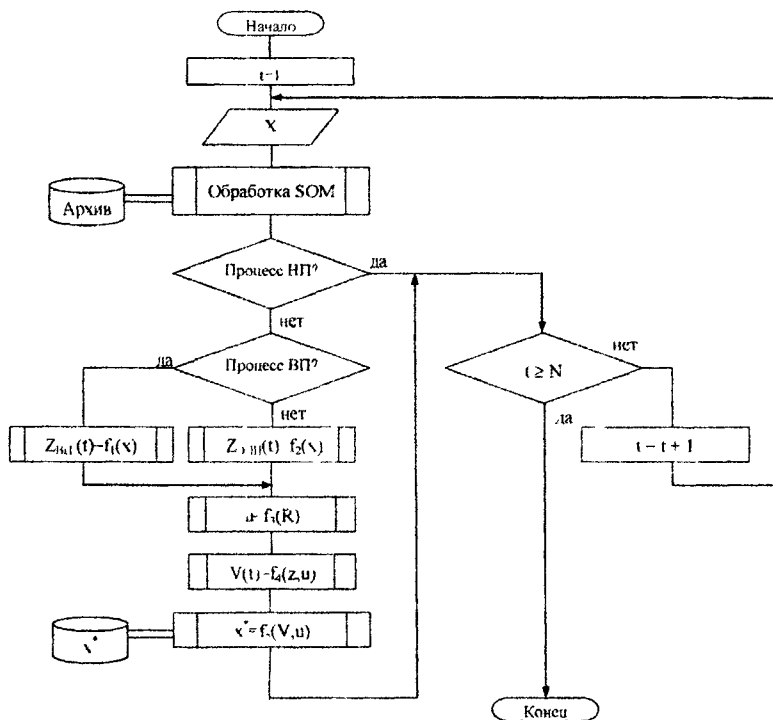


Рис.3 Алгоритм управления

В случае если на текущий момент времени  $t$  процесс имеет градацию качества НП и общее время протекания процесса не закончилось ( $t < N$ ), то алгоритм ожидает ввода следующих значений вектора  $X$ . В противном случае, т.е. если процесс имеет градацию качества ЭНП или ВП, рассчитываются  $Z_{ЭП}$  или  $Z_{ВП}$ . Далее определяются главные компоненты  $V$ .

На следующем этапе рассчитываются задания для регуляторов  $x^*$  и сохраняются в архиве. Далее, если общее время протекания процесса не закончилось ( $t < N$ ), то алгоритм ожидает ввода следующих значений вектора  $X$ . Значение общего времени  $N$  выбирается максимально большим или равным, например продолжительности смены (12 часов).

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет относить протекающий процесс дезинфекции ПЭТ-бутылок к одной из градаций качества, а в случае выхода процесса за

границы градации НИ вводит элемент управления, позволяющий возвратиться к нормальному протеканию процесса.

Проведенные исследования позволили разработать структуру и функции автоматизированной системы контроля технологического процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок. В работе показано, что в данном случае перспективной является иерархическая структура, где функции распределены между различными уровнями и техническими средствами АСУТП. Верхний уровень, построенный на базе персонального компьютера (ПК), используя специализированное программное обеспечение, разделяет процессы по градациям качества, проводит исследование процесса в пространстве обобщенных показателей и вырабатывает задания регуляторам. Функции сбора и предварительной обработки информации с датчиков, а также функции управления осуществляются с использованием технического средства нижнего уровня АСУТП – микропроцессорного контроллера.

Полученные в работе результаты показали, что проектируемая система контроля технологического процесса дезинфекции должна выполнять следующие функции:

1. Измерять давление, температуру и влажность воздуха перед генератором озона; температуру воды, охлаждающей электроды генератора; концентрацию озона, подаваемого в бутылки; концентрацию озона в воздухе рабочей зоны; давление в ресиверах.
2. Передавать данные измеренных величин в ПК.
3. Персональный компьютер должен выполнять визуализацию процессов дезинфекции, архивирование данных, построение и печать графиков и протоколов.

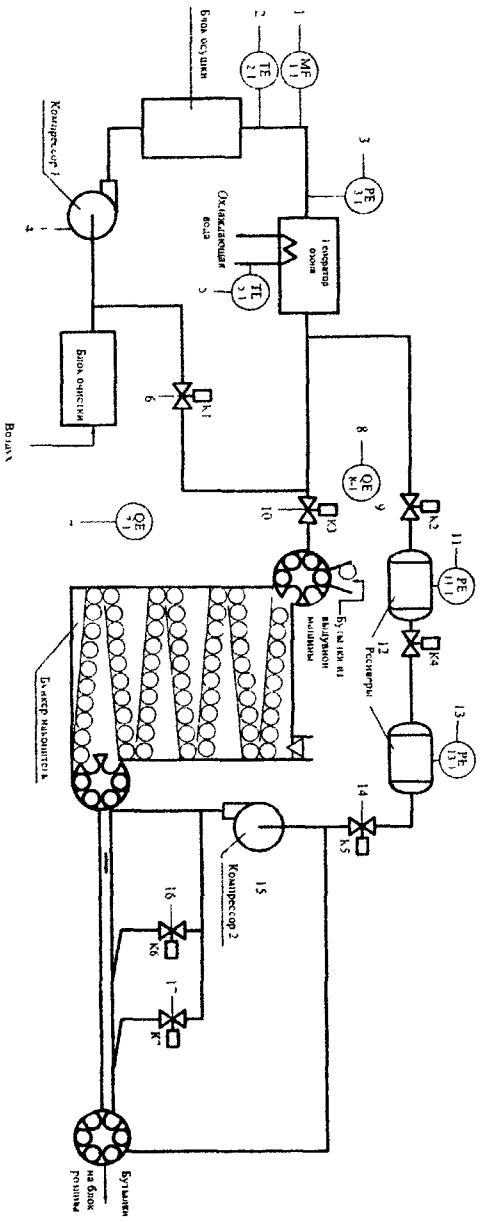
При этом система контроля должна иметь невысокую цену и состоять из распространённых компонентов.

Упрощенная функциональная схема автоматизации процесса дезинфекции представлена на рис.4.

В работе проведен анализ микроконтроллеров, по результатам которого предлагается использовать микроконтроллер фирмы Siemens S7 – 226-2DP AC/DC/Relay с модулями расширения.

Для выбора SCADA-пакета нами проведен анализ практически всех представленных на сегодняшний день на западном и российском рынках популярных SCADA-пакетов, таких как InTouch, Genesis, Trace Mode, Simplicity, Botec, WinCC, FIX, Sitex

По результатам анализа для написания проекта визуализации процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок в качестве SCADA-пакета был выбран WinCC, так как:



По месту	Назначение	В контрольном	
		II Вых	IV Вых
1	№ измер. влажн. возд.	МТ 2	МТ 7
2	№ измер. темпер. возд.	ТТ 11	ТТ 11
3	№ измер. давлен. возд.	РТ 2	РТ 2
4	Частотное регулир.	СК 1	СК 1
5	№ измер. темпер. воды	ТТ 11	ТТ 11
6	Давн. управл. К1	РТ 9	РТ 9
7	№ измер. конц. озона	ОТ 2	ОТ 2
8	№ измер. конц. озона	ОТ 2	ОТ 2
9	Логич. управл. К2	РП 9	РП 9
10	Логич. управл. К3	РП 9	РП 9
11	№ измер. давл.	РТ 11	РТ 11
12	Логич. управл. К4	РП 12	РП 12
13	№ измер. давл.	РТ 12	РТ 12
14	Логич. управл. К5	РП 14	РП 14
15	Частотное регулир.	СК 1	СК 1
16	Логич. управл. К6	РП 16	РП 16
17	Логич. управл. К7	РП 17	РП 17

Рис 4 Упрощённая ФСА установки для дезинфекции ЦЭТ-бутылок

1 При разработке систем автоматизации часто встает вопрос о создании собственных (не предусмотренных в рамках систем SCADA) программных модулей и включение их в создаваемую систему автоматизации. Поэтому степень открытости системы является важной характеристикой SCADA-пакетов. Фактически открытость системы означает доступность спецификаций системных (в смысле SCADA) вызовов, реализующих тот или иной системный сервис. Это может быть и доступ к графическим функциям, функциям работы с базами данных и т.д.

2. WinCC предоставляет более мощные средства создания интерфейса пользователя, что при создании проекта визуализации особенно важно;

3. Стоимость WinCC ниже стоимости конкурентов;

4. Для создания проекта визуализации на WinCC потребуется намного меньше времени, чем на других SCADA-пакетах.

По итогам проведенного анализа, для реализации системы контроля процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок в качестве базовой операционной системы была выбрана Windows XP Professional SP1.

Установка для дезинфекции ПЭТ-бутылок является частью линии розлива. Управление линией не ведется с единого персонального компьютера (ПК) оператора-технолога. Все установки входящие в состав линии розлива имеют локальное управление, т.е. содержат свой контроллер, ПК или панель оператора. Поскольку для управления установкой дезинфекции не требуется обслуживающего персонала, т.е. оператора, задающего какие-либо режимы работы, целесообразно выбрать промышленный ПК и встроить его в лицевую панель щита управления.

Наиболее часто в производстве используются промышленные ПК фирмы Siemens. Одним из таких ПК является SIMATIC Panel PC - компактный компьютер промышленного исполнения, предназначенный для встраивания в технологические установки, пульта операторов, оборудование и требует для своей установки минимальных объемов. Лицевая панель компьютера имеет степень защиты IP 65, что делает его наиболее пригодными для использования в загрязненной промышленной среде. Пыль не попадет внутрь, водяные струи, попадающие на поверхность экрана под любым углом, не причинят ему вреда.

На рис 5 показана одна из диаграмм SADT – модели процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок, описывающая основные функции системы управления. С помощью данной диаграммы можно выделить основные этапы разработки программного обеспечения. На первом этапе с помощью пакета Step 7 MicroWin создается программа для контроллера, выполняющая функции сбора информации с датчиков, её преобразования и передачи SCADA-пакету: ручного управления элементами установки, а также выработку управляющих воздействий для автоматического управления.

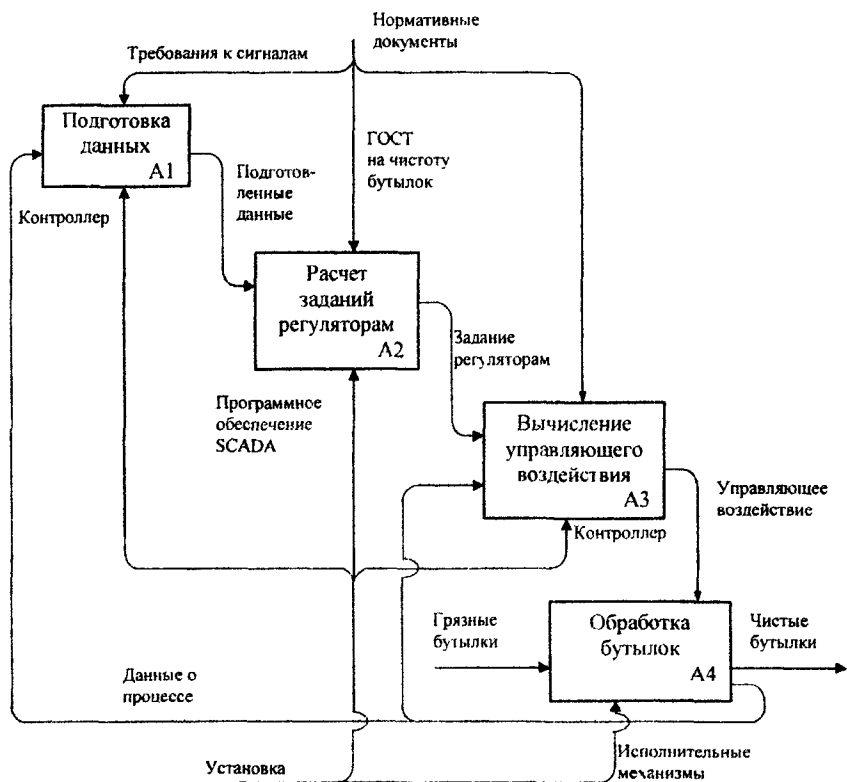


Рис.5 SADT – модель процесса дезинфекции

На следующем этапе с использованием SCADA-пакета WinCC создается проект визуализации работы установки дезинфекции ПЭТ-бутылок. Разработанный проект помимо визуализации процесса осуществляет архивацию данных о принадлежности процесса к градациям качества, выдачу и архивацию аварийных сообщений, построение различных графиков. Одной из задач данного проекта является расчет заданий регуляторам давления воздуха и концентрации озона, для выполнения которого используются блоки SOM и ГК.

Данные блоки создаются при помощи специализированных программных продуктов Neural Network Analyser и MatLab. Первый позволяет настроенную самоорганизующуюся карту скомпилировать в виде функции, вызываемой из проекта визуализации. Во второй закладываются аналитические выражения, полученные в данной работе, и также компилируются в функцию, вызываемую из проекта.

1. При разработке систем автоматизации часто встает вопрос о создании собственных (не предусмотренных в рамках систем SCADA) программных модулей и включение их в создаваемую систему автоматизации. Поэтому степень открытости системы является важной характеристикой SCADA-пакетов. Фактически открытость системы означает доступность спецификаций системных (в смысле SCADA) вызовов, реализующих тот или иной системный сервис. Это может быть и доступ к графическим функциям, функциям работы с базами данных и т.д.

2. WinCC предоставляет более мощные средства создания интерфейса пользователя, что при создании проекта визуализации особенно важно;

3. Стоимость WinCC ниже стоимости конкурентов;

4. Для создания проекта визуализации на WinCC потребуется намного меньше времени, чем на других SCADA-пакетах.

По итогам проведенного анализа, для реализации системы контроля процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок в качестве базовой операционной системы была выбрана Windows XP Professional SP1.

Установка для дезинфекции ПЭТ-бутылок является частью линии розлива. Управление линией не ведется с единого персонального компьютера (ПК) оператора-технолога. Все установки входящие в состав линии розлива имеют локальное управление, т.е. содержат свой контроллер, ПК или панель оператора. Поскольку для управления установкой дезинфекции не требуется обслуживающего персонала, т.е. оператора, задающего какие-либо режимы работы, целесообразно выбрать промышленный ПК и встроить его в лицевую панель щита управления.

Наиболее часто в производстве используются промышленные ПК фирмы Siemens. Одним из таких ПК является SIMATIC Panel PC - компактный компьютер промышленного исполнения, предназначенный для встраивания в технологические установки, пульты операторов, оборудование и требует для своей установки минимальных объемов. Лицевая панель компьютера имеет степень защиты IP 65, что делает его наиболее пригодными для использования в загрязненной промышленной среде. Пыль не попадет внутрь, водяные струи, попадающие на поверхность экрана под любым углом, не причинят ему вреда.

На рис 5 показана одна из диаграмм SADT – модели процесса дезинфекции ПЭТ-бутылок, описывающая основные функции системы управления. С помощью данной диаграммы можно выделить основные этапы разработки программного обеспечения. На первом этапе с помощью пакета Step 7 MicroWin создается программа для контроллера, выполняющая функции сбора информации с датчиков, её преобразования и передачи SCADA-пакету: ручного управления элементами установки, а также выработку управляющих воздействий для автоматического управления.

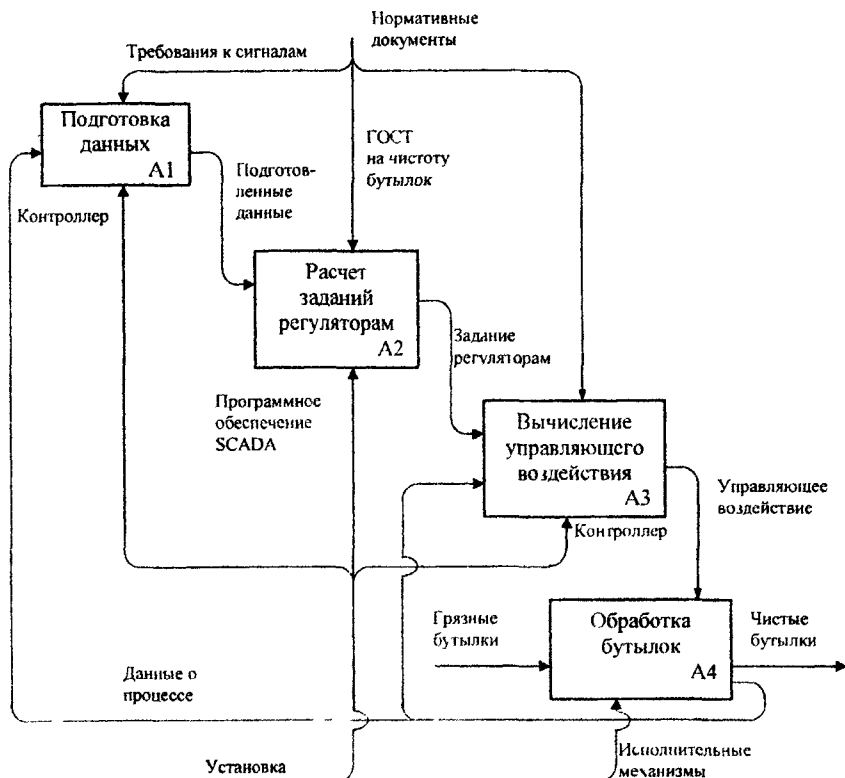


Рис.5 SADG – модель процесса дезинфекции

На следующем этапе с использованием SCADA-пакета WinCC создается проект визуализации работы установки дезинфекции ПЭТ-бутылок. Разработанный проект помимо визуализации процесса осуществляет архивацию данных о принадлежности процесса к градациям качества, выдачу и архивацию аварийных сообщений, построение различных графиков. Одной из задач данного проекта является расчет заданий регуляторам давления воздуха и концентрации озона, для выполнения которого используются блоки SOM и ГК.

Данные блоки создаются при помощи специализированных программных продуктов Neural Network Analyser и MatLab. Первый позволяет настроенную самоорганизующуюся карту скомпилировать в виде функции, вызываемой из проекта визуализации. Во второй закладываются аналитические выражения, полученные в данной работе, и также компилируются в функцию, вызываемую из проекта.



Подписано в печать 08.04.05.

Формат 30x42 1/8. Бумага типографская № 1 Печать офсетная.

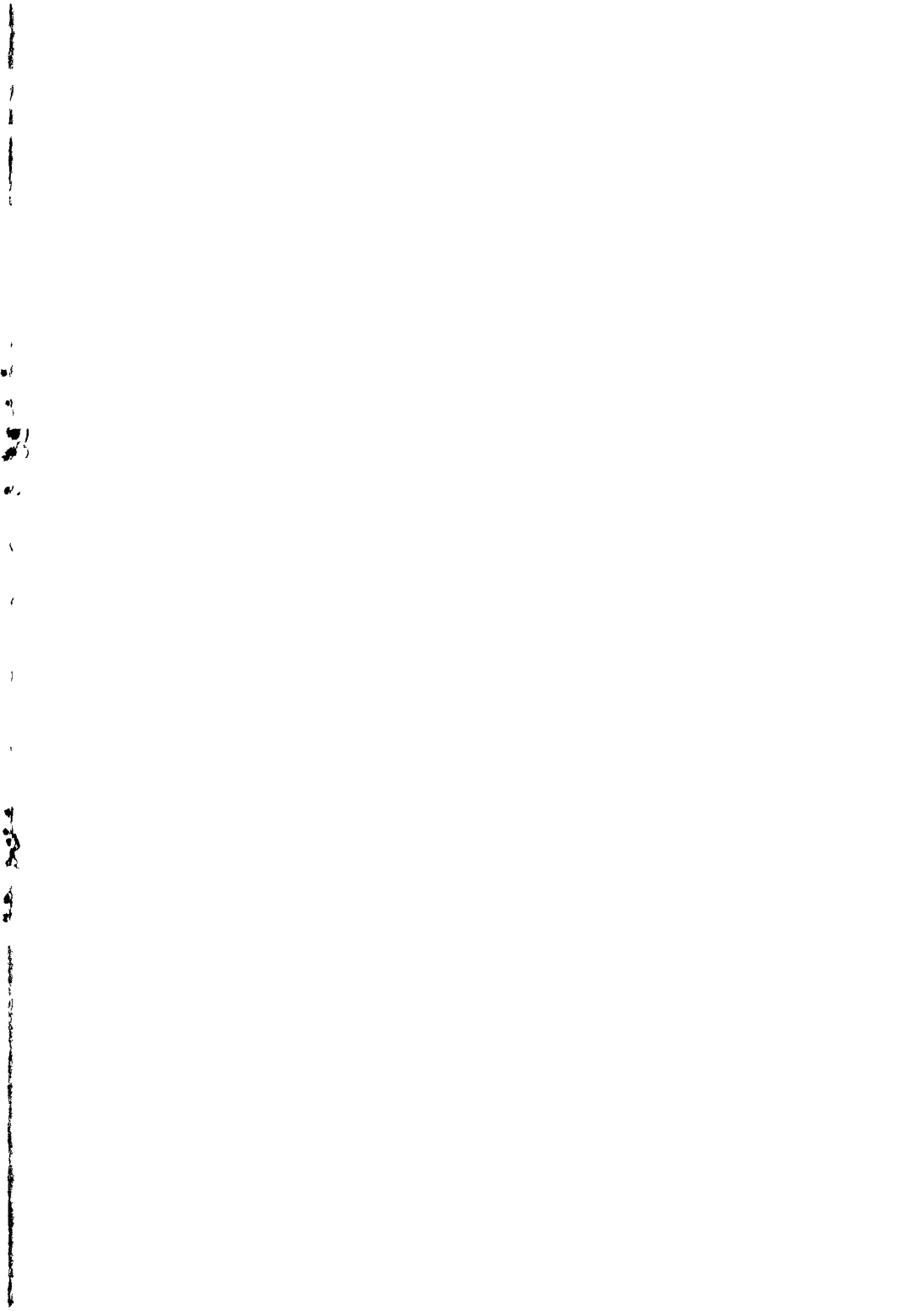
Печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ 95.

---

125080, Москва, Волоколамское ш., 11

Издательский комплекс МГУПП





РНБ Русский фонд

2005-4

42939



22 АПР 2005