

НИЙОНСАБА ТЕРЕНС

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
С НЕИЗВЕСТНЫМИ ЗАВИСИМОСТЯМИ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность: 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь - 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

Научный руководитель - Павлов Владимир Андреевич, кандидат военных наук, доцент, начальник НИО ЗАО «РТИС ВКО»

Официальные оппоненты

Вент Дмитрий Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов «Новомосковского института» (филиал ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»)

Шпрехер Дмитрий Маркович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тамбовский государственный технический университет"

Защита состоится 14.12.2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.262.06 в ФГБОУ ВО «ТвГТУ» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

С.М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Тенденции развития современных производств предполагают первоочередное и существенное повышение эффективности технологических процессов (ТП), т.к. уровень управления ТП в значительной степени определяет качество производимого продукта, а учитывая, что они в большинстве своем крайне ресурсоемкие, то даже незначительное уменьшение их затрат может привести к серьезному экономическому эффекту в хозяйственной деятельности всего предприятия.

Совершенствование управления технологическими процессами, несмотря на многочисленные проведенные к настоящему времени исследования, является до сих пор не полностью разрешенной задачей, что обусловлено ее высокой сложностью и многовариантностью.

Большинство технологических процессов являются многопараметрическими, т.е. характеризуются несколькими параметрами или описываются несколькими переменными, зависимости между которыми часто неизвестны. В тоже время значения параметров ТП и динамика их изменения в значительной мере определяют качество производимого продукта. Нарушение технологии производства может привести к порче продукта, сделать его непригодным для использования по назначению. Продолжительность ТП определяется как максимальное время достижения всеми параметрами и показателями качества продукта своих заданных значений.

Таким образом, целью оптимального управления ТП является минимизация или максимизация одного (или нескольких) его параметров (например, его продолжительности) при имеющихся ограничениях на другие параметры (показатели качества производимого продукта).

Поскольку большинство ТП характеризуются несколькими параметрами, динамика изменения которых различна, а иногда, разнонаправлена, управление такими процессами является сложной задачей. И особую сложность представляет задача прогнозирования динамики изменения свойств продукта, определения момента времени, когда их значения достигнут требуемых величин и, соответственно, момента времени окончания процесса производства продукта в условиях воздействия внешних факторов и управляющего воздействия системы управления ТП (СУ ТП). Чем точнее осуществляется прогноз, тем более качественным производится продукт, и тем выше эффективность технологического процесса.

На точность прогноза сильное и, как правило, мешающее влияние оказывают неточности определения входных параметров и измерения состояния (значений параметров) ТП. Поэтому важнейшей и сложнейшей задачей, которую необходимо решить при построении системы управления технологическим процессом является обеспечение ее эффективной работы в условиях помех различного вида и уровня.

Следует отметить, что вопросы разработки и совершенствования систем, методов и алгоритмов управления ТП глубоко и всесторонне исследованы в многочисленных фундаментальных работах как отечественных, так и зарубежных ученых. Ими исследованы вопросы управления ТП производства конкретных продуктов, предложены эффективные подходы к их решению в различных условиях, в частности, в условиях нечеткости исходных данных и наличия шумов, предложены различные виды систем управления многопараметрическими ТП (например, интеллектуального и адаптивного управления, управления с прогнозирующими моделями и т.д.), для которых разработаны эффективные методы управления, показавшие хорошие

практические результаты. Для решения задач управления ТП в таких условиях предложено специализированное математическое и программное обеспечение, разработанное, в том числе на основе нечеткой логики и искусственного интеллекта.

В тоже время, на наш взгляд, недостаточное развитие получили вопросы прогнозирования динамики изменения показателей качества производимого продукта в ходе ТП и определения на этой основе времени его окончания с учетом влияния внешних факторов и управляющего воздействия СУ. А без их решения построить эффективную СУ ТП затруднительно.

Для управления ТП, в частности, для устранения неоднозначности в оценке измерений значений их параметров, широкое применение, наряду с другими, нашла теория фильтрации. Наиболее распространенными алгоритмами оптимальной фильтрации, используемыми в СУ ТП, являются: согласованный фильтр; оптимальный фильтр Винера; адаптивные и нелинейные оптимальные фильтры (фильтр Бар-Щалома-Ци, фильтр Бревера, адаптивный и оптимальный фильтр Калмана и т.п.).

В теории известен и расширенный фильтр Калмана, примеров применения которого для управления ТП автору обнаружить не удалось. С нашей точки зрения, его преимущество перед другими фильтрами состоит в том, что он позволяет последовательно улучшать качество, поэтапно обеспечивая его приближение к требуемым параметрам качества конечного продукта, обеспечивая при этом минимальные затраты ресурсов (например, времени) на достижение цели.

Большинство из приведенных выше авторов задачу разработки методов и алгоритмов ТП считают актуальной, при этом подчеркивая ее сложность и недостаточность данных для ее полного решения, а также необходимость продолжения исследований в рассматриваемой области. Практически отсутствует в известных библиографических источниках рассмотрение управляемого процесса как многосвязного объекта управления с установлением характера взаимосвязей и решением вопросов построения многосвязной системы управления. Не в полной мере решены задачи создания адаптивных, динамически развивающихся систем управления ТП, основанных на автоматизации управленческих функций человека-технолога и, в основном, заменяющих его при ведении процесса в условиях промышленного производства.

Кроме того, в известных автору работах СУ создавались для управления вполне конкретными ТП с заранее известными параметрами, в т.ч. входного сигнала и помехи. Перенастроить такие системы на управление ТП с другими параметрами представлялось сложной задачей.

Поэтому в данном исследовании предпринята попытка обосновать возможность применения для управления многопараметрическими технологическими процессами в части прогнозирования динамики изменения их параметров, а также свойств производимого продукта фильтра Калмана (далее – ФК) и разработать на этой основе модели, методы и алгоритмы управления многопараметрическими технологическими процессами с заданными свойствами производимого продукта, которые после незначительного изменения позволяли бы управлять ТП при различных видах входного сигнала и помехового воздействия в системе измерения.

В качестве гипотезы исследования выдвинуто положение, что для управления многопараметрическими ТП целесообразно применять системы управления с прогнозирующими моделями, функционирующие на основе ФК, что обеспечит большую, по сравнению с существующей, эффективность.

Научной задачей исследования является разработка моделей, методов и алгоритмов управления многопараметрическими технологическими процессами с заданными свойствами производимого продукта на основе ФК, а также методики их формирования.

Целью исследования является повышение эффективности управления ТП с неизвестными зависимостями параметров. Для достижения цели исследования поставлены (и решены) следующие задачи исследования:

1. Анализ ТП с неизвестными зависимостями параметров, как объектов управления.
2. Анализ известных методов и моделей управления ТП, выбор наиболее предпочтительных из них для проводимого исследования.
3. Разработка математической модели, алгоритма и критериев управления ТП.
4. Разработка методики формирования модели СУ ТП.
5. Программная реализация модели СУ ТП.
6. Проведение экспериментальных исследований модели СУ ТП, определение ее работоспособности и эффективности.

Объектом исследования является технологические процессы с неизвестными зависимостями параметров.

Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы управления технологическими процессами с неизвестными зависимостями параметров, а также методика формирования модели системы управления ТП.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель и алгоритм оптимального управления ТП, обеспечивающие достижение требуемых значений показателей качества производимого продукта.
2. Разработаны критерии, математическая модель и алгоритм определения оптимального времени окончания ТП.
3. Разработана методика формирования модели СУ ТП, учитывающая особенности входного воздействия и помехи в системе измерения, обеспечивающая адаптацию предложенной модели СУ ТП к производству конкретного продукта.
4. Осуществлена программная реализация модели СУ ТП и определения оптимального времени его окончания.
5. Проведены экспериментальные исследования ТП с применением разработанной модели СУ, доказана ее работоспособность и эффективность.

Практическая значимость. Полученные в работе результаты представляют собой методические основы для построения СУ ТП. Разработанная модель СУ ТП в случае ее реализации позволяет повысить эффективность ТП с неизвестными зависимостями параметров за счет улучшения управления им. Методика формирования СУ ТП может служить основой для разработки инструкции обслуживающему персоналу по настройке СУ ТП с конкретными параметрами. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют более достоверно определять диапазон изменения начальных условий протекания ТП.

Теоретическая значимость данной работы заключается в разработке модели, метода, критерия и алгоритма управления ТП с неизвестными зависимостями параметров, а также методики формирования модели СУ ТП.

Основными методами исследования являются методы теории автоматического управления, математического моделирования, теории адаптивных систем управления, экстраполяции и интерполяции функций, методы теории больших технических систем.

В данной работе исследование проведено применительно к биохимическому процессу главного брожения пива, поскольку биохимические технологические процессы (особенно процессы брожения, вызываемые дрожжами), весьма сложны, их механизм до сего времени полностью не изучен, но их исключительная потребительская и экономическая важность, обуславливает необходимость создания более эффективных систем и методов управления ими. Однако основные выводы и результаты могут быть применены и применительно к другим типам ТП при соответствующей их адаптации.

Основные положения и результаты работы, выносимые на защиту:

1. Разработанные математическая модель и алгоритм оптимального управления ТП, использующие для устранения неоднозначности определения реального состояния ФК, обеспечивают достижение требуемых значений показателей качества производимого продукта.

2. Разработанные критерии, математическая модель и алгоритм определения оптимального времени окончания ТП позволяют рассчитать время готовности продукта и продолжительность ТП.

3. Методика формирования модели СУ ТП, учитывающая особенности входного воздействия и помехи в системе измерения, обеспечивает адаптацию предложенной модели СУ ТП к производству конкретного продукта.

4. Результаты экспериментальных исследований ТП с применением разработанной модели СУ, доказывают ее работоспособность и эффективность.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов основана на использовании реальных исходных данных; апробированных в других исследованиях научных положений и методов исследования; корректном применении положений и выводов теории калмановской фильтрации, теории оптимизации; согласовании новых результатов с известными теоретическими положениями и статистическими данными. Принятые в работе авторские решения основаны на анализе ТП действующего производства, современных методов математического моделирования и автоматического управления

Достоверность полученных теоретических положений и выводов работы подтверждается экспериментальными исследованиями, результатами численного моделирования, апробации и промышленного внедрения разработанных методов и алгоритмов на промышленных предприятиях РФ.

Апробация и реализация результатов работы. Основные положения и результаты исследования были представлены и обсуждены на 3 научно-технических конференциях в том числе III-я Международная летняя школа-семинар по искусственному интеллекту для студентов, аспирантов и молодых ученых «Интеллектуальные системы и технологии» - Тверь-Протасово, 1-5 июля 2015 г.; Внутривузовская конференция преподавателей и сотрудников ТвГТУ - Тверь, 4-5 февраля 2015 года; Семнадцатая международная научно-практическая конференция – Белгород, 2016.

Комплекс программ и алгоритмов и Методика настройки СУ ТП, работающая на основе ФК, позволяющих создать технический образ АСУТП сушки пиломатериалов для изготовления художественных изделий и игрушек, Алгоритмы управления ТП производства пива рекомендованы в качестве технических решений при создании образа АСУТП объектов, связанных с управлением ТП, о чём имеются 3 акта внедрения.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 11 научных работ, 2 из которых опубликованы в рецензируемых журналах ВАК. Получено 1 свидетельство о регистрации программного продукта.

Личный вклад автора. Автор диссертации принимал непосредственное участие в общей постановке задач, в проведении аналитического обзора и патентных исследований по теме диссертации; исследовании и разработке математических моделей, разработке и исследовании алгоритмов управления; проведении экспериментов, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов; формулировании научных положений, выносимых на защиту, и выводов, а также во внедрении результатов исследований в производство; составлении отчетных документов, написании статей и докладов.

Структура и объём работы. Диссертационное исследование состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 132 источника. Рукопись содержит 181 страницу основного текста, в том числе 18 таблиц, 77 рисунков и 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулированы цель работы, научные задачи исследования, научная новизна, отмечаются теоретическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения о практическом использовании научных результатов.

В первой главе «Технологический процесс с неизвестными зависимостями параметров, как объект управления» систематизируются и обобщаются известные методы и алгоритмы управления ТП и обосновываются возможные направления повышения эффективности управления, осуществляется формулирование цели и постановка задач исследования.

В частности, выявлено, что преимущественное большинство ТП являются многопараметрическими, т.е. характеризуются несколькими параметрами. Особенностью таких ТП является наличие большого числа входных и выходных измеряемых параметров, взаимной корреляцией и автокорреляцией между значениями параметров. При исследовании подобных процессов необходимо учитывать существующие между параметрами взаимосвязи, основные выходные характеристики и управляемые параметры, через которые можно активно воздействовать на ТП. Зачастую такие связи выявить не представляется возможным. Для управления такими ТП приходится создавать системы управления (СУ), учитывающие, что зависимости между параметрами ТП неизвестны.

Наиболее характерны в этом отношении биохимические ТП, особенно процессы брожения, вызываемые дрожжами. Их механизм до сего времени полностью не изучен, но учитывая их исключительную значимость, необходимо создание более эффективных систем и методов управления ими. Поэтому в качестве непосредственного объекта исследования выбран ТП главного брожения пива (ГБП).

Показанный на примере ТП ГБП, реализованный при производстве пива сорта "Primus" на предприятии «Brarudi» Республики Бурунди порядок получения зависимостей основных свойств пивного сусла от времени (1) (рис. 1), применим и для других ТП с неизвестными зависимостями параметров (НЗП), конечно, с учетом их особенностей.

$$\begin{cases} 0,043t^3 + 0,35t^2 + 0,34t + 7,765 = 0 \\ 0,1725t + 5,793 = 0 \\ 0,0137t^3 - 0,1t^2 - 1,675t + 16,269 = 0 \\ 0,0116t^2 + 0,61t + 0,04 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где, $t \geq 0$.

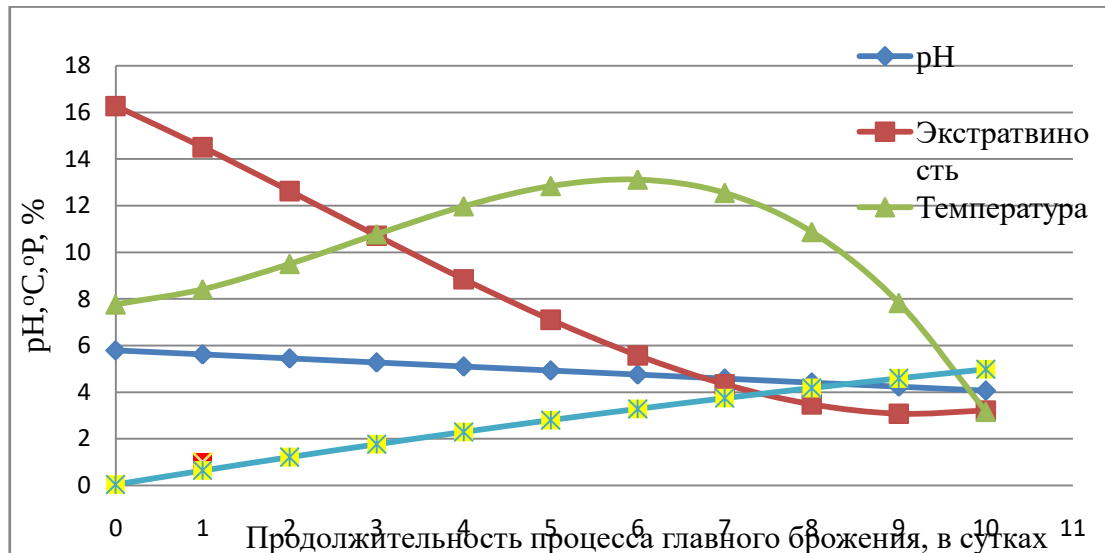


Рис. 1. Динамика изменения значений свойств пивного сусла в процессе главного брожения

Целью управления ТП ГБП в исследовании принято сокращение его продолжительности при обеспечении заданных значений его параметров. Тогда продолжительность процесса ГБП $\max(\tau_i)$ определяется как максимальное время достижения всеми параметрами своих заданных (критических) значений. Такими критическими значениями для пива сорта «Primus» являются: температура ($T^\circ(\tau_1) = 4$), водородный показатель ($pH(\tau_2) = 4,3$), экстрактивность ($E(\tau_3) = 2,5$), процентное содержание спирта ($C(\tau_4) = 4,5$).

Целью управления процессом главного брожения является обеспечение минимального значения $\max(\tau_i)$, т.е.

$$Z(\tau_i) = \max(\tau_i) \rightarrow \min \quad (2)$$

Выражение (2) является целевой функцией процесса управления продолжительностью ТП ГБП. Управлять ТП ГБП (например, его продолжительностью) без ухудшения качества напитка возможно только изменением температуры. При этом другие параметры ГБП должны изменяться в соответствии с соответствующими закономерностями и к концу ТП достичь заданных значений.

Результаты анализа известных видов СУ ТП позволили сделать вывод, что для управления ТП с НЗП наиболее целесообразно применение СУ с прогнозирующими моделями, а для учета ошибок в измерении параметров ТП и устранении неоднозначности в их оценке применение механизмов калмановской фильтрации.

Управления многопараметрическим технологическим процессом с применением калмановской фильтрации заключается в том, что фильтр работает в предположении, что система описывается нелинейным уравнением (наблюдение является нелинейной функцией состояния) и шумы описываются Гауссовым распределением с математическим ожиданием, равным нулю.

Во второй главе представлен комплекс математических моделей и алгоритмов управления ТП, который включает:

- критерии управления ТП;
- математическую модель управления ТП;
- математическую модель и алгоритм определения времени окончания ТП;
- алгоритм управления ТП.

Математическая модель процесса управления разработана на основе положений пространства состояний теории управления.

Состояние ТП описано разностным стохастическим уравнением

$$X(t+1) = \Phi(t)X(t) + B(t)u(t) + w(t) \quad (3)$$

Известны $X(t_0)$ - начальное состояние процесса и $X(t_N)$ – состояние, требуемое на момент времени его остановки.

Результат измерения ТП описывается уравнением измерения вида

$$z(t) = \theta(t)X(t) + v(t), \quad (4)$$

Случайные воздействия на динамику процесса $w(t)$ и результаты измерения $v(t)$ - независимы и подчинены нормальным распределениям вероятностей с нулевыми математическим ожиданиями и диагональными ковариационными матрицами; $\Phi(t)$ и $\theta(t)$ в общем случае не линейны.

Качество решения задачи фильтрации в настоящей работе характеризуется критериальным функционалом квадратичного вида

$$M\{X^T(N)Q_0X(N) + \sum_{t=t_0}^{N-1} X^T(t)Q_1X(t) + u^T(t)Q_2u(t)\} \quad (5)$$

где, M - математическое ожидание;

- Q_0, Q_1, Q_2 – симметрические положительно определенные матрицы;
- N - конечный момент времени оптимизации динамики ТП;
- $M\{x^T(N)Q_0x(N)\}$ терминальный член, выражающий требование к качеству продукта в момент времени его готовности;

Введенный критерий следует минимизировать на множестве возможных управлений $u(t), u(t+1), u(t+2), \dots, u(N-1)$.

Выражение оптимального управления имеет вид

$$u^{opt}(t) = -L(t)\hat{X}(t), \quad (6)$$

где $\hat{X}(t)$ - оптимальная оценка состояния продукта;

$$L(t) = [Q_2(t) + B^T(t)S(t+1)B(t)]^{-1}B^T(t)S(t+1)\Phi(t), \quad (7)$$

$$S(t) = [\Phi(t) - B(t)L(t)]^T S(t+1) [\Phi(t) - B(t)L(t)] + L^T(t)Q_2(t)L(t) + Q_1(t), \quad (8)$$

Если прогнозируемая оценка $\hat{X}(t+1)$ соответствует требуемому значению качества продукта, то есть если $\hat{X}(t+1) = MX(N) + \delta X(N)$, где $X(N)$ - допустимое отклонение текущей оценки от требуемой, то можно принимать решение по остановке (завершению) ТП.

Оценка $\hat{X}(t+1)$ вычисляется с использованием выражения

$$\hat{X}(t+1) = \Phi(t)\hat{X}(t) + B(t)u^{opt}(t) + K(t)[y(t) - \theta(t)\hat{X}(t)] \quad (9)$$

где $K(t)$ – матричный коэффициент усиления невязки $[y(t) - \theta(t)\hat{X}(t)]$.

Прогнозируемый компонент процесса производства продукта представляется в виде отрезка сходящегося в среднеквадратическом ряду

$$X_i(t) = \sum_{k=1}^N a_{ik} \frac{\varphi_{ik}(t)}{\sqrt{\lambda_{ik}}}, i=1,2,3,4 \quad (10)$$

Наилучшее спрогнозированное значение соответствующего компонента вычисляется по выражению

$$\hat{X}_i(t + \Delta t) = \sum_{k=1}^N a_{ik} \frac{\hat{\varphi}_{ik}(t + \Delta t)}{\sqrt{\lambda_{ik}}}, i=1,2,3,4 \quad (11)$$

Помеховые воздействия $w(t)$ и $v(t)$ могут подчиняться не нормальным – не гауссовым распределениям вероятностей. Однако рекуррентные соотношения ФК останутся справедливыми и при ненормальных распределениях $w(t)$ и $v(t)$.

Общая схема решения задачи дискретной фильтрации с учетом приведенных выше рассуждений показана на рис. 2.

Процесс производства продукта заканчивается, когда все исследуемые его параметры достигают требуемых значений. Тогда под оптимальным временем завершения процесса производства продукта следует понимать момент времени, в который достигается требуемая вероятность достижения всеми параметрами ТП и приготавливаемого продукта заданных значений.

Тогда под оптимальным временем завершения процесса производства продукта в работе понимается момент времени, в который достигается требуемая вероятность достижения всеми i -ми параметрами процесса требуемых значений – готовности параметров.

Степень готовности продукта вычисляется по плотности вероятности.

$$\int_{\alpha_{i3}}^{\beta_{i3}} P(\hat{X}_{i3}(t + \Delta t), X_i(t + \Delta t)) dx_i(t + \Delta t) \quad (12)$$

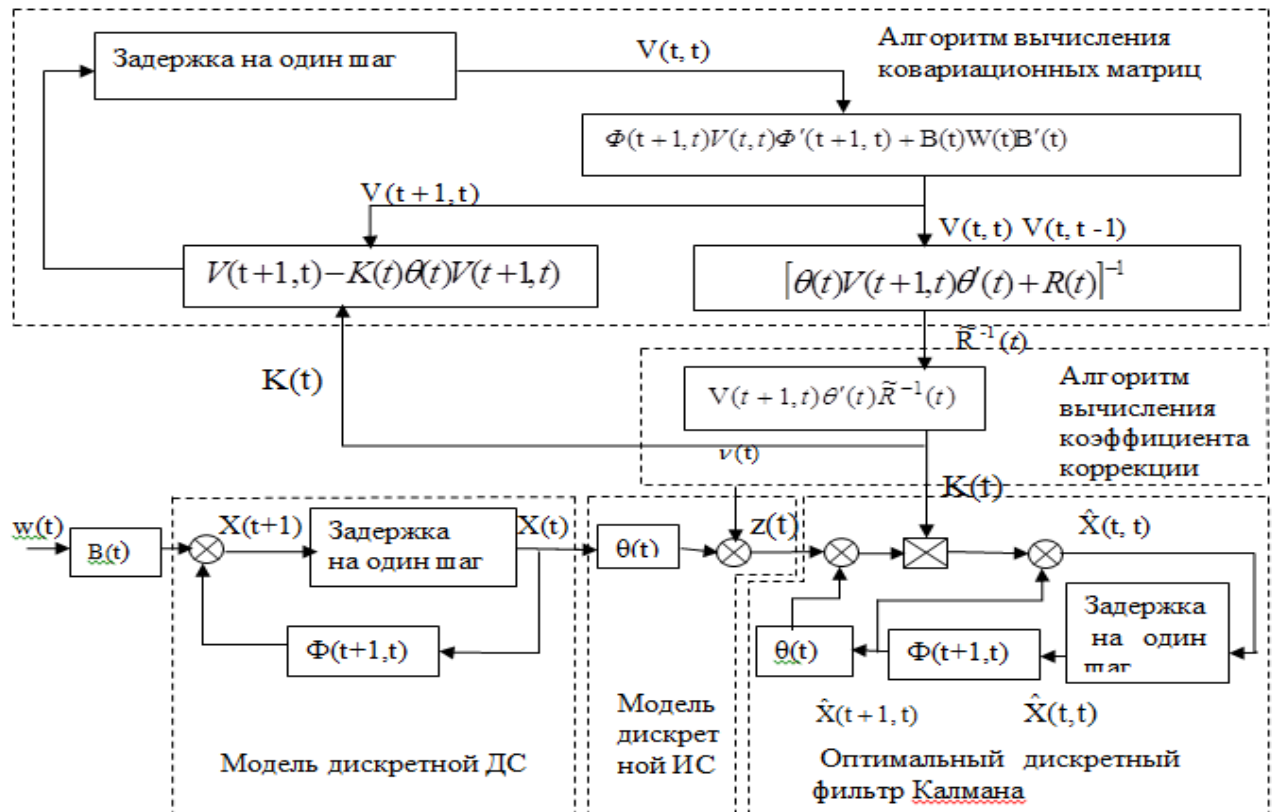


Рис. 2. Общая схема решения задачи фильтрации

Выражение для вычисления оптимального момента времени готовности продукта (рис. 3) имеет вид (20)

$$\tau_{opt} = \arg \min_{t \in T \subset [T_0, T_D]} \max_i \rho_i \hat{X}_{i\Theta}(t) \quad (13)$$

где ρ_i - весовые коэффициенты траекторий параметров продукта;
 $\hat{X}_{i\Theta}$ - экстраполированные значения траекторий;
 i_1, i_2 - индексы доминирующих «конфликтующих» параметров в процессе производства продукта.

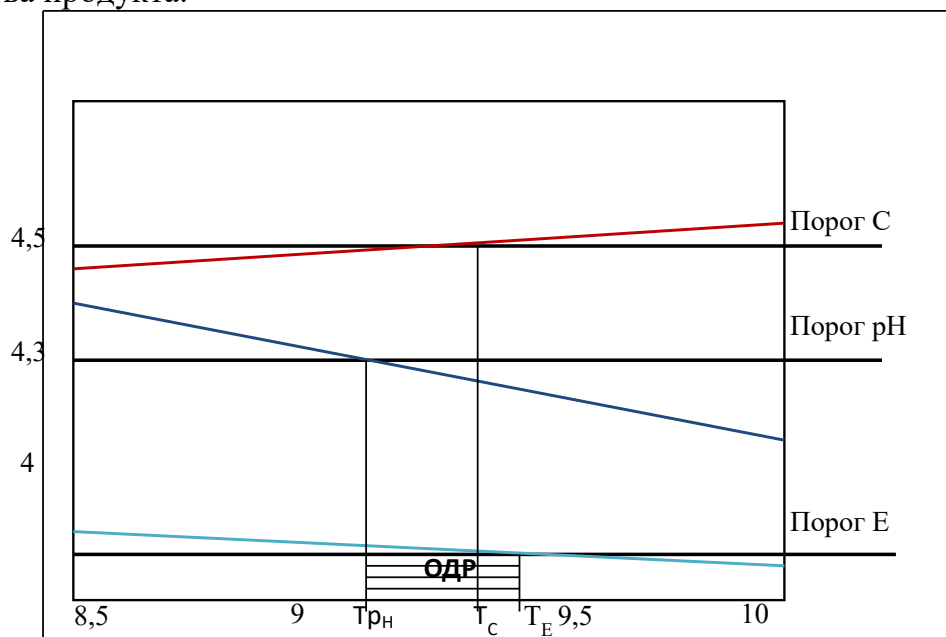


Рис. 3. Определение оптимального времени окончания ТП

Алгоритм управления многопараметрическим технологическим процессом

1. Ввод начальных значений и формирование исходных данных.
2. Вычисление «по ФК» оценок параметров траектории i -го компонента продукта в текущий момент времени.
3. Вывод экстраполированных оценок траектории i -го компонента продукта на очередной момент времени по отношению к текущему.
4. Вывод матрицы ошибок вычисления экстраполированных оценок параметров траектории i -го компонента продукта.
5. Вычисление граничных точек входа экстраполированной траектории брожения i -го компонента продукта в допустимый интервал.
6. Определение оптимального значения управляющего воздействия ($T^{\circ}C$) ТП на очередной текущий момент времени.
7. Вычисление вероятности готовности i -го компонента продукта.
8. Проверка условия готовности i -го компонента продукта как условия превышения вероятностью готовности i -го компонента продукта установленного порога.
9. Вычисление допустимых интервалов времени остановки процесса брожения i -го компонента продукта (окончания ТП).

10. Вычисление нижнего и верхнего граничных значений пересечения интервалов времени остановки процесса брожения всех компонентов продукта.

11. При «пустом» пересечении вычислить интервал эффективных по Парето моментов времени остановки процесса брожения продукта (окончания ТП).

12. Принятие решения об остановке ТП либо о его продолжении в соответствии с «уточненным» управлением на очередной момент времени.

Структура модели системы управления ТП, реализующая данный алгоритм, приведена на рис. 4.

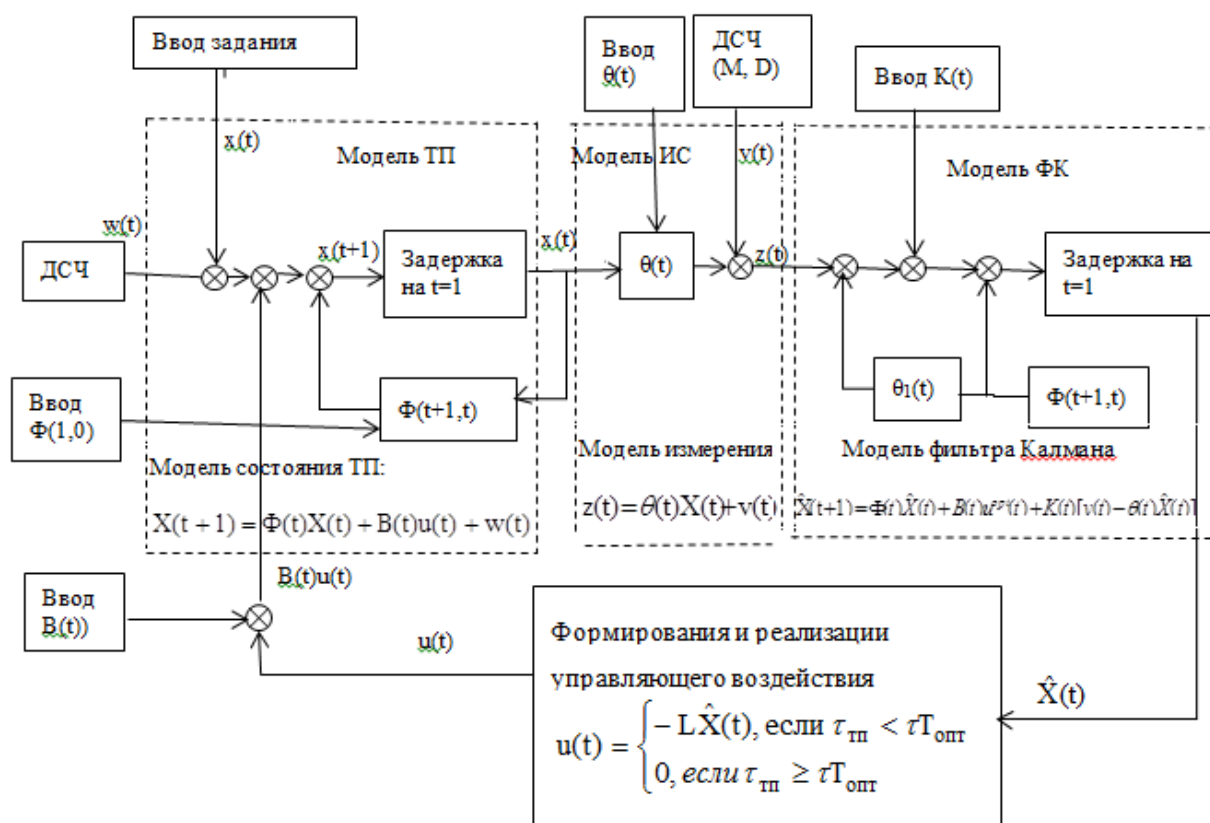


Рис. 4. Структура модели системы управления ТП

В третьей главе «Разработка методики формирования модели системы управления технологическим процессом» обоснованы подходы, выявлены условия, определяющие структуру СУ ТП и разработана Методика формирования модели системы управления технологическим процессом.

В основу методики формирования модели СУ ТП положено то обстоятельство, что структура и состав отдельных блоков модели достаточно однозначно могут быть определены на основе знания входного процесса и мешающего воздействия, т.е. структура модели СУ ТП представляет собой совокупность моделей ТП и ИС, а настройка управляющего устройства, структура моделей объекта управления и исполнительного устройства определяются дополнительно, в соответствии с решаемыми задачами.

Поэтому при создании модели СУ ТП необходимо, прежде всего, уточнить модель ТП (динамической системы - ДС), модель системы измерения (наблюдения), а также закон управления и режимы работы управляющего устройства для различных вариантов мешающих воздействий.

Анализ результатов проведенных ранее исследований позволил выделить возможные и наиболее часто встречающиеся варианты входных воздействий, помех в канале измерения и соответствующих им структур ДС, приведенные на рис. 5, а их взаимодействие показано на рис. 6.

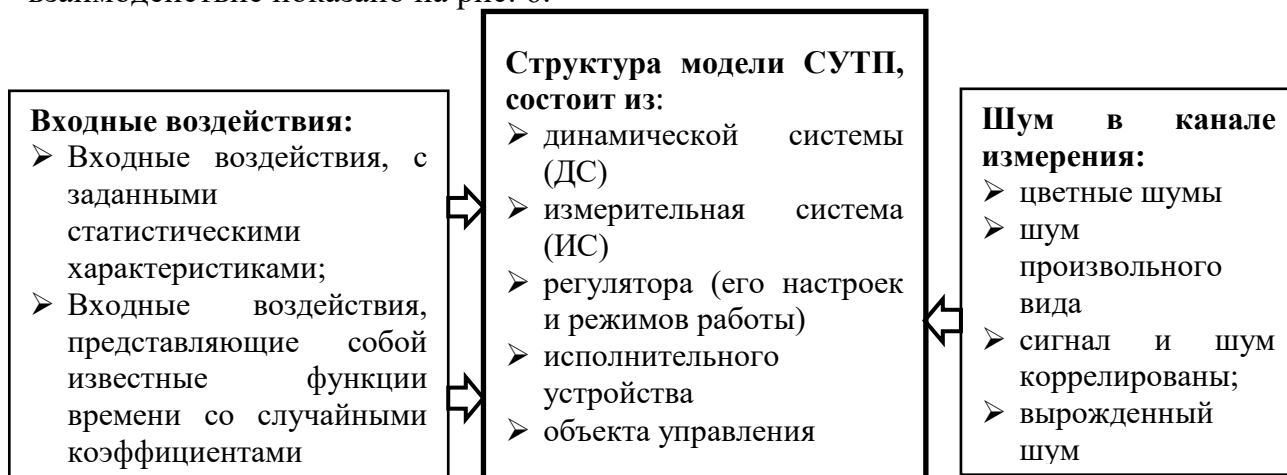


Рис. 5. Условия, определяющие структуру СУ ТП

Модель СУ ТП может содержать и другие блоки, например, блоки настройки исполнительного устройства или объекта управления. Эти вопросы достаточно полного раскрыты во многих научно-методических источниках и в данной работе не рассматриваются.

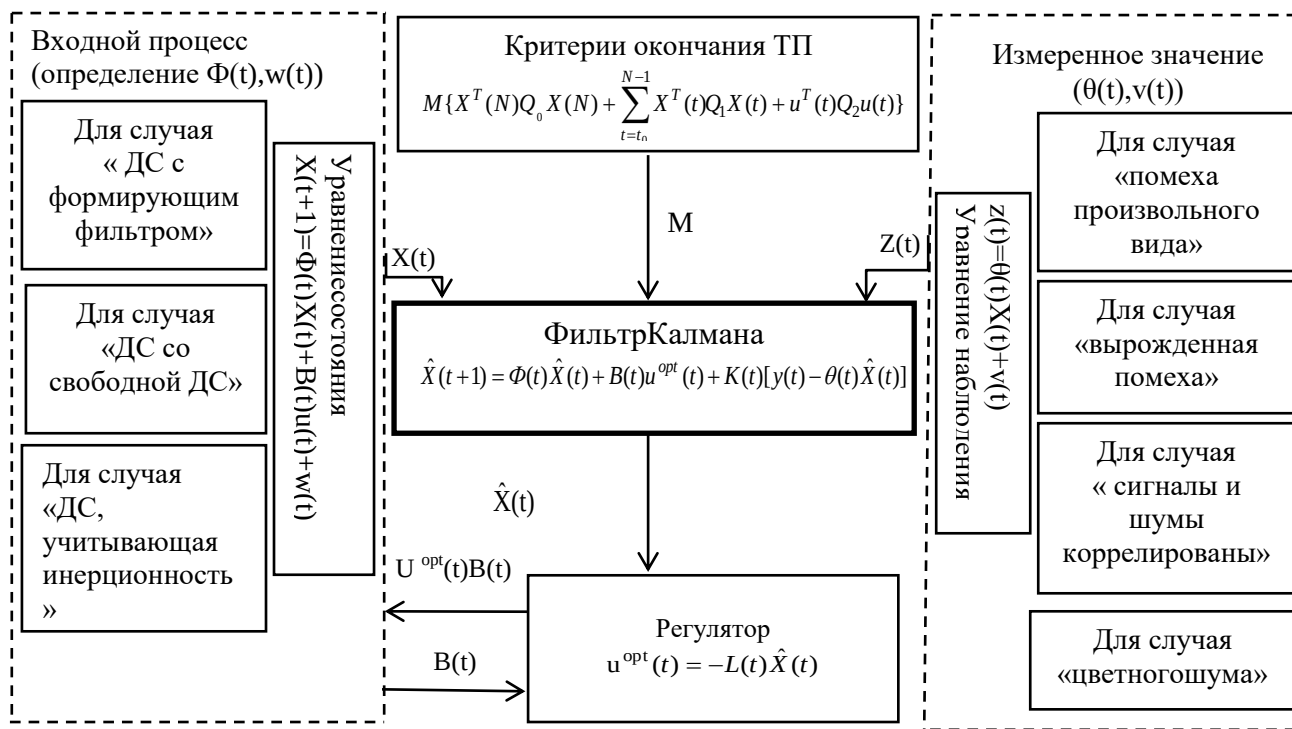


Рис. 6. Взаимодействие основных элементов СУ в ходе ТП

При построении СУ ТП входное воздействие наиболее часто представляет собой коррелированные во времени случайные гауссовские марковские процессы, которые могут быть описаны как функции с заданными статистическими характеристиками (известны корреляционная функция или спектральная плотность входного

воздействия) или как представляющие собой известные функции времени со случайными коэффициентами. Для описания входного воздействия, учитывая применение в модели метода оптимальной линейной фильтрации Калмана, используется способ преобразования наблюдаемого сигнала $z(t)$ в новое наблюдение $z_n(t)$, содержащее белый шум $v_n(t)$.

Наиболее востребованными для решения практических задач являются структуры системы измерения, обеспечивающие эффективную работу СУ ТП при наличии в системе измерения помех следующего вида: вырожденная помеха в канале измерения, помех произвольного вида, цветного шума, а также случая, когда сигналы и шумы коррелированы. Предложенные рекомендации обеспечивают решение названных задач.

В работе обосновано, что наиболее целесообразным для управления ТП является использование цифрового регулятора в двух режимах: нагревание и охлаждение. Тогда задачей управления является определение момента времени переключения регулятора в один из этих режимов.

На рис. 7 представлена методика формирования структуры модели СУ ТП.

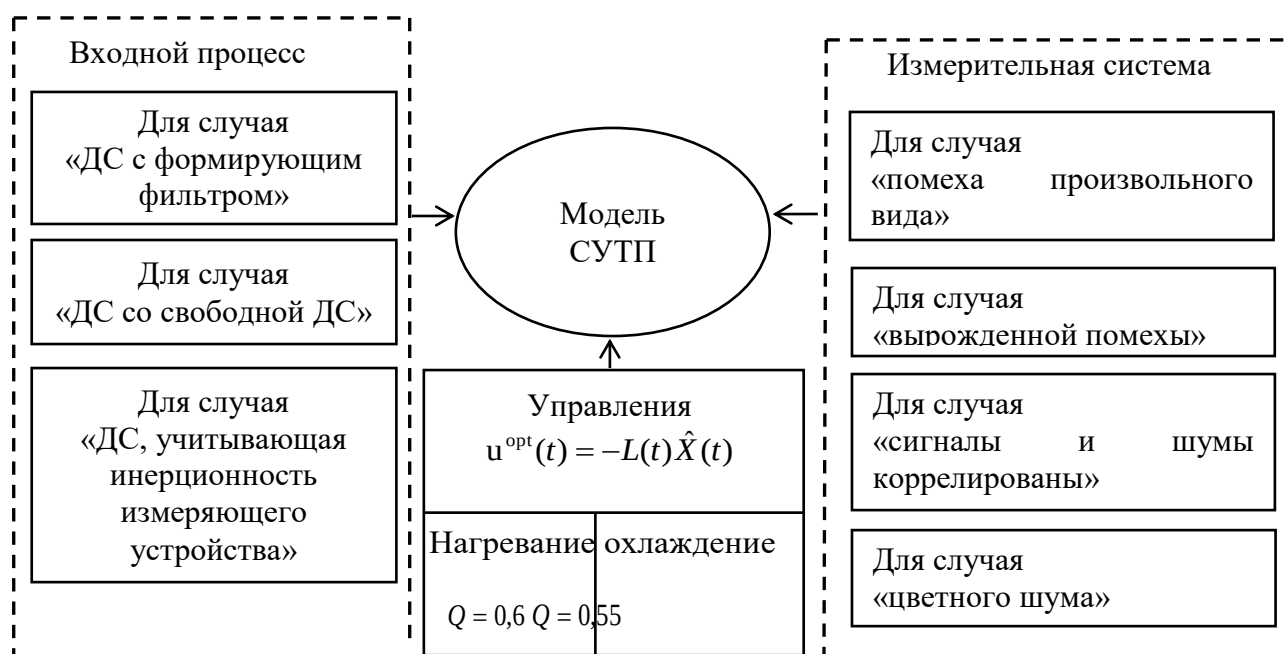


Рис. 7. Методика формирования структуры модели СУТП

В четвертой главе «Программная реализация и экспериментальная оценка модели системы управления ТП» осуществлены разработка архитектуры программного обеспечения, программная реализация динамической модели СУ ТП, моделирование управления на примере ТП ГБП, сравнительная оценка математической модели СУ ТП, оценка адекватности и работоспособности математической модели.

Архитектура программного обеспечения представлена на рис. 8.

Для практической реализации выбрано и использовано специальное программное обеспечение для работы с базами данных: СУБД SQLserver 2008, в которой данные хранятся в реляционных таблицах, а также язык программирования и обработки – SQL, ориентированный именно на реляционные базы данных.

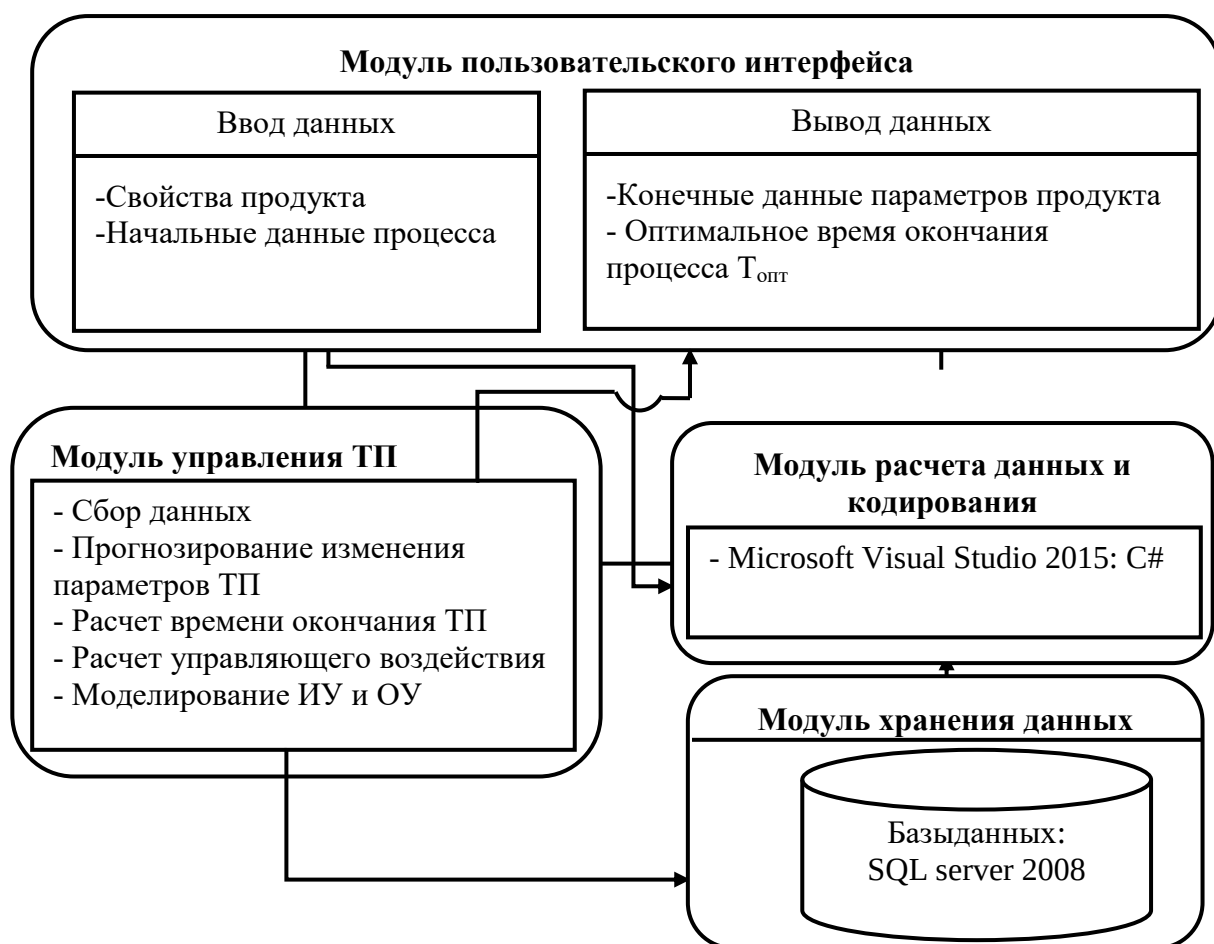


Рис. 8. Архитектура программного обеспечения

Экспериментальным путем установлены коэффициенты усиления Q_2 , входящие в критериальный функционал M для режимов нагрева и охлаждения (рис. 9), определяющие закон регулирования.

Выбор закона регулирования

$$M\{X^T(N)Q_0X(N) + \sum_{t=t_0}^{N-1} X^T(t)Q_1X(t) + u^T(t)Q_2u(t)\}$$

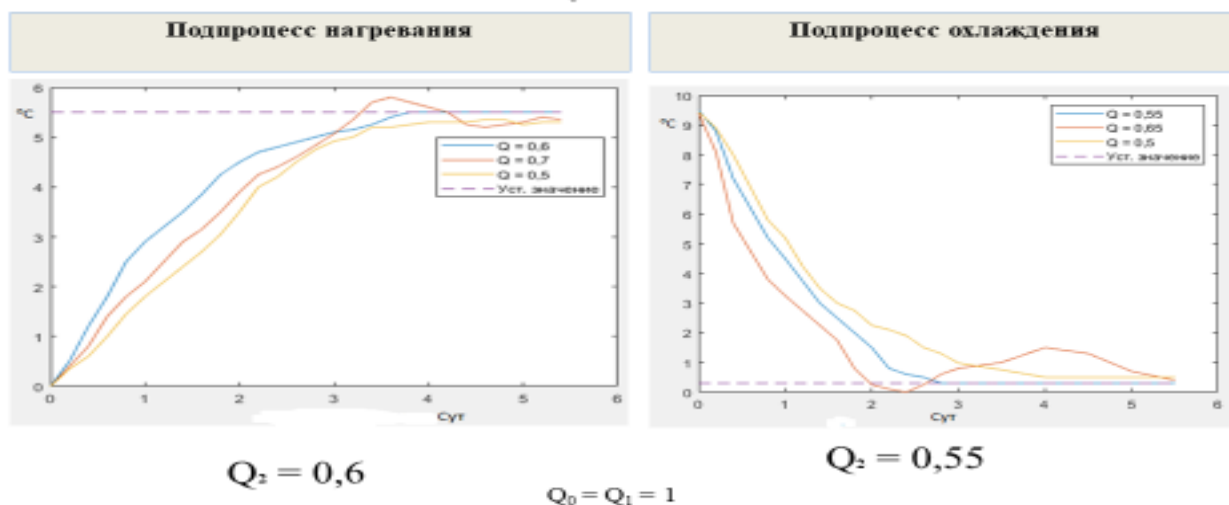


Рис. 9. Закон регулирования для подпроцессов нагрева и охлаждения

Результаты прогнозирования динамики изменения параметров ТП при различных (номинальных, минимальных, максимальных) значениях исходных данных при адаптивно определенном значении коэффициента усиления (0,55 – 0,83) приведены на рис. 10. Сокращение продолжительности ТП составило 1,8% - 6,2% (рис. 10) по сравнению с номинальной – 10 сут.

В части расчетов (2,8% от общего количества проведенных расчетов) продолжительность ТП получилась больше номинальной (10,5 сут.) (рис.10). Такие результаты получены при начальных значениях E от 17,5 до 18 или pH от 5,8 до 6.0 (выходящих за рамки допустимых значений), что обуславливает необходимость более тщательно подходить к формированию начальных условий протекания ТП.

Результаты проведенного вычислительного эксперимента подтвердили возможность практической реализации предложенных в работе модели, методов, алгоритмов и критериев для управления ТП и их эффективность.

Сравнительная оценка математических моделей, построенных на основе ФК, метода наименьших квадратов и метода сплайна, проведенная по критериям «адекватность» и «точность», показала, что хотя все исследованные математические модели удовлетворяют требованиям точности и адекватности, однако модель, построенная на основе ФК показала лучшие результаты и по критерию адекватности и по критерию точности и доказала целесообразность его применения для управления многомерными технологическими процессами с неизвестными зависимостями параметров.

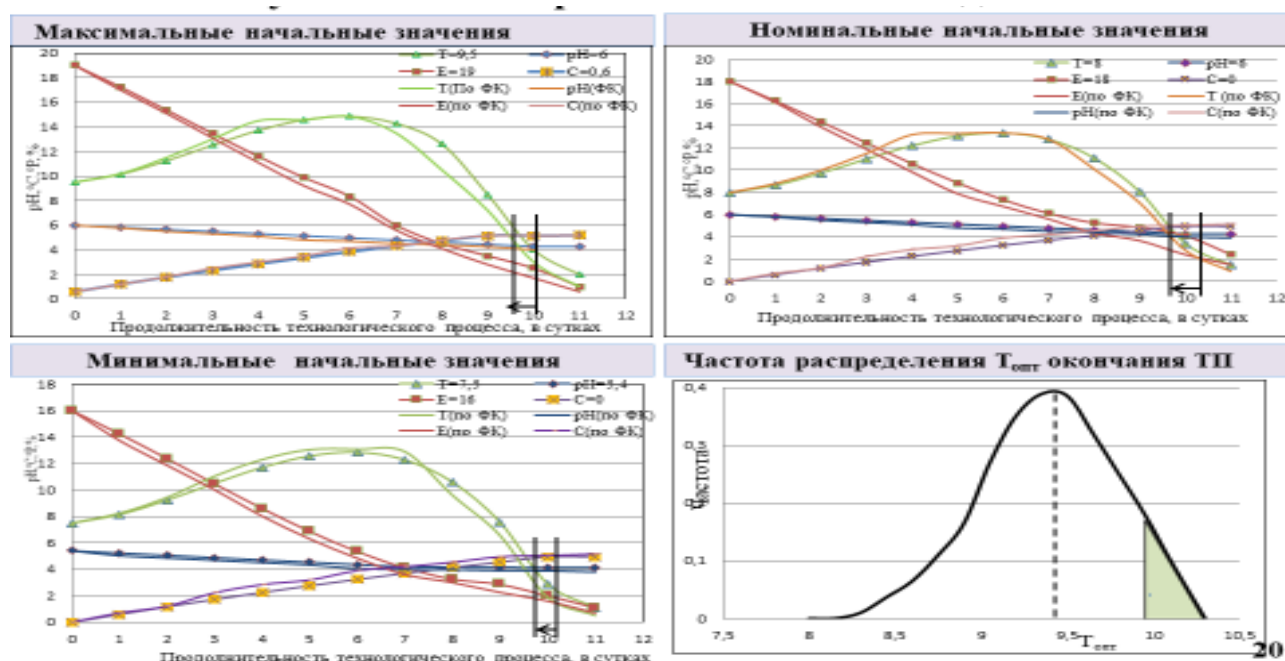


Рис. 10. Результаты проведенного вычислительного эксперимента

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ современного состояния организации управления технологическими процессами, выявлены тенденции развития и определены направления его совершенствования.

2. На примере технологического процесса главного брожения пива предложен порядок выбора существенно значимых параметров ТП и свойств производимого продукта и определения закономерностей их изменения.

3. Обоснованы возможность и целесообразность выбора для построения систем управления ТП фильтра Калмана и проведена его адаптация для решения этих задач.

4. Обоснованы критерии управления ТП с заданными свойствами производимого продукта на основе фильтра Калмана, разработаны математическая модель и алгоритм определения оптимального времени окончания ТП.

5. Разработана математическая модель и алгоритм оптимального управления ТП, обеспечивающие достижение требуемых значений показателей качества производимого продукта и оптимального времени окончания ТП.

6. Разработана и обоснована методика формирования модели системы управления ТП, учитывающая особенности входного воздействия и помехи в системе измерения, обеспечивающая адаптацию предложенной СУ ТП к производству конкретного продукта.

7. Осуществлена программная реализация модели системы управления ТП и определения оптимального времени его окончания.

8. Проведены экспериментальные исследования модели СУ ТП и на основе анализа полученных результатов доказана ее работоспособность и эффективность.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК РФ

1. Niyonsaba. T., Pavlov V. A. Forecasting the optimal duration of the main fermentation process of beer using the Kalman filter. Программные продукты и системы, 2016 №3 - С. 216.

2. Нийонсаба Теренс. Павлов В.А. Программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами с заданными параметрами продукта; сб. статей международного журнала, программные продукты и системы, 2018. №1- С. 142.

Статьи в журналах, не входящих в перечень ВАК РФ

3. Нийонсаба Теренс. Анализ биохимических и технологических процессов при главном брожении пива. Внутривузовская конференция преподавателей и сотрудников Тверского государственного технического университета. Тверь, 4-5 февраля 2015 года.

4. Нийонсаба Теренс. Павлов В. А. Динамика изменения параметров пивного сусла в процессе главного брожения пива: сб. статей IV Международной научно-практической конференции. – Белгород. Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2015. – С. 125-133.

5. Нийонсаба Теренс. Анализ возможности управления процессом главного брожения пива: сб. статей III-ей Международной летней школы-семинара по искусственному интеллекту для студентов, аспирантов и молодых ученых «Интеллектуальные системы и технологии.- Тверь, 2015.

6. Нийонсаба Теренс. Процесс главного брожения, как многопараметрический технологический процесс: сб. статей XVII-ей Международной заочной научно-практической конференций. – Белгород. Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 31 июля 2015 года. – С. 44-48.

7. Нийонсаба Теренс. Павлов В.А. Алгоритм регулирования температуры в процессе главного брожения пива. Сб. статей журнала «Программные продукты, системы и алгоритмы», 2016 № 4 – 8.

8. Niyonsaba, T; Uwizeyimana, P; Ntaryamira, E; Akimana, R.; Controller design of the multivariable process control system. International Journal of Control Systems and Robotics, 2, 33–39.

9. Niyonsaba, T; Ntaryamira, E. Le controle du processus de la fermentation principale de la bière. Revue de l'Université du Burundi; 2016.

10. Нийонсаба Теренс. Павлов В.А. Методы прогнозирования в технике и технологиях; сб. статей Международной научно - практической конференции 20 февраля 2018 г. Часть 2- г. Тюмень, Уфа: АЭТЕРНА, 2018. – 171 с.

11. Нийонсаба Теренс, Павлов В.А. Разработка требований к начальным значениям параметров технологических процессов на основе анализа результатов прогнозирования динамики их изменения в условиях исходной неопределенности. Сб. статей журнала «Мягкие измерения и вычисления», 2018 № 8 (9), с. 26 - 35.