

На правах рукописи

Сакулин Сергей Александрович

**АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКИХ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ**

Специальности: 05.13.17 – Теоретические основы информатики
05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва - 2009

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Девятков Владимир Валентинович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Амбарцумян Александр Артемович

кандидат технических наук, доцент
Тарасов Валерий Борисович

Ведущая организация:

Учреждение Российской Академии
Наук Институт программных систем
им. А.К. Айламазяна РАН

Защита диссертации состоится « 5 » ноября 2009 г. в 16 час 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.10 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

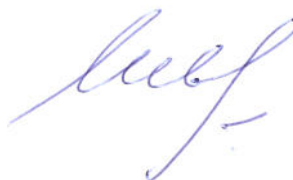
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просьба направлять по адресу:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.10.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



С.Р. Иванов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Характерным свойством многих технологических процессов являются значительные трудности, связанные с непосредственным измерением большинства их параметров. Поэтому анализ состояния таких процессов осуществляется по косвенным признакам. В частности, этим свойством обладают технологические процессы производств протяжённых изделий (ППИ), например, прядильных, прокатных, кабельных, проволочных, бумажных, производств корда и некоторых других. При этом характер изменения параметров выпускаемой продукции по её длине (по времени) несёт информацию не только о качестве продукции, но и о состоянии технологического процесса (ТП) в целом.

В условиях современной конкуренции необходимо стремиться к обеспечению максимально достижимого качества продукции при минимуме затрат. Достигнуть этого можно посредством принятия следующих мер:

- обеспечить своевременное выявление и устранение причин возникновения состояний технологического процесса, приводящих к снижению качества изделий или браку;
- перейти на менее затратное обслуживание оборудования по фактическому, а не плановому состоянию.

Реализовать эти меры можно на основе анализа состояния ТП. Результатом такого анализа является отнесение состояния ТП к тем или иным заранее определённым классам состояний. Каждый класс состояний соответствует либо исправному и правильному протеканию ТП, либо одному из видов отклонений от его исправного и правильного протекания.

При этом, однако, эффективность методов анализа состояния ТП ещё остается относительно низкой. Над решением проблем повышения эффективности анализа состояния ТП работают многие специалисты как у нас в стране, так и за рубежом, в частности, Коновалов В.И., Алтунин А.Е., Беленький А.Г., Алиев Р.А., Bocklisch S.F., Grabisch M., Murofushi T., Detyniecki M., и другие, о чём свидетельствуют многочисленные публикации. Общий вывод, который прослеживается в этих работах, состоит в необходимости обеспечить системность, экономичность, массовость, точность и оперативность анализа состояния.

Традиционные подходы к анализу состояния ТП не обладают всеми перечисленными свойствами в совокупности и, как следствие, оказываются недостаточно эффективными при их реализации на реально функционирующих ППИ.

Предприятия часто находят выход из сложившейся ситуации в решении задач анализа состояния ТП экспертным способом: использованием для анализа состояния накопленных в испытательных лабораториях знаний о параметрах выпускаемой продукции, характеризующих её качество, и связи

этих параметров с состояниями ТП, включая знания и опыт специалистов-технологов. Однако, при таком подходе объективность анализа сильно зависит от конкретной личности и малоэффективна из-за ограниченных возможностей экспертов по обработке больших объёмов информации.

Для того, чтобы достичь нужного уровня эффективности и объективности анализа состояния ТП, в диссертационной работе предлагается создание комплексной формализованной методики анализа состояния ТП. Эта методика базируется на использовании лингвистического подхода, предполагающего формализацию экспертных знаний с помощью лингвистических переменных и операторов агрегирования нечётких критериев в сочетании с непрерывным измерением параметров продукции по мере её выпуска.

Лингвистический подход позволяет адекватно представлять и анализировать состояния, возникающие в ходе ТП ППИ, характерным свойством которых является значительная доля различных видов неопределённости.

Свойства экономичности и системности анализа состояния при лингвистическом подходе достигаются за счёт отсутствия необходимости в установке большого числа датчиков на уже эксплуатируемом оборудовании, за исключением датчиков для измерения параметров продукции, а также за счёт отсутствия ручных измерений и необходимости проведения экспериментальных исследований большого объёма.

Массовость анализа достигается благодаря тому, что на любых ППИ возможно непрерывное измерение различных параметров выпускаемой продукции, и знания экспертов в соответствующей прикладной области могут быть формализованы.

Точность анализа достигается за счёт того, что лингвистическое описание создаётся для каждого конкретного ТП и содержит в себе знания эксперта об особенностях его функционирования.

Оперативность анализа при лингвистическом подходе достигается за счёт совмещения с процессом измерения параметров продукции.

При этом основным недостатком существующих методик анализа ТП, основанных на лингвистическом подходе, является отсутствие формализации знаний экспертов о зависимостях нечётких критериев агрегирования, вследствие чего снижается точность анализа.

Объект исследования: анализ состояния технологических процессов.

Предмет исследования: методы формализации экспертных знаний о ТП и методы определения фактического состояния ТП.

Цель диссертационной работы заключается в разработке, исследовании и реализации комплексной формализованной методики анализа состояния ТП на основе экспертных знаний, не имеющей указанного выше недостатка.

Задачи исследований.

1. Разработать обобщённую методику анализа состояния ТП, основанного на лингвистическом подходе;
2. Разработать методы формализации экспертных знаний, касающихся анализа состояния ТП, на основе нечёткого лингвистического представления;
3. Реализовать разработанную методику в виде аппаратно-программной системы анализа состояния ТП на примере конкретной прикладной области;
4. Экспериментально апробировать систему анализа состояния ТП в реальных производственных условиях.

Методы исследований: теория нечётких множеств; теория нечётких мер и интегралов, теория полезности.

Научная новизна. Разработана новая комплексная методика анализа состояния ТП на основе нечёткого лингвистического представления экспертных знаний. В рамках этой методики получены следующие новые результаты.

Предложен метод формирования ограничений на параметры оператора агрегирования взаимозависимых критериев на основе его визуализации. В отличие от известного двухкритериального метода графической интерпретации предложенный метод обладает возможностью рассмотрения любого числа агрегируемых критериев.

Выявлены ограничения на задаваемые экспертом пороги безразличия, необходимые для идентификации параметров оператора агрегирования. Показано, что пороги безразличия имеют смысл только при выполнении соответствующих ограничений, а выход за рамки этих ограничений может приводить к невозможности получения решения задачи идентификации параметров оператора агрегирования.

Обоснован выбор метода идентификации параметров оператора агрегирования взаимозависимых критериев на основе минимизации дисперсии нечёткой меры. Показано, что применение этого метода позволяет избежать субъективизма при идентификации параметров операторов агрегирования.

На основе экспериментов показано, что применение интеграла Шоке 2-го порядка позволяет повысить точность анализа состояния ТП в сравнении с применением средневзвешенных операторов до 6,5 %.

Практическая значимость и реализация. Разработанная методика, реализующие её программное обеспечение и технические средства, образующие в совокупности систему анализа состояния ТП, могут быть использованы на любом ППИ. В частности, методика была апробирована на подготовительном участке прядильного производства, а также на целлюлозно-бумажном производстве и может быть использована на существующих

прядильных и целлюлозно-бумажных производствах, обеспечивая сокращение простоев оборудования, предотвращение аварийных ситуаций, повышение доли выпуска продукции с заданными качественными показателями.

Практические результаты работы использованы на предприятиях ОАО «Славия» (г. Щёлково Московской обл.) и ОАО ЦБК «Волга» (г. Балахна Нижегородской обл.), в результате чего достигнут эффект существенного уменьшения времени, затрачиваемого на обслуживание технологического оборудования, а также повышения доли выпуска продукции заданного качества.

Достоверность полученных результатов подтверждается теоретическим обоснованием основных положений предлагаемой методики и испытаниями системы анализа ТП, построенной на основе этой методики, в производственных условиях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийской научно-технической конференции «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (Текстиль-2003 и Текстиль-2004) .

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 3 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 167 машинописных страницах и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Список литературы включает 109 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика анализа состояния ТП на основе нечёткого лингвистического представления экспертных знаний;
2. Метод выбора ограничений, накладываемых на классы состояний ТП и лингвистические переменные при формализации экспертных знаний;
3. Метод формирования ограничений на параметры оператора агрегирования взаимозависимых критериев на основе его визуализации;
4. Ограничения, накладываемые на задаваемые экспертом пороги безразличия, необходимые для идентификации параметров операторов агрегирования;
5. Метод идентификации параметров операторов агрегирования нечётких критериев анализа ТП на основе минимизации дисперсии нечёткой меры для случая взаимозависимых критериев;
6. Аппаратно-программная реализация методики анализа состояния ТП на основе нечёткого лингвистического представления экспертных знаний на примере подготовительного участка хлопкопрядильного производства и результаты её испытаний;
7. Результаты опытной эксплуатации системы анализа состояния ТП в реальных производственных условиях.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены общие свойства ТП ППИ, показана актуальность обеспечения качества изделий посредством анализа состояния ТП и обслуживания оборудования по результатам этого анализа, проведён сравнительный анализ существующих подходов к анализу состояния ТП ППИ и обоснован выбор лингвистического подхода, в связи с этим рассмотрены виды неопределённостей, возникающих при формализации экспертных знаний об особенностях протекания ТП, сформулированы задачи исследования в рамках лингвистического подхода.

Во второй главе рассмотрены традиционные подходы к формализации экспертных знаний на основе нечёткого лингвистического представления, выявлены их недостатки, предложен новый подход к формализации экспертных знаний, касающихся анализа состояния ТП. Основой предложенного подхода является использование диагностических параметров $z_1(t), \dots, z_H(t)$, получаемых на основе преобразований непрерывно измеряемых параметров продукции, и нечётких классов состояний $\tilde{S}_1, \dots, \tilde{S}_K$. Состояние ТП $\mathbf{z}(t)$ в момент времени t есть набор значений параметров $z_1(t), \dots, z_H(t)$. Класс состояний ТП есть нечёткое подмножество множества всех его возможных состояний Ω . Выделяется класс $\tilde{S}_1$ исправного и правильного протекания ТП и классы $\tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_K$, соответствующие различным неисправностям или неправильному протеканию ТП. Функция принадлежности состояния $\mathbf{z}(t)$ классу $\tilde{S}_k$ обозначена $\mu_{\tilde{S}_k}(\mathbf{z}(t))$.

Сформулировано условие непротиворечивости анализа, состоящее в невозможности одновременного полного соответствия состояния $\mathbf{z}(t)$ классу $\tilde{S}_1$ и частичного соответствия классам $\tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_K$ (и наоборот): $\forall \mathbf{z}(t) \in \Omega$,

$$\mu_{\tilde{S}_1}(\mathbf{z}(t)) = 1 \Rightarrow \sum_{k=2}^K \mu_{\tilde{S}_k}(\mathbf{z}(t)) = 0; \quad \forall \mathbf{z}(t) \in \Omega, \quad k = 2, \dots, K, \quad \mu_{\tilde{S}_k}(\mathbf{z}(t)) = 1 \Rightarrow \mu_{\tilde{S}_1}(\mathbf{z}(t)) = 0.$$

Сформулировано условие полноты анализа, состоящее в отнесении любого возможного состояния $\mathbf{z}(t)$ к одному из классов состояний в нечётком смысле: $\forall \mathbf{z}(t) \in \Omega, \quad \max_{k=1}^K (\mu_{\tilde{S}_k}(\mathbf{z}(t))) \geq 0,5$.

Введены лингвистические переменные $\beta_1, \dots, \beta_H$, соответствующие диагностическим параметрам $z_1(t), \dots, z_H(t)$. В соответствии с условиями непротиворечивости и полноты анализа для термов этих переменных выбраны трапецевидные функции принадлежности, значение принадлежности в нейтральных точках (перехода от одного

лингвистического значения к смежному) выбрано равным 0,5. Этот выбор отражает переход от частичного соответствия значения диагностического параметра одному терму к частичному соответствию смежному терму и представляет собой использование «серой» шкалы Д.А. Пospelова.

Каждому классу состояний соответствует эталонное нечёткое отношение $\alpha_k[R_{1k}^\varnothing, \dots, R_{Hk}^\varnothing]$, где $R_{hk}^\varnothing$ - эталонный терм лингвистической переменной β_h . AGG_k обозначен оператор, с помощью которого осуществляется агрегирование принадлежностей каждого измеренного значения $z_h(t)$ диагностического параметра к соответствующему эталонному терму. Результатом действия этого оператора агрегирования будет степень соответствия состояния $\mathbf{z}(t)$ классу $\tilde{S}_k$:

$$\mu_{\tilde{S}_k}(\mathbf{z}(T)) = AGG_k \left[\mu_{\Upsilon_1^\beta(R_{1k}^\varnothing)}(z_1(T)), \dots, \mu_{\Upsilon_H^\beta(R_{Hk}^\varnothing)}(z_H(T)) \right],$$

где Υ_h^β - семантическое правило, которое устанавливает соответствие «терм лингвистической переменной – нечёткое множество».

Общего формального подхода к построению операторов агрегирования на основе экспертных знаний на сегодняшний день не существует. Работы в этом направлении интенсивно развиваются. Стало общепринятым считать, что оператор агрегирования AGG есть функция $[0,1]^H \rightarrow [0,1]$, $H \in \mathbb{N}$, удовлетворяющая следующим условиям: $AGG[g_H] = g_H$, если $H=1$; $AGG[0, \dots, 0] = 0$, $AGG[1, \dots, 1] = 1$; $(g_1, \dots, g_H) \leq (g'_1, \dots, g'_H) \Rightarrow AGG[g_1, \dots, g_H] \leq AGG[g'_1, \dots, g'_H]$.

Для упрощения обозначений, далее будем опускать индекс k нечётких классов состояний, записывая AGG вместо AGG_k , и предполагая при этом, что приводимые рассуждения справедливы для всех AGG_k . Введём также обозначение $g_h = \mu_{\Upsilon_h^\beta(R_{hk}^\varnothing)}(z_h(T))$, где g_h - критерий агрегирования. Вместо обозначения «критерий с индексом i » будем также применять обозначение «критерий i ».

В качестве операторов агрегирования наиболее часто используется средневзвешенный оператор. При этом некоторые из классов состояний отличаются требованием эксперта, заключающимся в том, что состояние ТП не должно принадлежать классу всякий раз, когда один или несколько критериев агрегирования равны нулю, вне зависимости от значений остальных критериев. Примером здесь служит класс состояний $\tilde{S}_1$, соответствующий исправному и правильному протеканию ТП. Если критерий, для которого соответствующий весовой коэффициент положителен ($w_h > 0$), принимает значение $g_h = 0$, то состояние процесса нельзя считать совместимым с классом $\tilde{S}_1$, поскольку в этом случае диагностический параметр $z_h(T)$ может принимать любое значение в соответствующем универсуме и не подлежит контролю с помощью

оператора агрегирования. Выходом из такой ситуации является разбиение множества критериев на два непересекающихся подмножества или, иными словами, разбиение множества индексов критериев J на два подмножества J^* , $J \setminus J^*$ таких, что если из $g_h = 0$ следует $AGG[g_1, \dots, g_H] = 0$, то $h \in J^*$, если из $g_h = 0$ не следует $AGG[g_1, \dots, g_H] = 0$, то $h \in \{J \setminus J^*\}$. Поэтому введём в оператор агрегирования дополнительный множитель:

$$AGG[g_1, \dots, g_H] = \text{sign} \left(\prod_{h \in J^*} g_h \right) \sum_{h=1}^H w_h g_h, \text{ где } \sum_{h=1}^H w_h = 1.$$

Критерии агрегирования являются независимыми, если обусловленное изменением каждого из них (при фиксированных значениях остальных критериев) влияние на результат агрегирования не зависит от значений остальных критериев. В противном случае критерии зависимы и между ними наблюдается явление взаимодействия. Различают следующие виды зависимостей между критериями: положительная (отрицательная) корреляция; замещение (взаимозависимость); предпочтительная зависимость (независимость). Интеграл Шоке по нечёткой мере ψ используется для агрегирования на непрерывных шкалах зависимых критериев. Нечёткая мера есть функция $\psi: 2^J \rightarrow [0, 1]$, где 2^J - множество всех подмножеств множества индексов критериев $J = \{1, \dots, H\}$, которая удовлетворяет условиям: $\psi(\emptyset) = 0$, $\psi(J) = 1$; $\forall D, B \subseteq J: D \subseteq B \Rightarrow \psi(D) \leq \psi(B)$.

Поскольку для эксперта является весьма трудным и даже невыполнимым выбор всех 2^H значений коэффициентов $\psi(D)$, $D \subseteq J$, соответствующих 2^H подмножеств множества J , а также ввиду того, что критерии агрегирования в данной предметной области определены на непрерывных шкалах, для формализации экспертных знаний о протекании ТП применён интеграл Шоке 2-го порядка.

Ограниченность использования интеграла Шоке в практических приложениях обусловлена слабым интуитивным пониманием этого инструмента большинством практических специалистов и, как следствие, невозможностью для них его применять. Для обеспечения ясности интерпретации и формирования ограничений на параметры интеграла Шоке 2-го порядка, воспользуемся механизмом визуализации, состоящем в построении строгого соответствия между оператором агрегирования и каким-либо хорошо известным физическим объектом из реального мира.

Автором разработан новый метод формирования ограничений на параметры интеграла Шоке 2-го порядка на основе модификации предложенной М. Detyniecki модели баланса. В качестве реального физического объекта выступает рычаг, закреплённый в точке опоры пружиной с постоянным и равным единице коэффициентом жёсткости, на который устанавливаются грузы, соответствующие индексам взаимодействия и критериям. Индекс взаимодействия в случае 2-го порядка определяется

формулой $I(ij) = \psi(i, j) - \psi(i) - \psi(j)$, $\{i, j\} \in J$ и выражает средневзвешенное значение взаимодействия между критериями i и j , помещёнными вместе во всех рассматриваемых комбинациях. Шкала рычага при этом соответствует значениям критериев агрегирования, а шкала угла отклонения рычага – значениям оператора агрегирования. Модификация модели баланса заключается в исключении из рассмотрения отрицательной области шкалы агрегирования и выборе для шкалы рычага интервала $[-1; 1]$ с нулевым нейтральным элементом. При этом отпадает необходимость в задании дополнительных функций, изменяющих топологию шкал. Процедура установки грузов, соответствующих коэффициентам $\psi(i)$, $\psi(j)$ и $I(ij)$ на воображаемый рычаг для каждой пары критериев $i, j \in J$ состоит из следующих шагов:

Шаг 1. В неотрицательной области шкалы рычага на расстояниях g_i и g_j от нулевого значения установить те грузы с весами $\psi(i)$ и $\psi(j)$, которые не были установлены ранее.

Шаг 2. Если индекс взаимодействия критериев $I(ij) < 0$, то в отрицательной области шкалы рычага на расстоянии $\min(g_i, g_j)$, $i, j \in J$ от нулевого значения установить груз, вес которого соответствует абсолютной величине индекса взаимодействия $|I(ij)|$.

Если индекс взаимодействия критериев $I(ij) > 0$, то в положительной области шкалы рычага на расстоянии $\min(g_i, g_j)$, $i, j \in J$ от нулевого значения установить груз, вес которого соответствует $I(ij)$.

На рис. 1. изображено описанное построение баланса для случая двух критериев, индекс взаимодействия $I(1, 2)$ которых отрицателен. Запишем уравнение для этого построения баланса: $x = g_1\psi(1) + g_2\psi(2) + I(1, 2)\min(g_1, g_2)$ Увеличение числа критериев не приведёт к изменениям в структуре баланса:

$$x = \sum_{h=1}^H g_h \psi(h) + \sum_{\{i,j\} \subseteq J} I(ij) \min(g_i, g_j).$$

Это выражение эквивалентно интегралу

Шоке 2-го порядка.

Здесь необходимо отметить, что М. Grabisch предложил метод графической интерпретации интеграла Шоке 2-го порядка, состоящий в построении линии ограничений для значений индекса взаимодействия и индексов Шепли в прямоугольной системе Декартовых координат. Его достоинством является наглядное отражение областей значений индексов Шепли и индексов взаимодействия при агрегировании с применением интеграла Шоке. Основным его недостатком является невозможность рассмотрения более двух критериев. Кроме того, по мнению автора, графическая интерпретация интуитивно менее ясна, чем визуализация, основанная на сопоставлении интегралу Шоке реального объекта, что объясняется хорошо развитыми естественными интуитивными

представлениями в отношении реального физического объекта, в то время, как визуализация на основе построения линии ограничений не обладает этим свойством.

Для случая, когда зависимостями между критериями невозможно пренебречь, предложен оператор агрегирования на основе интеграла Шоке 2-го порядка (после введения дополнительного множителя):

$$AGG[g_1, \dots, g_H] = \text{sign} \left(\prod_{h \in J^*} g_h \right) \left(\sum_{h=1}^H g_h \psi(h) + \sum_{\{i,j\} \subseteq J} I(ij) \min(g_i, g_j) \right)$$

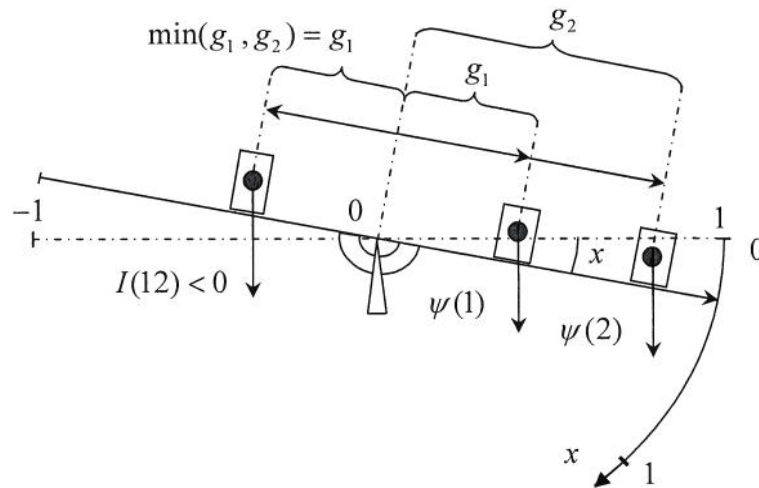


Рис. 1. Визуализация интеграла Шоке 2-го порядка.

Рассмотрим качественное моделирование зависимостей между критериями с помощью предложенной визуализации оператора агрегирования. В соответствии со шкалой агрегирования (рис. 1.), будем называть момент вращения рычага, направленный против часовой стрелки, отрицательным, а направленный по часовой стрелке – положительным.

В случае положительной корреляции критериев или их замещения в отрицательной области шкалы рычага будет расположен груз $|I(ij)|$ на расстоянии $\min(g_i, g_j)$ от нулевой отметки. На рычаг будет действовать отрицательный момент вращения, обусловленный значениями $I(ij) < 0$ и $\min(g_i, g_j)$. При этом суммарный положительный момент вращения, обусловленный грузами $\psi(i)$ и $\psi(j)$, расположенными на расстояниях g_i и g_j от нулевой отметки, будет частично компенсироваться отрицательным моментом $I(ij) \min(g_i, g_j)$.

В случае отрицательной корреляции критериев i и j или их взаимозависимости индекс их взаимодействия положим $I(ij) > 0$. На рычаг будет действовать положительный момент вращения, обусловленный значениями $I(ij) > 0$ и $\min(g_i, g_j)$. При этом суммарный положительный момент вращения, обусловленный грузами $\psi(i)$ и $\psi(j)$, расположенными на расстояниях g_i и g_j от нулевой отметки, будет усиливаться положительным моментом $I(ij) \min(g_i, g_j)$.

Если критерии не коррелированы, а также не замещаемы и не взаимозависимы, то $I(ij) = 0$ и мы можем наблюдать агрегирование независимых критериев. В этом случае положение рычага будет обусловлено действием положительных моментов $g_i \psi(i)$ и $g_j \psi(j)$.

В случае предпочтительной независимости критериев положение рычага будет также обусловлено только действием положительных моментов $g_i \psi(i)$ и $g_j \psi(j)$.

Для идентификации нечёткой меры экспертом должны быть заданы положительные пороги безразличия δ_l , δ_{sh} , δ_{ch} для индексов взаимодействия, индексов Шепли и результата агрегирования соответственно. Суть понятия порога безразличия заключается в признании равными двух величин, абсолютное значение разности которых меньше порога безразличия. В частности, если величина меньше соответствующего порога, то она признаётся равной нулю.

Индекс Шепли критерия i в случае 2-го порядка определяется выражением $\Phi_{sh}(i) = \psi(i) + \frac{1}{2} \sum_{j \in (J-i)} I(ij)$, $i \in J$ и представляет собой общий индекс влияния критерия. В контексте предложенной автором визуализации он будет представлять значение угла отклонения рычага при следующих условиях. Значение критерия i есть единица ($g_i = 1$), поэтому в точке с единичным значением по шкале рычага будет располагаться груз, соответствующий весу $\psi(i)$ критерия i . Грузы, сопоставленные индексам взаимодействия критерия i с другими критериями, будут расположены в точках на шкале рычага $-\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{2}$, соответственно знаку индекса взаимодействия. Угол отклонения рычага x от горизонтальной линии при этом будет равен индексу Шепли критерия i . Будем интерпретировать δ_l как вес груза, соответствующий минимальному значению индекса взаимодействия между критериями. Другими словами, если груз $|I(i, j)|$ будет легче, чем минимальный груз δ_l , то он не должен значимо влиять на угол отклонения рычага. Поэтому мы можем исключить этот груз из рассмотрения. Аналогично мы можем исключить из рассмотрения все грузы $I(i, j)$, $j \in (J-i)$, соответствующие индексам взаимодействия критериев, для

которых справедливо $|I(i, j)| \leq \delta_l$. Если в наиболее экстремальном случае, когда все критерии взаимодействуют, соответствующие индексы взаимодействия отрицательны (положительны) и равны по абсолютной величине δ_l , удалить с рычага грузы, соответствующие индексам взаимодействия, то угол отклонения рычага увеличится (уменьшится) на величину $\frac{1}{2} \sum_{j \in (J-i)} \delta_l = \frac{\delta_l}{2} (|J| - 1) = \frac{\delta_l}{2} (H - 1)$, что будет отражать исключение из рассмотрения индексов взаимодействия, значениями которых можно пренебречь. Соответствующий индекс Шепли не должен при этом значительно измениться, что можно записать в виде неравенства $\delta_{sh} > \frac{\delta_l}{2} (H - 1)$, которое в явном виде выражает ограничения, накладываемые на пороги безразличия δ_l и δ_{sh} .

Перейдём к порогу безразличия δ_{ch} . Рассмотрим наиболее экстремальный случай, когда значения всех критериев равны единице и соответствующий интеграл Шоке 2-го порядка также принимает единичное значение ($CH_\psi(\underbrace{1, \dots, 1}_H) = 1$), индексы взаимодействия критериев отрицательны (положительны) и их абсолютное значение равно δ_l . Здесь, в соответствии с предложенным механизмом визуализации интеграла Шоке 2-го порядка, грузы, сопоставленные индексам взаимодействия $I(ij)$ критериев, располагаются в точке на шкале рычага $-\min(g_i, g_j)$ ($\min(g_i, g_j)$) в случае, если индексы взаимодействия отрицательны (положительны). Поскольку при этом $g_1 = \dots = g_H = 1$, то эти грузы установлены на рычаг в точке с координатой -1 (1) на его шкале. Исключение из рассмотрения в соответствии с приведенными выше рассуждениями грузов, сопоставленных индексам взаимодействия, приведёт к отклонению рычага вниз (вверх) по шкале агрегирования на величину $\sum_{\{i,j\} \in J} \delta_l$. Однако отклонение рычага вниз лишено смысла в силу нарушения граничных условий интеграла Шоке, согласно которым $CH_\psi(g_1, \dots, g_H) \leq 1$ при $0 \leq g_h \leq 1, h = 1, \dots, H$. Поэтому мы будем считать такое отклонение незначительным, то есть при этом не должен быть превышен порог безразличия δ_{ch} на шкале агрегирования. Это условие можно записать в виде неравенства $\frac{(H^2 + H)\delta_l}{2} < \delta_{ch}$.

Полученные неравенства в явном виде выражают ограничения, которые должны соблюдаться при задании экспертом значений порогов безразличия.

Процедура построения интеграла Шоке для некоторого класса состояний $\tilde{S}$ носит итеративный характер, выражающийся в

последовательном уточнении экспертом ограничений, накладываемых на параметры оператора (индексы Шепли, индексы взаимодействия, результаты агрегирования для выбранных реализаций критериев). При этом всякий раз при формировании экспертом этих ограничений на их основе идентифицируется нечёткая мера, а соответствующий оператор агрегирования рассматривается экспертом с использованием предложенной визуализации. При необходимости эксперт корректирует свои предпочтения, и оператор строится заново до тех пор, пока он не будет соответствовать представлениям эксперта.

В третьей главе рассмотрены вопросы, касающиеся идентификации параметров операторов агрегирования. Показано, что основной задачей при этом является идентификация нечёткой меры.

Метод идентификации нечёткой меры на основе вычисления наименьших квадратов относительно прост алгоритмически, но требует от эксперта предварительного знания желательных значений результатов агрегирования реализаций критериев из обучающей выборки. Это является его основным недостатком, поскольку такая информация не очевидна для эксперта, особенно в случае большого числа критериев. Кроме того, полученное этим методом решение не обязательно уникально.

Главное преимущество метода на основе принципа максимального разделения также заключается в его простоте. Однако, при этом на этапе идентификации в решение вносится дополнительный субъективизм, вызванный, несоответствующим предпочтениям эксперта выбором индексов Шепли или индексов взаимодействия. Этот выбор осуществляется на основе максимизации разности между результатами агрегирования из обучающей выборки. Кроме того, полученное этим методом решение не обязательно уникально.

Цель метода на основе минимальной дисперсии заключается в нахождении нечёткой меры такой, по отношению к которой интеграл Шоке является ближайшим к простому среднему арифметическому оператором агрегирования при соответствии с полученной от эксперта информацией о его предпочтениях.

В главе на примере из прикладной области показано, что при увеличении количества дополнительных ограничений, накладываемых экспертом на параметры операторов агрегирования, уменьшаются различия между операторами, полученными на основе различных методов идентификации нечёткой меры.

Одно из преимуществ метода на основе минимальной дисперсии заключается в том, что он ведёт к единственному решению, при условии существования такового. Кроме того, этот метод, в отличие от метода максимального разделения, на этапе идентификации не вносит дополнительного субъективизма в решение. Дополнительный субъективизм

Система реализована по принципу гибридного интеллекта: технолог предприятия (эксперт) включен в состав системы в качестве активного интеллектуального элемента. Измеренные значения параметров ТП поступают на АЦП в составе компьютера, затем заносятся в *базу данных*.

В блоке *формирования диагностических параметров* (ФДП) на основе рассмотренных преобразований измеренных параметров формируются диагностические параметры. С использованием блока *построения функций принадлежности и операторов агрегирования* (ПФПОА) на основе предложенных методов формализуются знания эксперта об особенностях протекания ТП.

На этапе формализации знаний эксперт задаёт функции принадлежности эталонных термов лингвистических переменных, соответствующих диагностическим параметрам, при наложении на термы рассмотренных ограничений. На этапе построения операторов агрегирования с использованием блока ПФПОА формируются предпочтения эксперта в виде ограничений на параметры операторов агрегирования. На основе этих ограничений в блоке *идентификации нечёткой меры* (ИНМ) методом минимизации дисперсии идентифицируется нечёткая мера. Формализованные знания сохраняются в *базе знаний* в виде ряда настроечных параметров системы, параметров функций принадлежности, параметров операторов агрегирования и могут быть представлены в наглядной форме с помощью блока ПФПОА. На основе значений диагностических параметров и знаний, хранящихся в базе знаний в виде эталонных термов соответствующих лингвистических переменных и операторов агрегирования, в блоке *установления текущего состояния* (УТС) формируются выходные данные системы, представляющие собой значения принадлежности текущего состояния классам. С помощью блока индикации эти данные получает эксперт (технолог предприятия), который на основе полученной информации принимает решение о необходимости и о характере управляющих воздействий на технологический процесс. В главе 4 приводятся результаты испытаний системы анализа на подготовительном участке хлопкопрядильного производства на основе разработанной программы испытаний.

По результатам проведённых испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Система анализа состояния, реализованная на основе лингвистического подхода, показала свою работоспособность;
2. Точность отнесения состояний к классу состояний исправного и правильного функционирования ТП в среднем равна 97 %;
3. Точность отнесения состояний к отдельным классам в среднем равна 96 %;

4. Применение интеграла Шоке 2-го порядка вместо средневзвешенного оператора агрегирования критериев позволило повысить точность отнесения состояний к отдельным классам состояний до 6,5 %;

5. Выявлено снижение точности отнесения состояний к классам по мере увеличения количества неисправностей ТП, что является недостатком системы анализа состояния ТП. Это объясняется взаимным влиянием неисправностей, заключающимся в формировании значений диагностических параметров, не соответствующих ни одной из неисправностей.

В главе 4 описана опытная эксплуатация системы анализа состояния ТП. По результатам опытной эксплуатации сделан вывод о том, что использование системы позволяет получить экономический эффект посредством увеличения выработки полуфабриката с заданным уровнем качества, а также путём увеличения периода времени между сеансами обслуживания оборудования.

В выводах и заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обосновано использование лингвистического подхода в виде методики анализа состояния ТП. Лингвистический подход не обладает недостатками, характерными для традиционных подходов.

2. Предложен метод формирования ограничений на параметры оператора агрегирования (интеграла Шоке) на основе его визуализации. В отличие от известного двухкритериального метода графической интерпретации предложенный метод обладает возможностью рассмотрения любого числа критериев.

3. Выявлены ограничения на пороги безразличия, необходимые для идентификации параметров интеграла Шоке 2-го порядка. Показано, что выход за рамки этих ограничений может приводить к невозможности получения решения задачи идентификации параметров операторов агрегирования.

4. Обосновано применение метода минимизации дисперсии нечёткой меры для идентификации параметров интеграла Шоке 2-го порядка при формализации экспертных знаний в рассматриваемой прикладной области. Этот метод позволяет получать единственное решение в виде параметров интеграла Шоке, совместимое с предпочтениями эксперта.

5. Реализована система анализа состояния ТП на примере подготовительного участка хлопкопрядильного производства. Испытания системы показали, что применение интеграла Шоке позволяет повысить

точность анализа до 6,5 % в сравнении с применением средневзвешенного оператора.

6. Осуществлена опытная эксплуатация системы анализа состояния ТП. По результатам эксплуатации сделаны выводы о наличии экономического эффекта от использования системы, а также о целесообразности развития работ в данном направлении.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Сакулин С.А. Прибор для измерения ЛПМ чёсальной ленты на основе пневматического датчика// Вестник ДИТУД.-2003.- № 3(17).-С.58-63.
2. Сакулин С.А. Система автоматизированного контроля качества чёсальной ленты// Современные технологии и оборудование текстильной промышленности: Сб. трудов Всерос. конф.-М.,2003.- С.266.
3. Сакулин С.А. Диагностика технологического процесса получения чёсальной ленты на основе анализа сигнала линейной плотности // Современные технологии и оборудование текстильной промышленности: Сб. трудов Всерос. конф.-М.,2004.- С.234.
4. Сакулин С.А. К вопросу контроля качества полуфабриката и диагностики оборудования в хлопкопрядении методами искусственного интеллекта// Вестник ТГТУ.-2004.-Т.10, № 4А.-С.985-993.
5. Сакулин С.А. Контроль и диагностирование технологических процессов производств протяжённых изделий на основе лингвистического подхода// Вестник ТГТУ.-2006.-Т.12, № 2А.-С.377-391.
6. Сакулин С.А. Визуализация оператора агрегирования на основе интеграла Шоке по нечёткой мере 2-го порядка// Вестник ИРГТУ.-2007.-Т.2,№ 2(30).-С.45-50.
7. Сакулин С.А. Операторы агрегирования в нечётких диагностических моделях технологических процессов производств протяжённых изделий// Вестник ТГТУ.-2007.-Т.13, № 2.-С.57-69.
8. Сакулин С.А. К вопросу об идентификации параметров интеграла Шоке 2-го порядка// Вестник ИРГТУ.-2008.-№ 3(35).-С.205-208.