

На правах рукописи



Меркурьев Сергей Алексеевич

Повышение эксплуатационной надежности непрерывных технологических
процессов с использованием динамической экспертной системы

Специальность 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (технические науки)»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Тверь – 2025

Работа выполнена на кафедре информационных систем федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»).

Научный руководитель: Палюх Борис Васильевич, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВО «ТвГТУ»

Официальные оппоненты: Еремеев Александр Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладной математики и искусственного интеллекта» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
Лопатин Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» Новомосковского института (филиала) ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Новомосковск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Защита состоится «28» октября 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22.

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.410.01
доктор физико-математических наук,
профессор

С.М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные непрерывные технологические процессы (ТП) чаще всего состоят из множества стадий и могут представлять большую опасность. Связано это с тем, что дефект или отказ оборудования в одной из стадий может привести как к незначительному инциденту, так и к крупной аварии с тяжелыми последствиями для предприятия, общества и природы. Для контроля состояния ТП используются различные традиционные методы. Из анализа публикаций можно сделать вывод, что для повышения эксплуатационной надежности современных производств используются методы теории искусственного интеллекта, однако низким остается уровень внедрения динамических экспертных систем в процессы управления и анализа работоспособных состояний каждой стадии ТП.

Цель и задачи. Цель работы заключается в повышении эксплуатационной надежности непрерывных многостадийных технологических процессов на примере неконцентрированной азотной кислоты.

Для реализации заявленной цели необходимо решить следующие задачи: 1. Произвести анализ современного состояния проблемы повышения эксплуатационной надежности непрерывных технологических производств. 2. Разработать и обосновать алгоритм детектирования дефектов в различных режимах технологического процесса. 3. Обосновать целесообразность использования алгоритма формирования гипотез о причинах предаварийных состояний с помощью теории свидетельств. 4. Сформировать методику повышения эксплуатационной надежности. 5. Разработать архитектуру динамической экспертной системы. 6. Осуществить экспериментальную проверку разработанных алгоритмов и оценить показатели надежности функционирования технологического процесса с использованием динамической экспертной системы.

Объект исследования. Многостадийный технологический процесс производства неконцентрированной азотной кислоты.

Предмет исследования. Повышение эксплуатационной надежности ТП с помощью измерения и вычисления технологических переменных, использование моделей и методов определения точек перехода случайного процесса изменения технологических переменных из стационарного в нестационарный режим (точек бифуркации) с помощью двойного скользящего окна. Формирование гипотез о причинах возникновения дефектов и неработоспособных состояний с использованием теории свидетельств, принятие решений по локализации и устранению дефектов с помощью динамической экспертной системы.

Методы исследования. В работе применяются методы системного и статистического анализа, интеллектуальных систем принятия решения с использованием интервальных вычислений, теории свидетельств, динамических экспертных систем.

Научная новизна работы. Научная новизна исследования заключается в создании и обосновании методики повышения эксплуатационной надежности функционирования непрерывных многостадийных технологических процессов с использованием динамической экспертной системы, в которой применяются разработанные и экспериментально обоснованные методы двойного скользящего окна для определения точек бифуркации, теории свидетельств для формирования гипотез о причинах неработоспособных состояний и дефектов ТП и средства логического вывода для принятия решений по диагностике непрерывных многостадийных производств.

На защиту выносятся методика повышения эксплуатационной надежности непрерывных технологических процессов с использованием динамической экспертной системы. Соответствует п. 15. «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения

работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.» паспорта специальности 2.3.3. – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)».

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость заключается в предложенной методике повышения эксплуатационной надежности многостадийных технологических процессов, которая объединяет в систему принятия решений три обоснованных подхода: метод двойного скользящего окна для определения точек бифуркации, теория свидетельств для формирования гипотез о причинах неработоспособных состояний и дефектов ТП и динамическая экспертная система для выявления и уточнения неработоспособных состояний и дефектов.

Практическая ценность. Практическая ценность научных результатов диссертации состоит в том, что с использованием методов, предложенных в диссертационной работе, разработан программный комплекс на основе современных программных средств разработки экспертных систем принятия решений в условиях неопределенности. Результаты диссертационной работы переданы для внедрения в системах управления технологическими процессами на действующих производствах акционерного общества - новомосковская акционерная компания «Азот».

Апробация работы. Основные результаты работы по повышению эксплуатационной надежности многостадийных технологических процессов с использованием динамической экспертной системы были представлены на конференциях: 1. VI Научный семинар «Золотовские чтения» 2024, 10.10-11.10.2024, г. Тверь. 2. V Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии и инновации» 2021, 23.03.2021, г. Тверь. 3. Proceedings of the 2021 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering, elconrus 2021, 26.01-28.01.2021, г. Москва

Публикация результатов. По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы: 2 статьи в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК; 1 статья в журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus и Web of Science; 1 статья в научном журнале из списка РИНЦ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 157 страниц основного текста, 25 таблиц, 15 рисунков. Список литературы включает 106 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности исследования в области эксплуатационной надежности непрерывных многостадийных технологических процессов, сформулированы объект и предмет исследования, поставлены цель и задачи, отражены научная новизна, теоритическая и практическая значимость работы. Представлен список конференций, на которых апробировались результаты исследования.

В **первой главе** проведен анализ современных подходов к обеспечению безотказной работы непрерывных многостадийных технологических процессов, представляющих повышенную опасность из-за риска отказов с тяжелыми последствиями. Рассмотрены три ключевых направления повышения надежности: 1. Технологические меры (совершенствование оборудования в соответствии с современными инновационными подходами). 2. Автоматизированные системы диагностики на основе IoT (Internet of Things) и машинного обучения. 3. Автоматизированные системы управления критическими режимами, интегрированные с SCADA (supervisory control and data acquisition).

Выявлены ключевые недостатки современных подходов повышения эксплуатационной надежности технологического процесса:

1. Отсутствие методов определения точки перехода случайных процессов изменения технологических переменных действующего производства в нестационарные режимы при диагностике стационарных режимов работы технологического процесса. Современные системы часто не способны своевременно идентифицировать переход ТП из стационарного в нестационарный режим, что приводит к запаздыванию в диагностике и увеличению риска возникновения неработоспособных состояний и дефектов. Это требует разработки новых алгоритмов, способных анализировать динамику процессов в реальном времени и выявлять признаки не стационарности на ранних этапах.
2. Отсутствие современного подхода, основанного на методах искусственного интеллекта по принятию оперативных решений с целью управления эксплуатационной надежностью. Традиционные методы управления часто не учитывают сложность и взаимосвязь стадий технологических процессов.
3. Отсутствуют решения по построению архитектуры специализированной динамической экспертной системы повышения эксплуатационной надежности непрерывных многостадийных технологических процессов.

Во **второй главе** представлена методика повышения эксплуатационной надежности многостадийного непрерывного технологического процесса.

В первом разделе представлен анализ случайного процесса изменения во времени технологических переменных производства неконцентрированной азотной кислоты. В данном разделе представлено описание состава типового агрегата УКЛ-7, его структура, измеряемые значения технологических переменных и их нормативные значения. Также представлено описание вычисляемых диагностических параметров производства неконцентрированной азотной кислоты и их нормативные значения. Представлена (Рисунок 1) и описана схема основных материальных потоков агрегатов УКЛ-7.

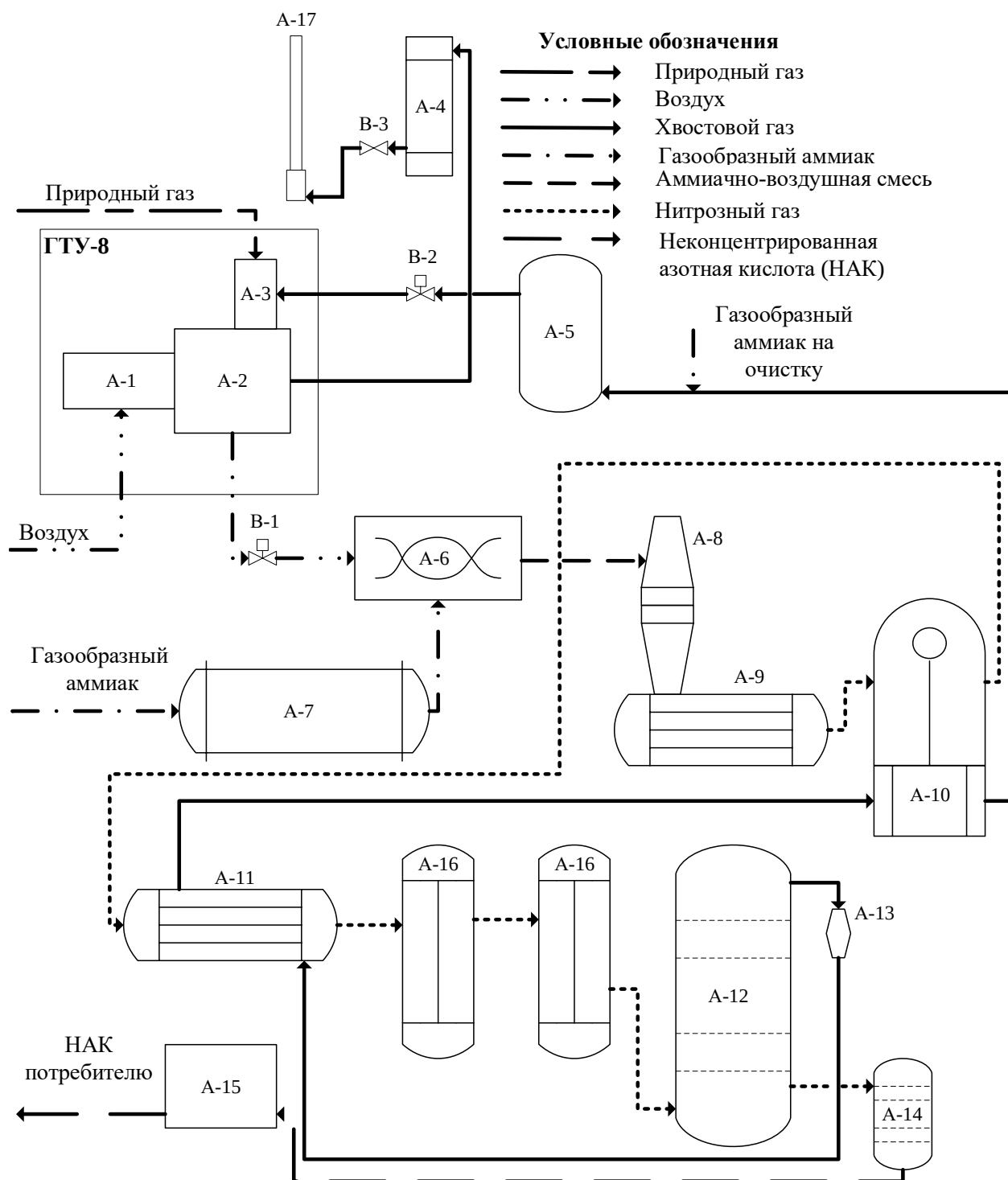


Рисунок 1 - Схема основных материальных потоков агрегатов УКЛ-7 с селективной низкотемпературной очисткой хвостовых газов

Во втором разделе представлено описание алгоритма обнаружения аномалий и определения точки бифуркации случайного процесса изменения технологической переменной во времени на основе метода двойного скользящего окна.

Для решения задачи обнаружения точек бифуркации в непрерывном многостадийном технологическом процессе необходимо исследовать непрерывный поток диагностических переменных от сенсоров технологического оборудования. Наблюдения осуществляются через равные промежутки времени Δt . Множество наблюдаемых за период времени T значений образуют многомерный (D - мерный) временной ряд, который отражает динамику состояния технологического процесса. Система измерений включает D сенсоров технологического оборудования. Таким образом, для любого сенсора $d = 1, 2 \dots, D$ временной ряд $y_1^d, y_2^d, \dots, y_t^d$ представляет собой множество значений технологической переменной y_t^d измеренных в момент времени t . Для поиска бифуркаций используется метод анализа потоковых данных с помощью двойного скользящего окна, суть которого заключается в проверки условий стационарности на основе выборочных данных для коротких временных рядов.

Алгоритм обработки потоковых данных содержит следующие шаги:

1. Формирование исходного временного ряда размера N $Y^d = [y_1^d, y_2^d, \dots, y_N^d]$ для рассматриваемого датчика d .
2. Разделим получившийся временной ряд на N кортежей размера h (h - количество диагностических переменных внутри одного кортежа) и получим $k = \overline{1; N}$ временных рядов $Y^{d,k} = [y_1^{d,k}, y_2^{d,k}, \dots, y_h^{d,k}]$.
3. Обработываем каждый получившийся кортеж $Y^{d,k}$ с помощью алгоритма скользящего окна размера l (l – размер скользящего окна) и на выходе получим множество кортежей $Y^{d,k} = [y_1^{d,k}, y_2^{d,k}, \dots, y_{h-l+1}^{d,k}]$. В данном алгоритме скользящего окна используется как низкочастотный фильтр, подавляющий кратковременные случайные выбросы значений диагностических переменных.
4. Вычисляем средние значения и квадраты средних значений по каждому кортежу $Y^{d,k}$ и на их основе формируем два кортежа: 1)

$[\overline{y_{d,1}}, \overline{y_{d,2}}, \dots, \overline{y_{d,k}}, \dots, \overline{y_{d,N}}]$ и 2) путем возведения в квадрат $[\overline{y_{d,1}^2}, \overline{y_{d,2}^2}, \dots, \overline{y_{d,k}^2}, \dots, \overline{y_{d,N}^2}]$.

5. Проверяем полученные последовательности на наличие тренда, используя модификацию критерия Фостера-Стюарда. Для этого рассчитываем множества u_k, v_k, u_k^2 и v_k^2 по формулам:

$$u_k = \begin{cases} 1 \leftarrow \text{if } \overline{y_k} > \overline{y_{k-1}}, \overline{y_{k-2}}, \dots, \overline{y_1} \\ 0 \leftarrow \text{else} \end{cases}, \quad v_k = \begin{cases} 1 \leftarrow \text{if } \overline{y_k} < \overline{y_{k-1}}, \overline{y_{k-2}}, \dots, \overline{y_1} \\ 0 \leftarrow \text{else} \end{cases}$$

$$u_k^2 = \begin{cases} 1 \leftarrow \text{if } \overline{y_k^2} > \overline{y_{k-1}^2}, \overline{y_{k-2}^2}, \dots, \overline{y_1^2} \\ 0 \leftarrow \text{else} \end{cases}, \quad v_k^2 = \begin{cases} 1 \leftarrow \text{if } \overline{y_k^2} < \overline{y_{k-1}^2}, \overline{y_{k-2}^2}, \dots, \overline{y_1^2} \\ 0 \leftarrow \text{else} \end{cases}$$

6. Для проверки гипотезы об отсутствии стационарности во временных рядах вычисляем значения W, F, W^2 и F^2 по формулам

$$W = \sum_{k=2}^N (u_k - v_k), \quad F = \sum_{k=2}^N (u_k + v_k)$$

$$W^2 = \sum_{k=2}^N (u_k^2 - v_k^2), \quad F^2 = \sum_{k=2}^N (u_k^2 + v_k^2)$$

7. Вычисляем значения t_W, t_F, t_{W^2} и t_{F^2} по формулам

$$t_W = \frac{W}{\sigma_W}, \quad t_{W^2} = \frac{W^2}{\sigma_{W^2}}, \quad t_F = \frac{F - \mu}{\sigma_F}, \quad t_{F^2} = \frac{F^2 - \mu}{\sigma_{F^2}}$$

$$\sigma_W = (2 \sum_{k=2}^N \frac{1}{k})^{0,5}, \quad \sigma_F = (\mu - 4 \sum_{k=2}^N \frac{1}{k^2})^{0,5}, \quad \mu = 2 \sum_{k=2}^N \frac{1}{k}$$

8. При отсутствии тренда нормализованные значения статистик приблизительно описываются распределением Стьюдента с числом степеней свободы N . Сравниваем полученное значение с рассчитанными значениями по модулю t_W, t_F, t_{W^2} и t_{F^2} и при превышении полученных значений фиксируем переход процесса в нестационарное состояние.

В третьем разделе представлено описание алгоритма формирования гипотез о причинах предаварийных состояний с помощью функций доверия.

Теория свидетельств или теория Демпстера-Шафера является общей основой для рассуждений с неопределенностью и позволяет объединить

свидетельства из разных источников и прийти к определенной степени уверенности в наличии того или иного события.

Анализ диагностических переменных заключается в формировании гипотез о причинах предаварийного состояния технологических цепей с помощью теории свидетельств. Для этого используются данные, полученные с помощью алгоритма двойного скользящего окна и матрицы экспертных оценок

$$A = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & \cdots & A_r \\ \begin{matrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{matrix} & \begin{matrix} m_{11} \\ m_{21} \\ \vdots \\ m_{n1} \end{matrix} & \begin{matrix} m_{12} \\ m_{22} \\ \vdots \\ m_{n2} \end{matrix} & \begin{matrix} \cdots \\ \cdots \\ \ddots \\ \cdots \end{matrix} & \begin{matrix} m_{1r} \\ m_{2r} \\ \vdots \\ m_{nr} \end{matrix} \end{matrix}$$

где r – число возможных гипотез, n – число рассматриваемых диагностических показателей, d – диагностический показатель, A – гипотеза, m – экспертная оценка (вероятность от 0 до 1).

Для формирования гипотез необходимо выполнить следующие шаги.

Отбираем из матрицы A только те строки d_n , в потоковых данных которых были найдены бифуркации, и рассчитываем для них индикаторные функции P_n . Измеряемая диагностическая переменная представляется в виде интервального числа $D_n = [\underline{d}_n, \overline{d}_n]$, где $\underline{d}_n$ – нижняя граница, а $\overline{d}_n$ – верхняя граница. Диапазон нормативных значений диагностических переменных $S_n = [\underline{\delta}_n, \overline{\delta}_n]$, где $\underline{\delta}_n$ – нижняя граница, а $\overline{\delta}_n$ – верхняя граница.

Для случая, когда кризисное состояние наступает при выходе интервала измеряемой диагностической переменной D_n за верхнюю границу диапазона его нормативных значений $P_n = \overline{P}_n$, за нижнюю границу - $P_n = \underline{P}_n$.

$$\overline{P}_n = \begin{cases} 0, \text{ если } \overline{d}_n \leq \overline{\delta}_n \\ 1, \text{ если } \underline{d}_n \leq \overline{\delta}_n \\ \frac{\overline{d}_n - \overline{\delta}_n}{\overline{d}_n - \underline{d}_n}, \text{ если } \underline{d}_n < \overline{\delta}_n < \overline{d}_n \end{cases}, \quad \underline{P}_n = \begin{cases} 0, \text{ если } \underline{d}_n \geq \underline{\delta}_n \\ 1, \text{ если } \overline{d}_n \leq \underline{\delta}_n \\ \frac{\underline{\delta}_n - \underline{d}_n}{\underline{\delta}_n - \underline{d}_n}, \text{ если } \underline{d}_n < \underline{\delta}_n < \underline{d}_n \end{cases}$$

Вычисление нормированных значений базовых вероятностей происходит с помощью формулы $\tilde{m}_{nr} = \frac{m_{nr}}{\sum_{i=1}^r m_{ni}}$.

Используя значения индикаторной функции перераспределяем значения вероятностей с помощью формулы $m_{nr}^* = \tilde{m}_{nr} P_n$. Массив значений m_{nr}^* используется для объединения гипотез.

Для объединения нескольких гипотез используется теория свидетельств. Для объединения различных свидетельств с распределениями вероятностей m_1 и m_2 в пользу одной гипотезы используется правило Демпстера-Шафера

$$m_1 \oplus m_2(A) = \frac{1}{1 - M(\emptyset)} \sum_{Y \cap Z = A} m_1(Y) m_2(Z)$$

$$M(\emptyset) = \sum_{Y \cap Z = \emptyset} m_1(Y) m_2(Z)$$

В соответствии с теорией свидетельств определяются оценки степени уверенности $Bel(A_r)$ и степени правдоподобия $Pl(A_r)$ принятия гипотез с помощью формул

$$Bel(A_r) = \sum \{m_n(C) | C \subseteq A_r\}$$

$$Pl(A_r) = 1 - Bel(\overline{A_r}) = 1 - \sum \{m_n(C) | C \cap A_r \neq \emptyset\}$$

где C – множество событий.

На основе полученных базовых вероятностей вычисляем функции доверия $Bel(A_r)$ и правдоподобия $Pl(A_r)$ для всех рассматриваемых гипотез, и определяем наиболее вероятную. Достоинство такого подхода состоит в том, что решение, найденное с помощью теории свидетельств, использует полную группу событий по анализу кризисных ситуаций.

В **третьей главе** представлена практическая реализация разработанной методики в виде программного комплекса динамической экспертной системы, который включает в себя модули анализа текущего состояния, формирования гипотез и логического вывода. В главе подробно описана структура разработанного программного комплекса и приведены блок-схемы

алгоритмов модулей. Структурная схема разработанного программного комплекса представлена на рисунке 2.

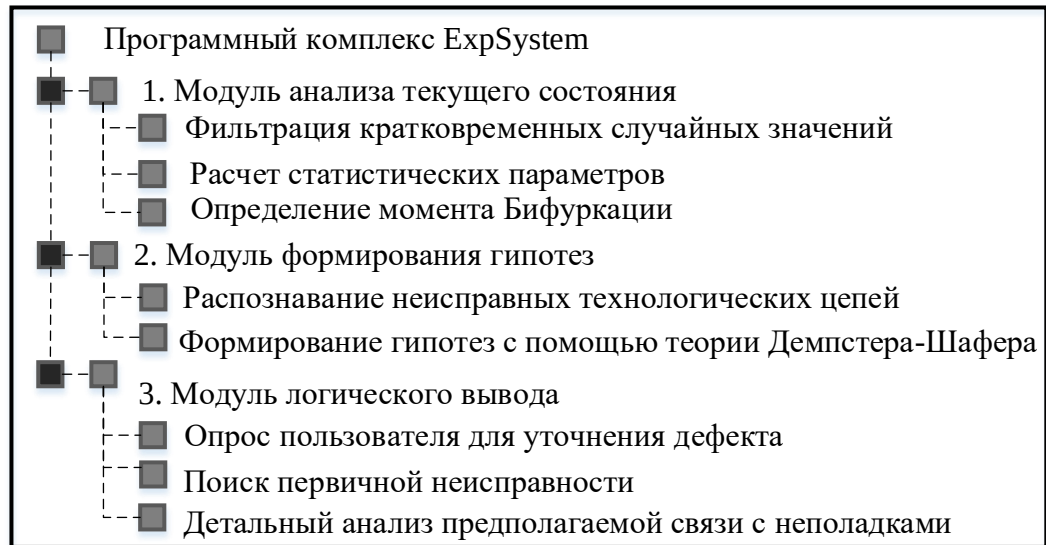


Рисунок 2 - Структурная схема программного комплекса

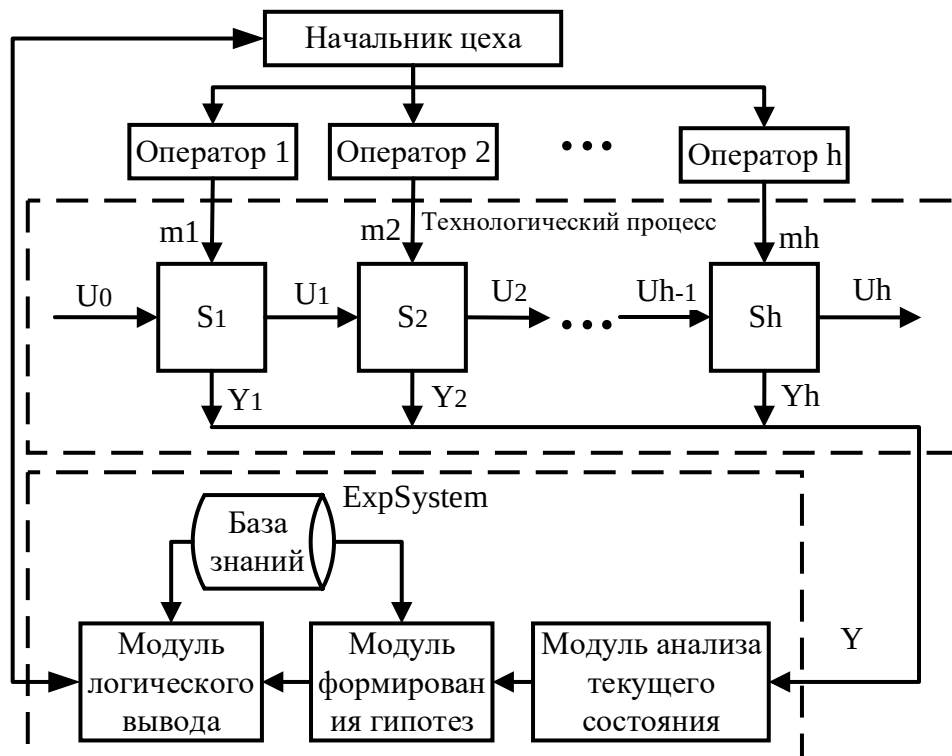


Рисунок 3 - Интеграционная схема программного комплекса ExpSystem

Интеграционная схема представлена на рисунке 3, где h – количество стадий производства, m_i – управляющие воздействия операторов, S_i – стадия

производства, Y_i – диагностические переменные, U_i – материальные потоки, i – номер стадии ТП.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования на примере производства неконцентрированной азотной кислоты в агрегатах УКЛ-7, подтверждающие эффективность разработанной методики.

В первом разделе подробно описан подход к моделированию данных. Во втором разделе представлено экспериментальное обоснование алгоритма обнаружения аномалий и определения момента бифуркаций на основе метода двойного скользящего окна. Также приведено сравнение полученных результатов при использовании метода Демпстера-Шафера и метода нечетких множеств. В третьем разделе представлено экспериментальное обоснование алгоритма формирования гипотез о причинах предаварийных состояний с помощью функции доверия и базы знаний динамической экспертной системы. В четвертом разделе была проведена оценка вероятности безотказной работы системы производства неконцентрированной азотной кислоты для следующих цепей: Ц1 - газовая цепь подачи воздуха, Ц2 - газовая цепь движения нитрозных газов до подогревателя, Ц3 - газовая цепь движения хвостовых газов, Ц4 - цепь подачи природного газа, Ц5 - цепь подачи газообразного аммиака для подготовки аммиачно-воздушной смеси, Ц6 - цепь подачи газообразного аммиака на очистку, Ц7 - цепь подачи аммиачно-воздушной смеси, Ц8 - цепь подачи нитрозных газов после подогревателя, Ц9 – цепь неконцентрированной азотной кислоты (подача на склад). Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Оценка увеличения вероятности безотказной работы

	Вероятность безотказной работы системы	Вероятность отказа системы
До внедрения	0.9868	0.0132
После внедрения	0.9882	0.0118
Улучшение показателя в %		~10.6%

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационного исследования, а в **приложении** приведен акт об использовании результатов исследования, приведены деревья отказов и значения основных измеряемых технологических показателей, полученных с производства.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа состояния современных непрерывных технологических производств показана актуальность проведения теоретических исследований и разработок, направленных на совершенствование систем диагностики с целью повышения эксплуатационной надежности многостадийных производств.
2. Доказана целесообразность использования метода двойного скользящего окна для детектирования точек бифуркации в различных режимах технологического процесса.
3. Обоснована целесообразность использования теории свидетельств Демпстера-Шафера для формирования гипотез о причинах предаварийного состояния.
4. Предложена и экспериментально обоснована методика повышения эксплуатационной надежности технологических процессов с использованием динамической экспертной системы.
5. Разработан комплекс программных средств динамической экспертной системы, реализующий предложенную методику.
6. В результате экспериментальных исследований сделан вывод о нецелесообразности использования традиционных методов диагностики в следствии того, что они приводят к ошибкам второго рода, которые устраняются разработанной методикой. Внедрение этой методики позволило увеличить вероятность безотказной работы ТП в течении исследованного периода времени на 10.6%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Палюх, Б. В. Программная реализация диагностики непрерывных многостадийных производств с использованием динамической экспертной системы / Б. В. Палюх, А. Н. Ветров, **С. А. Меркурьев** // Программные продукты и системы. – 2024. – № 4. – С. 622-628. – DOI 10.15827/0236-235X.148.622-628. – EDN NXBHJZ.
2. **Меркурьев, С. А.** Методика повышения эксплуатационной надежности непрерывных многостадийных технологических процессов / С. А. Меркурьев, Б. В. Палюх, А. Н. Ветров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 6. – С. 171-174. – EDN IZQJIR.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

3. Methods for Forecasting Critical States of the Technological Process in the Evolutionary Management of Continuous Multi-Stage Production / B. Palyukh, **S. Merkuryev**, A. Vetrov [et al.] // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 2195-2201. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396111. – EDN JOZNNV.

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

4. Палюх, Б. В. подход к решению вопроса обнаружения аномалий в динамических экспертных системах / Б. В. Палюх, А. Н. Ветров, **С. А. Меркурьев** // Современные технологии и инновации: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, Тверь, 23 марта 2021 года. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. – С. 136-142. – EDN YCAKMK.