

М.Н. КРАСНЯНСКИЙ

**НАДЕЖНОСТЬ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ
МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

**Москва
"Машиностроение"
2010**

УДК 66.013
ББК Л11-5-021.1
К78

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой "Компьютерно-интегрированные системы
в химической технологии" РХТУ им. Д.М. Менделеева
А.Ф. Егоров

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой "Технологическое оборудование и
пищевые технологии" ГОУ ВПО ТГТУ
С.И. Дворецкий

Краснянский М.Н.

К78 Надежность функционирования процессов и аппаратов
многоассортиментных химических производств. – М.:
Машиностроение, 2010. – 116 с. – ISBN 978-5-94275-538-6.

Предложена методология прогнозирования и обеспечения надежности функционирования процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств. Рассмотрены основные направления повышения надежности процессов и аппаратов на стадиях проектирования и эксплуатации, а также снижения негативного влияния человеческого фактора на надежность функционирования технических систем.

Предназначена для специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией многоассортиментных химических производств, моделированием и оптимизацией процессов принятия решений в данной области, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 66.013
ББК Л11-5-021.1

ISBN 978-5-94275-538-6

© Краснянский М.Н., 2010

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития технологий формирует высокие требования к надежности функционирования промышленных производств. Каждая непредвиденная остановка выпуска продукции по причине выхода из строя единицы технологического оборудования (ТО) приводит к значительным материальным потерям вследствие недовыпуска продукции, нарушения ритмичности производства, потери дорогостоящего сырья, необходимости проведения ремонтных работ. При этом доля "человеческого фактора" как первопричины аварийной ситуации возросла с 20% в 60-х гг. XX в. до 80% в настоящее время. Специфика многоассортиментных химических производств (МХП), использующих в производстве пожаро- и взрывоопасные, токсичные, высококоррозионные вещества, делает особенно актуальным предотвращение возникновения внештатных ситуаций, развитие которых может привести к серьезным авариям, экологическим катастрофам и человеческим жертвам.

Добиться безаварийной ритмичной работы химико-технологических производств возможно лишь в результате реализации системного подхода к обеспечению надежности функционирования процессов и аппаратов (ПиА) многоассортиментных химических производств на всех этапах жизненного цикла. Использование единого информационного пространства, удовлетворяющего требованиям CALS-технологий, призвано повысить эффективность и надежность работы всех служб, задействованных на различных этапах жизненного цикла технической системы (ТС). Постановка задач оптимального проектирования, планирования и обслуживания МХП; разработка математических моделей функционирования проектируемых объектов и производственных процессов; обоснование подходов к решению поставленных задач дает возможность описать всю технологию создания и эксплуатации технических систем в течение их жизненного цикла.

Методологические основы проектирования многоассортиментных производств, математические формулировки задач календарного планирования выпуска продукции, принципы технической диагностики и организации обслуживания технологического оборудования, методы и алгоритмы решения задач рассматривались в научных публикациях В.В. Кафарова, Л.С. Гордева, В.В. Макарова, А.Ф. Егорова, С.И. Дворецкого, Б.В. Палюха, И.Е. Гроссмана, Г.В. Реклейтиса и других ученых. Основные направления и методики

подготовки и обеспечения надежности работы обслуживающего персонала эргатических систем сформулированы в работах В.П. Зинченко, П.Я. Шлаен, Е.С. Полат, Т.Б. Чистяковой, И.Т. Фролова, Ж. Кристенсен, Д. Мейстер, П. Фоули. Значительный вклад в разработку теории и методов оптимального проектирования и управления многоассортиментными химическими производствами внесли сотрудники научной школы "Теория и методы автоматизированного проектирования производств химического и машиностроительного профиля", созданной в Тамбовском государственном техническом университете (ГОУ ВПО ТГТУ) под руководством Е.Н. Малыгина.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций по проблеме прогнозирования и обеспечения надежности функционирования ПиА МХП приводит к выводу, что предложенные до настоящего времени подходы к ее решению ориентированы на отдельные фрагменты жизненного цикла МХП, не учитывают взаимного влияния задач этапов проектирования и эксплуатации, игнорируют проблему комплексной подготовки и повышения квалификации обслуживающего персонала и не позволяют достаточно корректно прогнозировать и обеспечивать показатели надежности функционирования рассматриваемых производств.

В настоящей работе рассмотрена методология прогнозирования и обеспечения надежности функционирования ПиА МХП, которая, с одной стороны, учитывает технологию создания и функционирования данного класса производств, обеспечивает совместимость отдельных этапов жизненного цикла, а с другой – позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора на надежность работы системы.

1. НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Многоассортиментные производства занимают значительную долю в структуре химической промышленности. Обладая такими признаками, как широкий ассортимент выпускаемой продукции, быстрый переход с выпуска одного продукта на другой, использование широкого спектра перерабатываемого сырья, небольшие объемы выпуска продукции [1 – 3], они могут быть использованы в самых различных областях производства органических красителей и промежуточных продуктов; текстильно-вспомогательных веществ; стабилизаторов и антипиренов, предназначенных для защиты полимеров; ускорителей вулканизации; лакокрасочных материалов; химических реактивов и особо чистых веществ; фотографических материалов; пестицидов; синтетических лекарственных средств; катализаторов; продуктов бытовой химии; парфюмерных и косметических изделий [1, 3 – 8].

Выпуск продукции многоассортиментного производства осуществляется на технических системах периодического и полунепрерывного действия в виде отдельных партий, которые последовательно проходят заданные стадии обработки. Отличительной особенностью ТС данного типа является то, что различные аппаратурные стадии системы в каждый момент времени могут быть заняты выполнением различных операций или простаивать в ожидании подачи следующей партии продукта [9].

Учитывая такие особенности многоассортиментных производств, как быстрая смена ассортимента выпускаемой продукции, возможность изменения маршрута выпуска продукта, перекоммутация трубопроводов в рамках рассматриваемого класса ТС в литературе выделяют гибкие автоматизированные производственные системы (ГАПС) или гибкие химико-технологические системы (ГХТС). В работе [10] дано следующее определение ГХТС – это непрерывные, квазинепрерывные или периодические производства многономенклатурной продукции с часто меняющимся ассортиментом и планом выпуска, в которых полностью или в значительной степени автоматизированы процессы планирования многоассортиментного производства и оптимизации расписания работы оборудования химико-технологической схемы (ХТС); перевода производства с

выпуска одного ассортимента на другой; контроля технологических параметров и параметров управления процессами (режимами) производства; диагностики аварийных ситуаций; подготовки и подачи сырья в аппараты; упаковки и складирования готовых форм; ремонта, очистки и подготовки к работе аппаратов; монтажа и демонтажа оборудования; очистки и утилизации отходов.

Рассмотрим структуру жизненного цикла МХП (рис. 1.1). Предлагается выделить три основных этапа – проектирование, монтаж и эксплуатация, с последующей реконструкцией или утилизацией системы.

Особо необходимо отметить, что рассматриваемый класс ТС относится к эргатическим системам, а, следовательно, необходим учет влияния человеческого фактора на процесс функционирования МХП. Надежность функционирования ПиА МХП прогнозируется и закладывается на этапе проектирования при выборе аппаратного оформления технической системы и обеспечивается в процессе монтажа и последующей продолжительной эксплуатации системы. Поэтому в настоящей работе рассматриваются два ключевых, с точки зрения надежности функционирования ПиА, этапа – проектирование и эксплуатация. При этом предполагается, что монтаж осуществляется в соответствии с требованиями проектно-конструкторской документации и нормативами на проведение работ. Укрупненно этапы проектирования и эксплуатации представлены на рис. 1.2 и 1.3.

В ходе решения задач проектирования МХП исходная информация **Д**, сосредоточенная в техническом задании в виде ассортимента и плановых объемов производства; технологических регламентов выпуска продуктов; парка технологического оборудования предприятия и оборудования, планируемого к приобретению; показателей надежности функционирования оборудования (интенсивности отказов и восстановления, диагностируемые параметры и др.) преобразуется в информационно-аналитический регламент **Р** действующего МХП. Понятие информационно-аналитического регламента (ИАР) вводится для централизованного описания информации о создаваемой технической

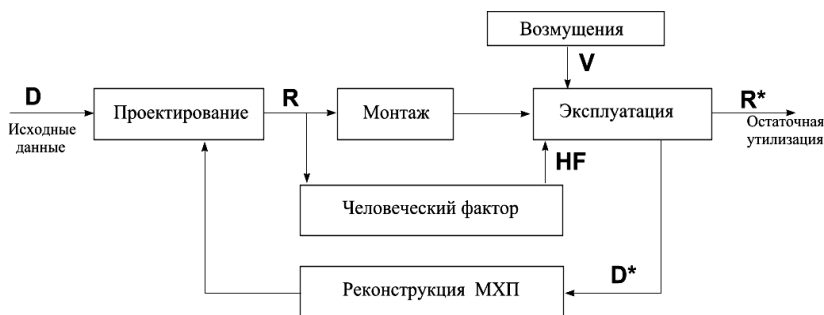


Рис. 1.1. Структура жизненного цикла МХП

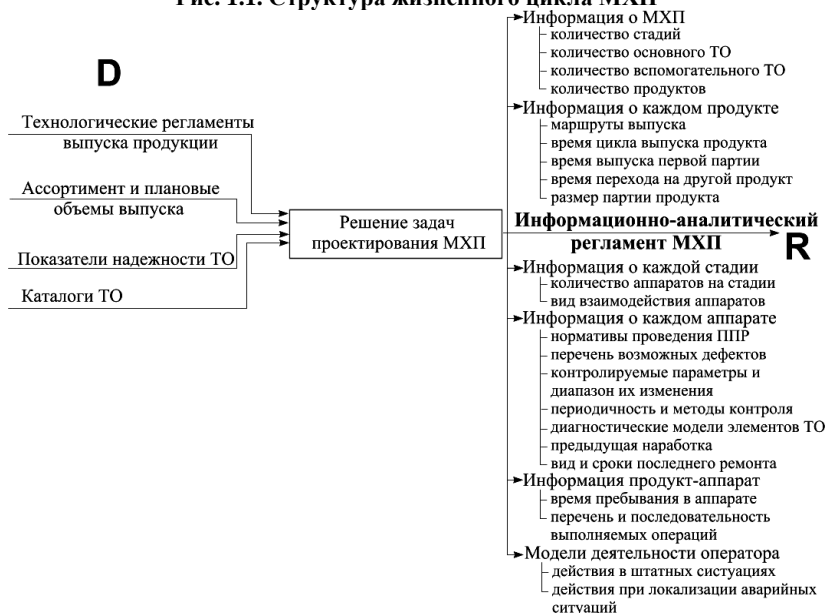


Рис. 1.2. Этап проектирования МХП

системе для использования при решении задач последующих этапов ее жизненного цикла. ИАР представляет собой информационный комплекс, содержащий модули описания следующих характеристик МХП:

- общая информация о МХП – включает количественное описание стадий системы, аппаратов на каждой стадии (как основное технологическое оборудование, так и вспомогательное); возможного ассортимента выпускаемой продукции;

– информация о каждом продукте – включает возможные маршруты выпуска продукта, временные характеристики (время цикла, время выпуска первой партии, время перехода с выпуска одного продукта на другой), размер партии продукта;

– информация о каждой стадии – описывает количество ТО на каждой стадии и виды взаимодействия (например, для параллельно работающих аппаратов – возможность обработки партий синхронно или со сдвигом);

– информация о каждом аппарате МХП – включает описание аппарата (тип аппарата, наличие внутренних устройств, характеризующий размер, тип перемешивающего устройства, наличие рубашки и др.), ремонтные характеристики (нормативные значения периодов проведения планово-предупредительных ремонтов (ППР), трудозатрат на ремонт, продолжительности ремонтов, а также текущая наработка аппарата, вид и сроки последнего ремонта), характеристики диагностирования (перечень возможных дефектов, методов и средств их контроля и устранения, математические модели диагностирования состояния отдельных узлов и элементов);

– информация продукт-аппарат – в соответствии с возможными маршрутами выпуска продукта включает информацию о времени пребывания продукта в аппарате каждой стадии, последовательность и длительности выполняемых операций;

– модели деятельности оператора – включает математические модели деятельности обслуживающего персонала при выпуске каждого продукта, а также в случае возникновения нештатных и аварийных ситуаций.

Введение понятия информационно-аналитического регламента как информационной основы описания действующего МХП продиктовано современным уровнем развития информационных и коммуникационных технологий на производстве, внедрением передовых систем автоматизации технологического процесса и управления выпуском продукции и предприятием в целом. Создание единой информационной системы промышленного предприятия требует четкого однозначного описания всех входящих в него производств. Только в этом случае возможно комплексное решение задач управления выпуском продукции, опирающееся на взаимодействие интегрированных автоматизированных систем.

Учитывая особенности функционирования МХП, ИАР позволяет сосредоточить основной объем исходной информации для решения всех задач последующих этапов жизненного цикла (рис. 1.3).

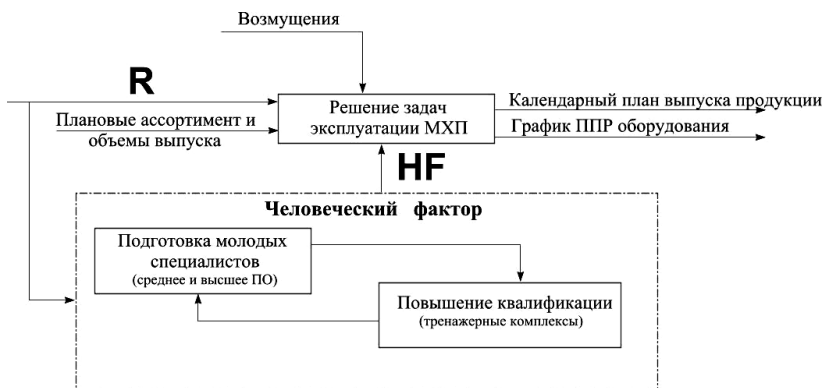


Рис. 1.3. Этап эксплуатации МХП

При эксплуатации МХП для каждого планируемого периода дополнительно поступают данные об ассортименте и объемах выпуска продукции. В ходе решения задач этапа эксплуатации МХП формируется календарный план выпуска продукции и график ППР ТО. При этом необходимо учитывать наличие возмущений, вызванных внешней средой и аварийными выходами из строя технологического оборудования, что приводит к многократному решению задач в течение планируемого периода. Кроме того, необходимо учитывать влияние человеческого фактора **HF** на надежность работы системы. Поэтому важнейшим направлением повышения надежности функционирования ПиА МХП является непрерывная подготовка специалистов, как во время базового обучения, так и при последующем повышении квалификации. Наличие в ИАР информации о надежности оборудования, ремонтных и диагностических характеристиках, моделей деятельности персонала в различных условиях позволяют успешно ставить и решать задачи, возникающие на этапе эксплуатации МХП.

На основании представленных структур жизненного цикла МХП была предложена следующая общая стратегия прогнозирования и обеспечения надежности функционирования (рис. 1.4).

Создаваемое производство находится в постоянном информационном и материальном взаимодействии с окружающей средой. Поэтому исходными данными для разработки проекта МХП, как в последующем и для формирования планового задания по выпуску продукции на конкретный планируемый период, являются прогнозируемые значения ассортимента выпускаемой продукции и возможной емкости рынков сбыта.

На основании полученного прогноза и имеющихся технологических регламентов производства продукции заданного

ассортимента на этапе проектирования МХП главной задачей является расчет аппаратного оформления технической системы, который заключается в определении размеров и числа аппаратов основных и промежуточных стадий МХП, при которых критерий оптимальности решения задачи, "условная" прибыль, достигает максимума и выполняются плановые задания по выпуску заданного ассортимента продукции в установленных объемах за отведенное время, а также ограничения на размеры ТО, режимы обработки партий продуктов на стадиях и надежность функционирования ТС.

Исходными данными для расчета аппаратного оформления является технологический регламент производства продукции, в котором определен тип аппаратов, а также перечень технологических процессов, с указанием длительностей операций и материальных индексов для каждой стадии производства.

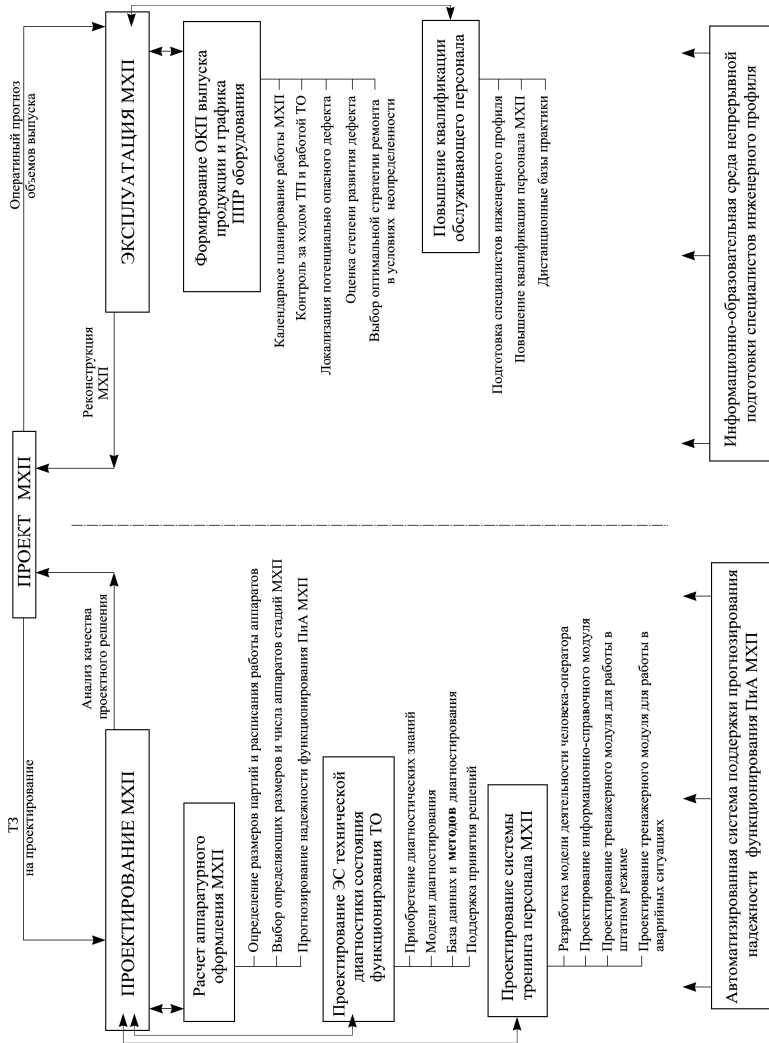


Рис. 1.4. Задачи прогнозирования и обеспечения надежности функционирования Пиа МХП

Одна из главных проблем, возникающих при этом —

отсутствие или малая достоверность информации по показателям надежности аппаратов и их элементов при работе в заданных условиях. Для решения этой проблемы в работе предлагается создание автоматизированной системы поддержки прогнозирования надежности функционирования ПиА МХП с возможностью сбора и анализа показателей надежности ТО, с учетом опыта реальной эксплуатации на различных предприятиях как в России, так и за ее пределами. Работа автоматизированной системы должна осуществляться в дистанционном режиме, опираясь на имеющиеся технологии и сервисы сети Интернет. В ее наполнении информацией заинтересованы как проектные организации, так и конечные пользователи их продукции – промышленные предприятия, для которых надежная эксплуатация оборудования является важнейшим фактором повышения эффективности производства и снижения издержек.

Кроме того, уже на этапе проектирования для успешного диагностирования состояний функционирования ТО и предупреждения появления и развития аварийных ситуаций необходимо предусматривать возможность сбора, хранения и анализа информации по различным показателям, определяющим состояние работы оборудования и ход выполнения технологического процесса. Поэтому помимо обеспечения необходимой контрольно-измерительной аппаратурой и средствами сбора информации, необходимо предусматривать наличие системы технической диагностики состояния технологического оборудования. Данная система, опираясь на базы экспертных знаний и математические модели диагностирования состояния ТО, позволит осуществлять оперативный анализ состояния и динамики его развития для предупреждения аварийных ситуаций и выбора оптимальной стратегии проведения ремонтных работ при эксплуатации МХП.

Для снижения негативного влияния человеческого фактора на надежность функционирования ПиА МХП предлагается уже на этапе проектирования комплектовать создаваемые проекты автоматизированными системами тренинга персонала МХП. На основе разработанных математических моделей деятельности человека-оператора в различных условиях эксплуатации МХП должны создаваться тренажерные модули, которые позволят оператору приобрести необходимые практические знания и навыки управления производством как в штатных режимах эксплуатации, так и при возникновении аварийных ситуаций.

Таким образом, в результате решения задач этапа проектирования формируется проект МХП, основой информационного обеспечения которого является его информационно-аналитический регламент.

Проведенные на этапе проектирования расчеты и прогнозы показателей надежности работы МХП, а также разработанные автоматизированные системы должны обеспечить на этапе эксплуатации заданный уровень надежности ПиА при выполнении требований проектно-конструкторской документации и квалифицированном обслуживании оборудования и системы в целом.

Поэтому одним из основных факторов обеспечения надежности работы ТО на этапе эксплуатации является контроль за состоянием оборудования и своевременное проведение планово-предупредительных ремонтов. Данная задача решается совместно с задачей оптимального календарного планирования выпуска продукции, которая заключается в поиске расписания выпуска продукции и функционирования ТО при которых критерий оптимальности решения задачи, "условная" прибыль, достигает максимума, выполняются плановые задания по выпуску заданного ассортимента продукции в установленных объемах за отведенное время и графики проведения планово-предупредительных ремонтов, а также ограничения на наличие сырья, хранение готового продукта и число ремонтных рабочих. Решение данной задачи актуально в масштабах совокупности ТС цеха. Исходными данными для решения данной задачи являются информация, которая содержится в ИАР МХП, а также плановые задания по выпуску продукции в течение установленного планируемого периода.

Кроме того, наличие возмущений в виде непредвиденных выходов из строя ТО требует постоянного контроля за ходом технологического процесса и работой оборудования. Данные, полученные от автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и обработанные системой технической диагностики состояния функционирования ТО, дают возможность локализовать потенциально опасный дефект на ранних стадиях, оценить степень и динамику его развития и выбрать оптимальную стратегию проведения ремонта. Необходимо учитывать, что в связи с нехваткой информации и неполной ее достоверностью принятие решения осуществляется в условиях неопределенности.

Таким образом, построение календарного плана выпуска продукции с учетом проведения ремонтных работ осуществляется на базе автоматизированной системы календарного планирования работы МХП. Исходные данные о структуре МХП, маршрутах выпуска продуктов, длительностях операций и т.п. поступают из ИАР МХП. Оперативное состояние производства оценивается на основе данных, полученных от АСУ ТП, систем оперативного управления предприятием и технической диагностики состояния ТО.

Решение проблемы влияния человеческого фактора на надежность ПиА МХП на этапе эксплуатации предлагается решать путем организации непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля и повышения их квалификации в процессе трудовой деятельности. Создание информационно-образовательной среды, объединяющей потенциал ведущих университетов и научно-исследовательских институтов, современные учебно-методические разработки, уникальное лабораторное оборудование и ресурсы промышленных предприятий позволят значительно повысить качество подготовки специалистов и преодолеть оторванность высшей школы от реальных промышленных производств. Проектирование информационно-образовательной среды должно опираться на современные информационные и коммуникационные технологии, активное использование возможностей сети Интернет.

Использование автоматизированной системы тренинга персонала МХП, входящей в состав информационного обеспечения проекта МХП, позволит организовать на высоком уровне подготовку, тренинг и тестирование обслуживающего персонала. Кроме того, применение виртуальных тренажеров при подготовке студентов инженерного профиля в рамках дисциплин специализации и производственной практики поможет обеспечить получение практических навыков работы с промышленными техническими системами, что особенно актуально для пожаро-, взрывоопасных, токсичных производств.

Рассмотрим более подробно решение задач прогнозирования и обеспечения надежности функционирования ПиА МХП с использованием современных информационных технологий.

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ОТКАЗОВ МХП

В настоящее время успешное существование и развитие промышленных предприятий невозможно без активного проведения инновационных процессов. Любой проект сегодня невозможен без детального прогнозирования поведения всех его составляющих объектов и процессов на всех этапах жизненного цикла. Только в этом случае можно с определенной степенью достоверности гарантировать возврат вложенных средств и достижение определенной прибыли от проекта.

Применительно к определению эффективности инноваций наиболее важным являются показатели надежности ТС, например, такие, как работоспособность. Работоспособность – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технологической и (или) конструкторской документации. Для МХП под заданными функциями в большинстве случаев принимают способность выпускать продукт требуемого качества с установленной производительностью.

За рубежом результаты исследования работоспособности производства – один из наиболее значимых факторов при получении предприятием инвестиций. К примеру, в Японии при работоспособности менее 70% проект даже не рассматривается инвестиционными организациями.

Теория надежности не только дает возможность рассчитать (либо спрогнозировать) поведение системы в течение жизненного цикла, но и позволяет определить причину низких значений показателей надежности и дать рекомендации по их повышению. Также надежность играет роль "обратной связи" от пользователя к проектировщику.

Во многих отраслях промышленности надежность является одним из основных показателей качества производства и получаемой продукции. Так в космической, энергетической, радиотехнической и других производственных отраслях существуют свои наработки в области теории надежности, но, как показывает практика, перенос их на

производства химической промышленности в большинстве случаев невозможен.

Правильный выбор структуры МХП и оптимальный подбор оборудования позволит минимизировать затраты на покупку оборудования, проведение ремонтов и гарантировать работоспособность схемы в течение необходимого промежутка времени при условии своевременного проведения ремонтных работ, диагностики состояния функционирования и квалифицированном управлении и обслуживании.

Представим МХП (Ψ) как совокупность упорядоченной последовательности технологических процессов производства (J_{Ψ}) одного или нескольких продуктов и множества аппаратурных стадий (A_{Ψ}), объединенных системой материальных (M), энергетических (E) и информационных (I) связей, необходимых и достаточных для производства ассортимента выпускаемой продукции (P_{Ψ}) под управлением человеческого фактора (HF)

$$\Psi = \{J_{\Psi}, A_{\Psi}, P_{\Psi}, M, E, I, HF\}.$$

Множество технологических процессов, реализуемых на МХП, является упорядоченным и образовано как объединение упорядоченных множеств технологических процессов выпуска каждого продукта – $J_{\Psi} = J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_p \cup \dots \cup J_P$. Последовательность выпуска продуктов может меняться в зависимости от конкретного задания на производство в течение определенного планируемого периода.

Технология выпуска отдельного продукта J_p на МХП может быть представлена в виде графа $G_{J_p}(V, D)$, где V – множество вершин, соответствующих подмножеству аппаратурных стадий A_{Ψ} , задействованных в выпуске данного продукта; D – множество дуг, определяющих маршрут движения продукта. При этом каждой вершине графа $G_{J_p}(V, D)$ ставится в соответствие таблица длительностей технологических операций $O_{J_p}^v$, проводимых при реализации технологического процесса J_p . Дуга графа $G_{J_p}(V, D)$ определяет маршрут, вид транспорта и время, необходимое для передачи продукта с одной стадии на другую.

Технологические операции $O_{J_p}^v$, которые могут быть реализованы последовательно или совместно в одном или нескольких параллельно работающих аппаратах, представляют собой аппаратурную стадию МХП.

Важным этапом при проектировании МХП является расчет оборудования, который предполагает определение характеризующих размеров (рабочий объем или поверхность) и числа аппаратов стадий, а также характеристик ее функционирования, позволяющих организовать выпуск продукции в заданном объеме и ассортименте за отведенное время. Несмотря на то, что влияние показателей надежности на работу МХП и обеспечение выпуска продукции велико, в существующих постановках задач проектирования многоассортиментных химических производств их значения не учитываются.

На стадии проектирования необходимо закладывать уровень надежности аппаратов и системы в целом, выбирать и реализовывать в конструкторской документации основные способы обеспечения надежности как за счет схемно-конструктивных решений, так и за счет выбора оптимальных методов организации эксплуатации, диагностики состояния функционирования оборудования, разработки информационных систем обучения и тренинга обслуживающего персонала. Основными задачами прогнозирования надежности на стадии проектирования МХП являются задачи выбора вариантов, обладающих заданной надежностью, при сравнительном анализе эффективности различных способов обеспечения надежности. Определяя желаемый уровень надежности необходимо учитывать затраты на ее обеспечение при производстве и эксплуатации.

В результате решения задач проектирования исходная информация, сосредоточенная в техническом задании в виде ассортимента и плановых объемов выпуска, технологических регламентов, каталогов оборудования будет преобразована в информационно-аналитический регламент действующего МХП, который является информационной основой для решения всех задач последующих этапов жизненного цикла.

Рассмотрим прогнозирование надежности функционирования ПиА МХП на стадии проектирования. Здесь можно выделить три основных этапа:

1. Выбор и нормировка значений показателей надежности аппаратов и системы.
2. Выбор методов прогнозирования показателей надежности на стадии проектирования.
3. Выбор критерия, включающего показатели надежности, который должен достигать оптимального значения при решении задачи проектирования МХП.

Прежде всего, определим надежность как свойство объекта сохранять во времени значения всех параметров характеризующих способность выполнять требуемые функции [11]. Надежность

представляет собой комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации проявляется через такие качественные показатели, как:

- безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки;

- долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния;

- ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания;

- сохраняемость – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение и после хранения и транспортировки.

Для исследования надежности функционирования ПиА МХП необходимо ввести понятие основных состояний схемы:

- отказ – нарушение работоспособного состояния;

- работоспособное состояние – состояние, при котором объект способен выполнять заданные функции с параметрами, установленными технической документацией;

- состояние снижения производительности – состояние, при котором объект функционирует, но значение его мощности или производительности ниже номинального;

- предельное состояние – состояние объекта, при достижении которого его дальнейшее применение по назначению недопустимо.

Основными количественными показателями надежности функционирования МХП и входящего в его состав оборудования, которые необходимо задавать в технической документации на проектирование, являются:

- вероятность безотказной работы системы (аппарата) $P(t)$ в течение заданного интервала наработки t

$$P(t) = 1 - F(t), \quad (2.1)$$

где $F(t)$ – функция распределения наработки схемы до отказа;

- средняя наработка системы на отказ T_{cp} – отношение наработки системы к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки

$$T_{cp} \approx \frac{t}{1 - P(t)}; \quad (2.2)$$

– средняя наработка до отказа для отдельных аппаратов МХП – T'_{cp} , т.е. математическое ожидание наработки аппарата до первого отказа;

– параметр потока отказов МХП ω_{cp} – отношение среднего числа отказов схемы за произвольно малую ее наработку к значению этой наработки

$$\omega_{cp} \approx \frac{1}{T'_{cp}} \approx \frac{1 - P(t)}{t}; \quad (2.3)$$

– интенсивность отказов отдельных аппаратов $\lambda(t)$ – условная плотность вероятности возникновения отказа аппарата, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

На основании выбранных показателей надежности функционирования предложим следующую методику прогнозирования надежности функционирования при проектировании МХП (рис. 2.1).

1. На первом этапе строится математическая модель функционирования МХП с учетом действующих факторов:

$$\Phi\beta(t) = \alpha(t), \quad (2.4)$$

где Φ – некоторый оператор, соответствующий разработанной математической модели функционирования МХП; $\beta(t)$ – вектор выходных параметров, описывающих состояния функционирования МХП; $\alpha(t)$ – вектор входных параметров.

Для описания совокупности параметров, входящих в оператор Φ , введем вектор параметров МХП – $I(t)$. Для количественной оценки воздействия условий, в которых работает система, и несовершенства технологии изготовления, а также необратимых физико-химических явлений, происходящих в материалах аппаратов, можно воспользоваться заданием вероятностных характеристик соответственно векторов $\alpha(t)$ и $I(t)$, компоненты которых рассматриваются как случайные величины и функции. В результате решения задачи по $\alpha(t)$, $I(t)$ и уравнению (2.4) определяются вероятностные характеристики $\beta(t)$.

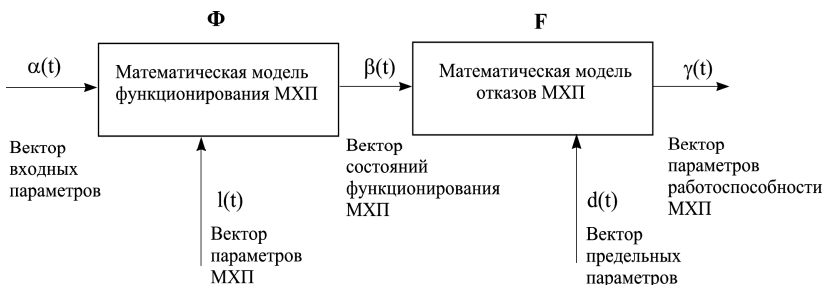


Рис. 2.1. Прогнозирование надежности функционирования проектируемого МХП

2. Для характеристики работоспособности МХП вводится вектор параметров работоспособности $\gamma(t)$, который определяется в соответствии с возможными математическими моделями отказов:

$$\gamma(t) = F\beta(t), \quad (2.5)$$

где F – некоторый оператор, соответствующий разработанной математической модели отказов МХП.

Введя пространство (область) работоспособных состояний функционирования МХП – Ω , определяемое техническим заданием на проектирование, получим:

- $\gamma \in \Omega$ – работоспособное состояние МХП;
- $\gamma \notin \Omega$ – неработоспособное состояние МХП;
- $\gamma \in \Gamma$ – предельное состояние,

где Γ – граница пространства (области).

Для характеристики способности МХП сопротивляться действующим внешним нагрузкам вводится вектор предельных параметров $d(t)$, значения которого могут входить в оператор F .

3. На третьем этапе определяются показатели надежности функционирования МХП, такие, как, например, вероятность безотказной работы системы. Она определяется как вероятность случайного события нахождения вектора $\gamma(t)$ в течение заданного промежутка времени $[0, t]$ в области Ω :

$$P(t/h_0) = P[\gamma(\tau) \in \Omega, 0 \leq \tau \leq t], \quad (2.6)$$

где $P(t/h_0)$ – вероятность безотказной работы МХП.

Важным этапом при исследовании сложных ТС на стадии проектирования, а также при повышении эффективности эксплуатируемых ТС, является разработка и построение

математических моделей функционирования и отказов ТС. Учитывая особенности рассматриваемых МХП предлагается проводить построение **математической модели функционирования** с учетом возможных изменений состояний работоспособности, обусловленных отказами и восстановлением составных частей системы.

Создание таких моделей предполагает введение множества и построение графа состояний функционирования системы.

Для сложной ТС введение переменной h состояния функционирования и множества H ее значений предполагает рассмотрение следующих этапов:

- систему необходимо разбить на элементы и определить их множество состояний работоспособности (МСР);
- необходимо построить надежностную структурную схему системы и ввести для нее МСР;
- для характеристики нарушения правил и условий эксплуатации системы, ошибок обслуживающего персонала, недопустимых изменений параметров окружающей среды задать множество воздействий (МВ);
- на МСР и МВ вводят множество состояний функционирования (МСФ) ТС – H .

При реализации данных этапов необходимо в полной мере использовать всю информацию о системе и условиях ее эксплуатации. Если число элементов множества H велико, то исследование проводится в наиболее важных для ее работы состояниях – критические состояния (функционирование в которых может привести к значительному ущербу), а также в наиболее вероятных состояниях для процесса эксплуатации.

Под элементом ТС следует понимать ее часть, которая для решения рассматриваемой задачи не требует дальнейшей детализации [12 – 14]. На этапе проектирования МХП в качестве таких элементов могут быть выбраны аппараты всех стадий системы. В процессе эксплуатации вследствие различного рода причин (коррозия, износ, влияние внешних воздействий и т.д.) элемент может частично или полностью потерять свою работоспособность, что приведет к невыполнению им соответствующих ему функций, а следовательно к снижению эффективности работы системы в целом, и может явиться причиной ее остановки или аварии. Обозначим МСР l -го элемента схемы через R_l . Если l -й элемент простейший (два состояния работоспособности – нормальное функционирование r_0 и полностью нерабочее r_1), то

$$R_l = \{r_0', r_1'\}, \quad |R_l| = 2,$$

где $|R_l|$ – мощность множества R_l .

В общем случае МСР элемента запишем:

$$R_f = \{r_0^f, r_1^f, \dots, r_k^f\}, \quad |R_f| = k+1,$$

где r_f^l , $f = \overline{1, k}$ – состояния l -го элемента в результате нарушения f -го вида.

На основе структуры схемы, множеств R_f элементов и признаков различия состояний работоспособности строится множество состояний работоспособности W . Элементами множества W являются значения переменной w состояния работоспособности системы. При наличии различных элементов в системе МСР образуется как декартово произведение множеств R_f , $f = \overline{1, n}$, т.е.

$$W = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n, \quad |W| = \prod_{f=1}^n |R_f|, \quad (2.7)$$

где n – число элементов.

Для учета изменения условий эксплуатации МХП, ошибок обслуживающего персонала, различных воздействий на систему извне следует ввести множество воздействий V . Оно представляет собой множество значений переменной v , которые изменяются под влиянием процессов, происходящих за пределами системы.

На основе множеств W и V строят множество состояний функционирования H , представляющее собой возможные значения переменной h . По аналогии с W МСФ системы можно ввести как декартово произведение:

$$H = W \times V. \quad (2.8)$$

На основе множества H и структуры технологических процессов, реализуемых МХП, сведений о надежности функционирования элементов и организации ремонта строится **математическая модель отказов** системы, представляемая в виде графа изменения состояний ее функционирования

$$G(H, D),$$

где МСФ H – множество вершин; D – множество дуг (ориентированных ребер) графа.

Дуги графа отражают возможность непосредственного перехода из одного состояния системы в другое за настолько малый промежуток времени, что вероятностью возникновения двух изменений состояний за это время можно пренебречь. Переход из состояния h_i в h_j обозначим дугой d_{ij} .

При построении графа изменения состояний функционирования МХП основными показателями являются:

- наработка определенного порядкового номера продукта;
- совокупность аппаратов, используемых при производстве данного продукта;
- технологические остановки МХП;
- неисправности одного или нескольких аппаратов, которые не ведут к прекращению функционирования МХП;
- неисправности аппаратов, приводящие к снижению производительности схемы, но не влекущие остановку производства;
- неисправности аппаратов, приводящие к прекращению функционирования МХП;
- значения показателя обслуживания МХП.

Необходимо отметить, что каждой дуге d_{ij} графа $G(H, D)$ ставится в соответствие интенсивность перехода схемы из i -го состояния в j -е. Данные значения определяются интенсивностями отказов оборудования λ_j , входящего в состав МХП, а также интенсивностью восстановления (ремонта) μ_j .

В каждом из возможных состояний функционирования система будет находиться с определенной вероятностью $P(h_i, t)$, значение которой будет изменяться в процессе работы системы. Для характеристики вероятностного процесса необходимо задаться типом процесса. Существуют различные типы вероятностных процессов. Наиболее подходящим для описания процесса функционирования МХП является марковский процесс: для каждого момента времени вероятность любого состояния объекта в будущем зависит только от состояния объекта в настоящий момент времени и не зависит от того, каким образом объект пришел в это состояние.

Пусть объект исследования – МХП – может находиться в некоторых состояниях, число которых конечно (n). Номера состояний: $0, 1, 2, \dots, n$. Из i -го состояния в j -е схема переходит с постоянной интенсивностью λ_{ij} , обратно – с постоянной интенсивностью μ_{ij} . Для определения изменения вероятностей каждого из состояний во времени предлагается использовать систему дифференциальных уравнений, формируемую по виду графа изменения состояний функционирования, используя следующие правила:

1. Для каждого из возможных состояний объекта записывается уравнение, в левой части которого $\frac{dP(h_i, t)}{dt}$, а справа – столько слагаемых, сколько дуг графа соприкасается с данным состоянием.

2. Если дуга направлена в данное состояние, то перед слагаемым ставится плюс, если дуга направлена из состояния, то минус.

3. Каждое из слагаемых будет равно произведению интенсивности перехода из данного состояния (либо в данное состояние) на вероятность состояния, из которого выходит дуга.

Для описания графа в математической модели отказов используются матрицы смежности и инцидентности. Матрица смежности представляет собой квадратную матрицу $Z(n, n)$, где n – количество состояний функционирования системы или количество вершин графа $G(H, D)$. Элемент матрицы смежности $z_{i,j}$ принимает значение интенсивности перехода из состояния i в состояние j или нуля, если дуга данного перехода отсутствует у графа.

Матрица инцидентности представляет собой прямоугольную матрицу $Y(m, n)$, где m – количество ребер графа $G(H, D)$. Элемент матрицы $y_{i,j}$ равен 1, если i -я дуга входит в j -ю вершину; -1 , если дуга выходит; 0, если неинцидентна.

В общем случае наработку продукта МХП можно представить в виде прохождения определенной последовательности стадий, каждая из которых представляет собой либо один аппарат, либо несколько аппаратов, соединенных параллельно.

Помимо определения вероятностных характеристик надежности функционирования сложных систем существуют другие подходы прогнозирования надежности. Так в работах [103 – 105] предлагается использовать математический аппарат двузначной и непрерывной логики для моделирования надежности системы, опираясь при этом на первичные величины, относящиеся к надежности системы и ее элементов (последовательные моменты отказов и восстановлений элементов и системы в целом). Использование данного аппарата является затруднительным для МХП в связи с отсутствием необходимой информации на стадии проектирования.

Таким образом, продемонстрированные в данном разделе подходы к разработке математических моделей функционирования и отказов МХП, а также их адаптацию для многоассортиментных химических производств предлагается использовать на стадии проектирования МХП с целью прогнозирования показателей надежности и обеспечения безаварийности работы.

2.2. КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МХП

В наиболее распространенных постановках задач проектирования МХП в качестве критерия оптимальности принимают капитальные затраты на создание системы, которые должны достигать минимума. Главным недостатком этого критерия является отсутствие учета затрат, возникающих на последующем этапе эксплуатации производства. Кроме того, в капитальных затратах очень трудно учесть изменение показателей надежности функционирования МХП. Для достижения этой цели в работе [15] предлагается использовать затраты в процессе разработки и производства изделия на обеспечение достигнутого уровня безотказности функционирования и ремонтпригодности. Для разрабатываемых МХП применение этого подхода затруднительно вследствие отсутствия данных для расчета критерия.

В данной работе в качестве критерия оптимальности решения задачи, учитывающего изменение значений показателей надежности функционирования на этапе эксплуатации, используется "условная" прибыль, которая должна достигать максимума. Сумма прибыли определяется разностью суммы, полученной от реализации продукции и затратами на ее производство.

Характерной чертой МХП является тот факт, что появление отказов отдельных аппаратов приводит не к полному выходу из строя системы, а лишь к некоторому ухудшению качества функционирования – снижению эффективности. Многоассортиментные химические производства относятся к классу систем длительного действия, так как они способны решать некоторую поставленную задачу на протяжении времени t_0 . Эффективность функционирования системы существенно зависит от совокупности состояний и от процесса их изменения во время решения производственных задач. Совокупность состояний элементов ТС однозначно определяет состояние системы в целом.

В течение функционирования МХП подвержено изменению своих состояний вследствие изменения состояний входящих в ее состав аппаратов (отказ аппаратов, их восстановление). Каждая реализация процесса перехода системы длительного действия из состояния в состояние может быть охарактеризована вполне определенным показателем эффективности функционирования. Этот условный показатель количественно характеризует качество выполнения системой своих функций при условии, что ТС во время решения поставленной перед ней задачи имела именно данную реализацию процесса перехода из одного состояния в другое.

В общем случае показатель эффективности функционирования $E(0, t_0)$ сложной системы на рассматриваемом отрезке времени $[0, t_0]$ представляет собой некоторый функционал ε от траектории вектора фазовых координат z , т.е.

$$E(0, t_0) = \varepsilon(z(\cdot)). \quad (2.15)$$

При этом траектория $z(\cdot) = (z(t), t \in [0, t_0])$ определяется начальными значениями вектора $z(0) = z_0$, переменной $h(0) = h_0$ состояния функционирования и входным воздействием $x(\cdot) = (x(t), t \in [0, t_0])$.

Для МХП показатель эффективности может быть рассчитан по следующей формуле:

$$E_i(t_0) = \sum_{k=0}^K e_i(h_k) \left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} P(h_k, t) dt \right), \quad (2.16)$$

где $h_k \in H_i$ – состояние функционирования системы при выпуске i -го продукта; K – число состояний функционирования системы при выпуске i -го продукта; $P(h_k, t)$ – изменение вероятности нахождения системы в h_k -м состоянии; $e_i(h_k)$ – эффективность функционирования ТС в h_k -м состоянии; H_i – множество состояний функционирования при производстве i -го продукта.

В качестве эффективности функционирования МХП в h_k -м состоянии можно брать отношение стоимости продукции, полученной при работе системы в данном состоянии с учетом возможных штрафных санкций, накладываемых на предприятие за недовыпуск продукции, произошедший вследствие остановки системы или снижения ее производительности, к стоимости номинального объема выпуска продукции. В общем виде это можно записать следующим образом:

$$e_i(h_k) = \frac{q_i(h_k) C_i^{\text{прод}} - (q_i^{\text{ном}} - q_i(h_k)) C_i^{\text{штр}}}{q_i^{\text{ном}} C_i^{\text{прод}}}, \quad (2.17)$$

где $q_i(h_k)$ – объем выпуска продукта в h_k -м состоянии в единицу времени; $q_i^{\text{ном}}$ – номинальный объем выпуска i -го продукта в единицу времени; $C_i^{\text{прод}}$ – стоимость единицы i -го продукта; $C_i^{\text{штр}}$ – штраф, накладываемый за недовыработку единицы i -го продукта.

Значения данных зависимостей для эффективности функционирования МХП будут различны для каждого продукта, нарабатываемого системой. Поэтому при проектировании МХП необходимо использовать суммарную нормированную эффективность по всем продуктам. Тогда сумма средств, полученных от реализации продукции, которая была выработана за отрезок времени $[0, t_0]$, рассчитывается следующим образом:

$$C = \sum_{i=1}^I \tilde{E}_i(t_0) Q_i C_i^{\text{прод}}, \quad (2.18)$$

где Q_i – номинальный объем выпуска i -го продукта; I – количество продуктов, нарабатываемых МХП; $\tilde{E}_i(t_0)$ – суммарная нормированная эффективность функционирования ТС при выпуске i -го продукта.

Затраты на производство продукции складываются из капитальных затрат, соотношенных к расчетному отрезку времени, эксплуатационных и затрат на сырье.

Капитальные затраты на создание МХП предлагается рассчитывать как функцию размера аппаратов основных и промежуточных стадий системы:

$$Z^{\text{КАП}} = \sum_{j=1}^J L_j \alpha_j V_j^{\beta_j}, \quad (2.19)$$

где V_j – рабочий объем или поверхность аппаратов j -й стадии; L_j – число параллельных аппаратов на стадии; α_j, β_j – коэффициенты, определяемые на основе преискуранта цен на оборудование.

Затраты на сырье при выпуске i -го продукта определяются соотношением:

$$Z^C = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M (R_{im} C_m^C) Q_i, \quad (2.20)$$

где R_{im} – расходная норма m -го компонента сырья на 1 т i -го продукта; C_m^C – цена единицы сырья m -го вида; Q_i – количество выпущенного i -го продукта.

В состав эксплуатационных затрат на производство продукции входят затраты на энергетику, включая пар, воду речную, воду оборотную, лед, азот, сжатый воздух, электроэнергию; на основную и дополнительную заработную плату обслуживающего персонала; расходы на содержание и эксплуатацию оборудования.

Эксплуатационные затраты МХП, включающие выше указанные статьи расходов, определяются следующим образом:

$$Z^{\exists} = \sum_{i=1}^I \left(\sum_{j=1}^J z_{ij}^{\exists} L_{ij} + \sum_{j=J_{\text{II}}}^{J_{\text{III}}} z_{ij}^{\exists} L_{j\text{II}} \right), \quad (2.21)$$

где z_{ij}^{\exists} – затраты на эксплуатацию аппаратов j -й стадии при выпуске i -го продукта (суммирование ведется по основным и промежуточным стадиям).

$$z_{ij}^{\exists} = z_{ij}^{\exists\text{Н}} + z_{ij}^{\exists\text{С}} + z_{ij}^{\exists\text{Пл}}, \quad (2.22)$$

где $z_{ij}^{\exists\text{Н}}$, $z_{ij}^{\exists\text{С}}$, $z_{ij}^{\exists\text{Пл}}$ – затраты на энергетику, содержание и эксплуатацию оборудования, заработную плату обслуживающего персонала.

При расчете "условной" прибыли не учитываются затраты, которые при изменении варьируемых параметров остаются постоянными. Принимается, что постоянными затратами являются цеховые и общезаводские расходы.

С учетом вышеизложенного "условная" прибыль определяется:

$$P = C - \rho(t_0) Z^{\text{КАП}} - Z^{\text{С}} - Z^{\exists}, \quad (2.23)$$

где $\rho(t_0)$ – нормативный коэффициент окупаемости.

Таким образом, представленный критерий – "условная" прибыль – позволяет провести оптимизацию аппаратурного оформления МХП при обеспечении выпуска заданного объема продукции с учетом надежности функционирования оборудования.

2.3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МХП НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Задача проектирования МХП основывается на выборе аппаратурного оформления системы, включающего определение характеристик режима работы системы в целом, указателей способа обработки партий продуктов основными аппаратами ее стадий, а также способа взаимодействия аппаратов различных стадий [1, 9, 16 – 36]. Большинство стадий синтеза продукции МХП включают сложные физико-химические превращения (химические реакции, растворение, суспензирование и т.д.), которые чаще всего реализуются в емкостных аппаратах периодического действия. Однако МХП редко бывают чисто периодическими, некоторые аппаратурные стадии (обычно не

связанные с химическими превращениями – стадии фильтрации, сушки) могут оснащаться основными аппаратами непрерывного действия, работающими с остановками в полунепрерывном режиме.

На основании предложенных выше математических моделей функционирования и отказов МХП сформулируем постановку задачи проектирования на множестве состояний функционирования. Для этого первоначально введем следующие допущения:

1. Аппаратурное оформление проектируемого МХП предназначено для выпуска определенного ассортимента продукции заданного объема.

2. Выпуск продукции заданного ассортимента осуществляется в виде конечного числа отдельных партий.

3. Маршруты обработки партий каждого продукта фиксированы.

4. На стадиях МХП установлены аппараты периодического и непрерывного действия.

5. Для увеличения производительности, уменьшения простоя и обеспечения согласованности режимов работы оборудования на стадиях МХП могут быть установлены дополнительные аппараты, имеющие одинаковые конструктивные параметры, а также промежуточные емкости, являющиеся аппаратами периодического действия.

6. Продолжительности физико-химических превращений не зависят от размера партии продукта и являются неизменными.

7. Обслуживание схемы строго ограниченное, т.е. показатель обслуживания равен единице.

8. Время загрузки и разгрузки разделительных емкостей значительно меньше времени пребывания продукта в них.

При решении задачи проектирования МХП на множестве состояний функционирования с учетом показателей надежности, необходимо введение следующих ограничений [9]:

1. Ограничения на рабочие размеры аппаратов стадий системы:

$$Y_j = \begin{cases} V_j \in [V_{j*}, V_j^*] \cap VS_j, & j \in J_b; \\ X_j \in [X_{j*}, X_j^*] \cap VS_j, & j \in J_s; \end{cases} \quad (2.25)$$

$$V_{j*} = \max_{i \in E_j} \left\{ u_{ij} \frac{V_{ij} W_i}{\Phi_{j*}} \right\}, \quad j \in J_b \cup J_d; \quad (2.26)$$

$$V_j^* = \min_{i \in E_j} \left\{ u_{ij} \frac{V_{ij} W_i}{\Phi_{j*}} \right\}, \quad j \in J_b; \quad (2.27)$$

$$X_{j^*} = F_{j^*} = \max_{i \in E_j} \left\{ u_{ij} \frac{V_{ij} W_i}{\delta_j} \right\}, \quad j \in J_f; \quad (2.28)$$

$$X_{j^*} = \max_{i \in E_j} \left\{ \frac{g_{ij} W_i}{a_{ij} \tau_{ij}} \right\}, \quad j \in J_s / J_f; \quad (2.29)$$

$$X_j^* = \max \{ X_j \mid X_j \in VS_j \}, \quad j \in J_s, \quad (2.30)$$

где VS_j – множество основных размеров аппаратов действующего производства, пригодных для установки на стадии j ; V_{j^*} , V_j^* – нижняя и верхняя границы области допустимых значений рабочего объема аппарата стадии $j \in J_b \cup J_d$; X_{j^*} , X_j^* – нижние и верхняя границы области допустимых значений основного размера аппарата стадии $j \in J_s$; u_j – коэффициент изменения размера партии продукта на стадии j МХП; φ_j^* , φ_{j^*} – верхняя и нижняя границы области допустимых значений степени заполнения аппаратов стадии $j \in J_b \cup J_d$; w_i – размер партии каждого продукта (масса партии, прошедшей все стадии обработки); g_{ij} – основной материальный индекс стадии, т.е. результат пересчета материального баланса процесса синтеза продукта на 1 т m_j (кг/т) или v_j (м³/т); δ_j – толщина слоя получаемого осадка; a_{ij} – удельная производительность по выпускаемому продукту; τ_{ij} – длительность обработки партии продуктов на стадии j МХП; i – номер выпускаемого продукта из ассортимента I , j – номер стадии МХП; J_b – множество номеров стадий, где основными аппаратами являются емкости с перемешивающими устройствами и без них; J_s – множество номеров стадий, где основными аппаратами являются фильтры и сушилки; $J_f \in J_s$ – множество номеров стадий, где основными аппаратами являются рамные или камерные фильтр-прессы, цель работы которых – получение осадка; $J_d \in J_s$ – множество номеров стадий, где основными аппаратами являются сушилки периодического действия (роторные вакуумные); E_j , $j = 1, \dots, J$ – множество номеров продуктов, партии которых обрабатываются в аппаратах стадии j МХП.

2. Ограничение на сумму продолжительностей выпуска продуктов:

$$\sum_{i=1}^I T_i \leq T; \quad (2.31)$$

$$Q_i \tilde{E}_i(t_0) \geq Q_i; \quad (2.32)$$

$$T_i = \frac{Q_i T_{Li}}{w_i}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (2.33)$$

$$T_{Li} = \max_{j=1, \dots, J} \{t_{ij}\}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (2.34)$$

$$t_{ij} = \frac{R_{ij}}{s_{ij}} \left(\frac{\tau_{ij}}{r_{ij}} + \max_{\substack{k < j, \\ R_k > R_j}} \left\{ \left(\frac{1}{R_{ij}} - \frac{1}{R_{i, j_i'}} \right) t_{ik} \right\} + \max_{\substack{k > j, \\ R_k > R_j}} \left\{ \left(\frac{1}{R_{ij}} - \frac{1}{R_{i, j_i''}} \right) t_{ik} \right\} \right),$$

$$j = 1, \dots, J, \quad i \in E_j; \quad (2.35)$$

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \in J_b \cup J_f \text{ и } p_{ij} = 1; \\ L_j, & \text{если } j \in J_s / J_f \text{ или } p_{ij} = 0; \end{cases} \quad t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \in J_b \cup J_f; \\ R_{ij}, & \text{если } j \in J_s / J_f, \end{cases}$$

где Q_i – заданный объем выпуска продукта; T – период времени, отведенный на выпуск заданного ассортимента продукции (T_i – для продукта i); Q_i – скорректированный объем выпуска i -го продукта с учетом надежности функционирования МХП; T_{Li} – время цикла выпуска продукции; L_j – количество аппаратов на стадии; R_j – показатель изменения размера партии на стадии, ($R_j = 1$ – размер партии не меняется, $R_j = k$, $k > 1$ – партия делится на k равных порций, которые обрабатываются последовательно, $R_j = 1/k$, $k > 1$ – происходит объединение и совместная обработка k целых партий); p_j – указатель характера обработки партий продукта ($p_j = 0$ – каждый аппарат стадии j принимает и обрабатывает партии продукта целиком и аппараты работают со сдвигом по времени, $p_j = 1$ – в аппаратах стадии синхронно обрабатываются равные доли партии $-1/L_j$ часть в каждом); τ_{ij}^0 – заданные (регламентные) длительности обработки партии продукта на стадиях i ; j_i' , j_i'' – номера стадий обработки партий i -го продукта, предшествующей и следующей за стадией j .

3. Ограничения на изменение характеристик режима обработки партий продуктов на стадиях МХП:

$$L_{*ij} = \frac{t_{ij}}{T_{ii}} [p_{ij} + (1 - p_{ij}) L_j], \quad j = 1, \dots, J, \quad i \in E_j; \quad (2.36)$$

$$u_{ij} = \frac{p_{ij} + (1 - p_{ij}) L_j}{n_j} \frac{1}{R_{ij}}, \quad j = 1, \dots, J, \quad i \in E_j; \quad (2.37)$$

$$\tau_{ij} = \frac{m_{ij} \delta_j}{v_{ij} a_{ij}}, \quad j \in J_k, \quad i \in E_j; \quad (2.38)$$

$$\tau_{ij} = \frac{g_{ij} W_i}{a_{ij} X_j}, \quad j \in J_s / J_f, \quad i \in E_j; \quad (2.39)$$

$$\tau_{il} = \tau_{il}^0 + q_{il} \tau_{ij} h_{ij}, \quad j \in J_s; \quad l = j'_i, j''_i; \quad i \in E_j, \quad (2.40)$$

где h_j – доля основных операций от общего времени занятости аппаратов стадии фильтрации или сушки обработкой одной партии; q_{jl} – показатели необходимости коррекции длительностей обработки партии продукта на стадиях l с учетом времени совместной работы их основных аппаратов с аппаратами стадии j (фильтрации или сушки), ($q_{jl} = 1$ – коррекция необходима, $q_{jl} = 0$ – коррекция не нужна (вся партия суспензии выгружается из аппаратов стадии $j - 1$ до начала операции фильтрации или вся партия пасты загружается в аппараты стадии $j + 1$ после окончания ее промывки и осушки).

4. Ограничение на вероятность безотказной работы системы. Вероятность безотказной работы системы должна быть не меньше заданной:

$$P(h_0, t) \geq P^{3\text{АДАН}}(h_0, t). \quad (2.41)$$

Определение вероятностей состояний функционирования МХП и ее эффективности (2.16, 2.17), осуществляется в результате решения системы дифференциальных уравнений для расчета изменения вероятностей состояний функционирования ТС h_k и вероятности ее безотказной работы.

В общем виде система дифференциальных уравнений запишется следующим образом:

$$\frac{dP(h_k, t)}{dt} = f(P(h, t), \lambda, \mu), \quad k = \overline{0, K}. \quad (2.42)$$

Рассмотрим изменение значений показателей функционирования МХП при выходе из строя оборудования. Выход из строя аппарата приводит к изменению эффективности функционирования ТС. При этом возникают различные случаи.

- Если на стадии установлен один аппарат, то его выход из строя ведет к остановке системы. При этом эффективность функционирования ТС (без учета штрафных санкций) равна нулю $e_j(h_k) = 0$.

- Если на стадии установлены два и более аппарата, каждый из которых способен принять и обработать партию продукта целиком, то выход из строя одного или нескольких аппаратов может привести к изменению времени цикла производства i -го продукта (2.33).

Тогда, если $T_{Li}^* \leq T_{Li}$, то $e_i(h_k) = 1$; если $T_{Li}^* > T_{Li}$, то $e_i(h_k) = \frac{b_i^*}{b_i}$,

где $b_i^* = \frac{\theta_j}{T_{Li}^*}$ – число партий, выпускаемых за одни сутки на МХП в

условиях проведения ремонтных работ на неисправных аппаратах; θ_j – суточный фонд работы оборудования.

• Если аппараты на стадии не способны обработать партию целиком, то $e_i(h_k) = 0$.

Таким образом, постановка задачи проектирования МХП на множестве состояний функционирования с учетом показателей надежности формулируется следующим образом.

Для заданного числа стадий МХП и способа взаимодействия их основных аппаратов при выпуске каждого продукта найти такие значения

$$V_j, X_j, L_j, T_j, p_{ij}, R_{ij},$$

при которых критерий

$$\begin{aligned} & (V_j^*, X_j^*, L_j^*, T_j^*, p_{ij}^*, R_{ij}^*) = \\ & = \arg \max_{V_j, X_j, L_j, T_j, p_{ij}, R_{ij}} P(\tilde{E}_i(t_0), Q_i, V_j, X_j, L_j, T_j, p_{ij}, R_{ij}, Z^{\text{КАП}}, Z^{\text{С}}, Z^{\text{Э}}), \\ & \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \end{aligned}$$

достигает максимума и выполняются соотношения математических моделей функционирования и отказов МХП и ограничения на:

- рабочие размеры аппаратов (2.25) – (2.30);
- сумму продолжительностей выпуска продуктов (2.31) – (2.35);
- изменение характеристик режима обработки партий продуктов на стадиях МХП (2.36) – (2.40);
- вероятность безотказной работы системы (2.41).

Алгоритм решения задачи проектирования МХП на множестве состояний функционирования включает на первом этапе проверку адекватности технического задания возможностям производства. Выбор наилучших значений варьируемых параметров осуществляется по критерию (2.23). При этом оптимизация проводится по условию минимизации затратной составляющей критерия. При проведении анализа значений показателей надежности функционирования стадий МХП выявляются наиболее "слабые" стадии. После чего осуществляется варьирование типа и числа аппаратов на данных стадиях и выбираются оптимальные значения.

Результаты расчетов проиллюстрированы на примере МХП, предназначенного для производства четырех марок красителей (ОАО "Экохимпроект", г. Тамбов). Система включает 16 стадий, основными аппаратами которых являются: емкостные аппараты с перемешивающим устройством; фильтр-прессы (две стадии) и сушилка. На основании расчета вероятности безотказной работы каждой стадии ТС был сделан вывод о наиболее "слабых" стадиях, с точки зрения показателей надежности функционирования ТО (стадия № 4, 6). Для них исследовалась возможность снижения интенсивности отказов за счет установки более надежного оборудования (но и более дорогостоящего), а также за счет резервирования уже существующего. Оценка целесообразности данных мероприятий проводилась на основании расчета "условной" прибыли (табл. 2.1). Учет показателей надежности функционирования МХП на стадии проектирования целесообразен как вследствие улучшения эксплуатационных характеристик системы и повышения стабильности работы, так и по причине повышения прибыли (6% в единицах "условной" прибыли для данной ТС).

2.1. Результаты расчета

Стадия № 6	Стадия № 4		
	один аппарат $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-3}$ 1/ч	один аппарат $\lambda = 2,4 \cdot 10^{-4}$ 1/ч	два аппарата $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-3}$ 1/ч
один аппарат $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-3}$ 1/ч	340 220	356 225	359 218
один аппарат $\lambda = 2,4 \cdot 10^{-4}$ 1/ч	353 228	369 229	372 215
два аппарата $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-3}$ 1/ч	350 227	366* 234	369 227

Примечание: верхняя строка – капитальные затраты, нижняя – "условная" прибыль.

Таким образом, задача проектирования МХП на множестве состояний функционирования, сформулированная в данном разделе, позволяет проводить выбор аппаратурного оформления системы не только удовлетворяя ограничению на вероятность безотказной работы ТС, но и осуществлять поиск оптимального решения с учетом показателя эффективности функционирования производства в случае возможных неисправностей технологического оборудования.

2.4. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МХП

В современных условиях функционирования промышленных ТС каждый случай непредвиденной остановки (авария, отказ) вызывает огромные убытки, связанные не только с тем, что происходят потери сырья и значительное время оборудование простаивает в ремонте, и поэтому имеет место недовыработка соответствующей продукции, а также и с тем, что к восстановлению привлекается значительное количество ремонтного персонала высокой квалификации. Кроме того, наличие пожаро-, взрывоопасных и токсичных сред предъявляют к МХП повышенные требования по обеспечению надежности и безопасности.

Для прогнозирования надежности ПиА МХП необходимо иметь информацию о надежности используемого оборудования, что связано со сбором и анализом статистической информации. Достаточный объем необходимой информации невозможно обеспечить, рассматривая оборудование в рамках одного производства, следовательно, необходимо создать автоматизированную систему сбора, анализа и представления информации о надежности оборудования производств рассматриваемого класса.

Автоматизированная система поддержки прогнозирования надежности функционирования ПиА МХП предназначена для накопления информации о надежности оборудования и ее анализа. Поскольку предполагаемый круг пользователей системы (предприятия химической промышленности, машиностроительные предприятия, проектные организации, научно-исследовательские институты и др.) физически удалены друг от друга, а информационная составляющая системы должна быть общей для всех, необходимо создать единую информационную базу. Необходимо осуществить возможность доступа к данным как можно большему количеству пользователей что вынуждает использовать наиболее распространенные и доступные аппаратурно-программные решения. Пользователи должны иметь различные права доступа к информационной системе, а последствия от некорректной работы не должны приводить к нарушениям работы системы и могли бы быть легко устранены.

Автоматизированная система должна быть применима для накопления произвольной информации для разного оборудования, следовательно, необходимо предусмотреть возможность ее расширения. Возможность добавления новой информации не должна влиять на структуру системы и должна происходить без приостановления работы системы.

Поскольку система должна иметь возможность автоматической обработки информации необходимо предложить пользователю интерфейс, используя который он мог бы получить любую интересующую его информацию для использования в своих приложениях. Помимо результатов пользователь должен получать информацию о методе обработки данных и достоверности полученного результата. Доступ к единой базе наиболее целесообразно осуществлять посредством сети Интернет, так как доступ к ней сегодня может получить любой желающий, а на передаваемые данные не накладываются существенных ограничений.

Автоматизированная система поддержки прогнозирования надежности функционирования ПИА МХП включает три части:

1. Серверная часть.

Состоит из базы данных ТО; приложений, производящих анализ поступающих данных; приложений, поддерживающих целостность системы; веб-интерфейса; приложений, поддерживающих обмен данными с программами пользователя.

База данных ТО позволяет вносить данные об оборудовании и его характеристиках для оценки показателей его надежности работы в различных условиях эксплуатации. В базе данных ТО могут использоваться ссылки на другие базы данных, например, базу свойств статей или характеристик среды. Концентрация большинства необходимых данных введена с целью отделить часть серверных приложений, работающих с пользователем, от внутренних, и избежать возможных ошибок при выборе данных для резервного копирования.

Резервное копирование данных выполняется тем же приложением, что и проверка целостности базы данных и должно производиться периодически. Информация о всех поступающих данных должна храниться отдельно для работы приложений, анализирующих новые данные. Для доступа к данным можно воспользоваться двумя методами: с помощью веб-интерфейса и с помощью специализированных приложений. Преимущество веб-интерфейса – абсолютная платформенезависимость: любой человек с помощью Интернет-браузера может получить доступ к нужным данным. Но этот способ имеет и ряд недостатков: невозможно сохранять в удобном формате нужную информацию на машине пользователя, невозможно подключать приложения пользователя для автоматизированной обработки данных. Создание специализированного протокола обмена данными между клиентом и сервером устраняет эти недостатки и позволяет пользователю использовать любые приложения, поддерживающие этот протокол.

2. Клиентская часть.

В задачи клиента входит обеспечение взаимодействия пользователя с сервером посредством протокола связи (предоставление данных в понятной пользователю форме, преобразование данных пользователя к требуемому виду, управление автоматизированным анализом на сервере). Само клиентское приложение является элементом общей базы данных. Постоянно взаимодействуя с центральной базой клиентское приложение создает у пользователя ощущение того, что все необходимые данные находятся непосредственно на локальной машине.

Для обеспечения взаимодействия автоматизированной системы с предприятием необходимо наличие хорошо отлаженной, универсальной системы управления производством. Так как на практике эти условия далеко не всегда достижимы, взаимодействие осуществляется посредством оператора и эксперта. От оператора требуется владеть базовыми навыками работы с компьютером, основная задача оператора – найти необходимые данные. Для обеспечения обратной связи не обойтись без эксперта – человека, решающего, какие данные об оборудовании необходимо передать в базу данных.

Таким образом, оператор и эксперт – играют промежуточную роль между системой управления производством и автоматизированной системой поддержки прогнозирования надежности функционирования ПиА МХП.

3. Протокол передачи данных.

Он представляет собой язык запросов, обеспечивающий взаимосвязь серверной и клиентской частей. Основная задача – сделать независимыми эти части, что необходимо для обеспечения целостности системы при изменении ее компонентов. Для обмена данными целесообразно сформировать набор типовых пакетов, обеспечивающих передачу данных строго определенного типа. Для обеспечения возможности расширения системы в рамках использования одного протокола необходимо ввести систему версий на пакеты.

Автоматизированная система поддержки прогнозирования надежности функционирования ПиА МХП позволяет осуществлять сбор информации о работе ТО и ТС в различных условиях эксплуатации с целью прогнозирования его показателей надежности при решении задачи проектирования МХП, а также формировать программную реализацию информационно-аналитического регламента МХП.

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ЕГО РЕМОНТА

3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Возникновение отказа технологического оборудования в большинстве случаев происходит не мгновенно. Этому предшествует изменение различных параметров, характеризующих его работу. Внезапный отказ узла ТО, имеющего потенциально опасный дефект, может повлечь за собой остановку работы всей схемы. Локализация такого дефекта без разборки узла, прогнозирование времени возникновения отказа, выбор оптимальной стратегии проведения ремонтных работ является важной задачей [48 – 51]. Для локализации потенциально опасного дефекта предлагается использовать математические модели диагностирования состояния (ММДС) оборудования.

Для оценки времени, в течение которого еще можно эксплуатировать узел с потенциально опасным дефектом, необходимо знать вероятность его безотказной работы в интервале $[t_0, t^{ff}]$, т.е. от времени появления первых симптомов отказа работы узла до времени, при котором отказ становится неизбежным. Построение функции распределения вероятности безотказной работы каждого отдельного узла затруднительно из-за недостатка статистической информации по отказам технологического оборудования. Поэтому оценку возможности отказа будем описывать нечетким множеством времени до полного отказа $\tilde{ff} = \mu_j^{ff}(t) / t$. Для каждого из типичных предотказовых состояний узла строится соответствующая функция принадлежности $\mu_j^{ff}(t)$, характеризующая степень возможности отказа в зависимости от времени, прошедшего с начала появления его первых симптомов:

$$\mu_j^{ff}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-a}{c}\right)^b}. \quad (3.1)$$

Здесь параметры a , b , c определяются в результате опроса группы экспертов.

На рисунке 3.1 изображена функция принадлежности нечеткого множества \tilde{t}^{ff} , описывающего лингвистическое понятие "время до полного отказа достаточно большое".

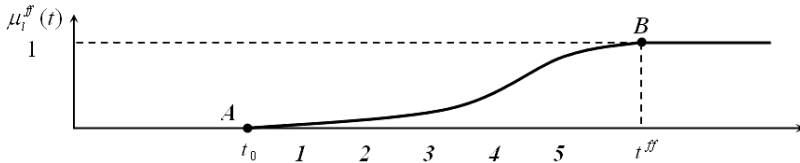


Рис. 3.1. Оценка времени отказа узла оборудования в виде нечеткого множества

Она проходит через точку A , в которой отказ еще невозможен, и через точку B , в которой он становится неизбежен и далее проходящую параллельно оси t , где вероятность отказа равна единице.

Постановка задачи технической диагностики состояния оборудования МХП формулируется следующим образом.

Необходимо найти решающее правило π , отображающее входное множество диагностических признаков X во множество потенциальных состояний диагностируемого объекта D^* :

$$R: X \xrightarrow{\pi} D^*; \quad (3.2)$$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n, \dots, X_N); \quad (3.3)$$

$$D^* = \{D_1^*, D_2^*, \dots, D_l^*, \dots, D_L^*\}; \quad (3.4)$$

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_K\}, \quad (3.5)$$

при выполнении соотношений в виде математических моделей диагностирования состояния ТО R и ограничения на минимальную вероятность реализации диагноза:

$$P_l \geq \alpha, \quad (3.6)$$

$$P_l = P(D_l | X). \quad (3.7)$$

Здесь X_1, \dots, X_N – множество диагностических признаков объекта, характеризующих состояние его функционирования для заранее определенного множества диагнозов D ; D^* – ограниченное подмножество вероятных диагнозов; P_l – вероятность l -го диагноза; l – индекс множества вероятных диагнозов; K – число предопределенных диагнозов; L – число диагнозов подмножества D^* ; α – уровень ограниченного подмножества диагнозов D^* .

В результате решения данной задачи становится возможным решение задачи выбора оптимальной стратегии ремонта химико-технологического оборудования в условиях неопределенности, позволяющей определить оптимальное время и метод устранения дефекта.

Вследствие широкого распространения в МХП емкостного технологического оборудования будем рассматривать основные аспекты построения ММДС ТО различных типов на примере отдельных узлов реактора с перемешивающим устройством. Разнообразие ММДС ТО обусловлено конструктивными и эксплуатационными особенностями диагностируемого узла, различным характером проявления нарушений его нормального функционирования и спецификой получения и представления данных об отказах [52]. Предлагается применять следующие ММДС ТО для диагностики механических отказов:

1. В виде таблиц неисправностей.
2. Четкие лингвистические.
3. Нечеткие лингвистические.
4. В виде нечетких нейросетей.

Применение ММДС ТО в виде таблиц неисправностей наиболее целесообразно в случае, когда имеется возможность описать связи между диагностическими признаками и отказами оборудования с помощью операций булевой алгебры. Примером такой модели может служить ММДС редуктора (табл. 3.1).

В ней содержится информация о проявлениях различных диагностических признаков в случае возникновения восьми различных неисправностей редуктора. В данном случае число признаков равно четырем. Значение ячейки таблицы неисправностей равно единице, если признак имеется при соответствующем отказе и равно нулю, если признак отсутствует. Различные комбинации появления диагностических признаков при отказе позволяют определить его тип или, по крайней мере, сузить пространство поиска.

3.1. ММДС редуктора в виде таблицы неисправностей

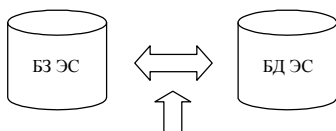
Диагнозы / признаки отказа	Изменение тока	Вибрация	Перегрев	Шум
Дефект элементов подшипника	1	1	0	1
Проворачивание подшипника	1	0	1	0
Ослабление крепления к аппарату	0	1	0	1

Дефект полумуфты	0	1	0	0
Срез шпонки крепления шестерни	1	0	0	0
Равномерный износ шестерни	0	0	0	1
Скалывание зубьев шестерни	0	1	0	1
Дефект торцевого уплотнения	0	0	1	1

Для некоторых узлов химического оборудования бывает трудно или практически невозможно построить ММДС, используя такие логические утверждения как "признак отказа имеется" или "признак отказа отсутствует". В то же время причинно-следственные связи между признаками и диагнозами могут легко формироваться в виде лингвистических правил, описывающих характер проявления отдельных признаков при том или ином нарушении работы оборудования. В этом случае для диагностики узла по разработанному дереву отказов построим ММДС ТО с использованием четких диагностических правил на примере торцевого уплотнения ТДМ (рис. 3.2). При этом тип отказа определяется с помощью обратной цепочки логического вывода экспертной системы (раздел 3.4).

ММДС ТО с использованием нечетких диагностических правил отличаются от моделей предыдущего типа тем, что в предпосылке и заключении правил находятся нечеткие лингвистические переменные. Основные цели использования "нечеткости" при построении моделей:

1. Возможность описания причинно-следственных связей между параметрами объекта и его состоянием в виде понятных человеку правил на естественном языке.



правило 1: если шум = повышен, то возможный отказ = дефект пружин или пар трения

правило 2: если возможный отказ = дефект пружин или пар трения и характер шума = металлический, то
диагноз = коррозионное или усталостное разрушение пружин

правило 3: если возможный отказ = дефект пружин или пар трения и характер шума = глухой, то
диагноз = растрескивание пар трения

правило 4: если шум = нормальный и утечка масла = большая, то
диагноз = дефект резиновых уплотнительных колец

правило 5: если шум = нормальный и утечка масла = повышена, то
диагноз = абразивный износ пар трения

правило 6: если шум = повышен и утечка масла = большая, то
диагноз = растрескивание пар трения

правило 7: если шум = повышен и утечка масла = повышена, то
диагноз = коррозионное или усталостное разрушение пружин

Рис. 3.2. ММДС торцового уплотнения ТДМ типа с использованием четких диагностических правил

2. Уменьшение требуемого числа правил благодаря механизму нечеткого вывода, реализующего так называемые "приближенные рассуждения", которые можно расценить как "лингвистическую интерполяцию".

3. Повышение качества распознавания того или иного состояния системы по сравнению с использованием того же числа четких правил, что является особо важным фактором, так как это не только ускоряет процесс логического вывода, но также и значительно упрощает процесс приобретения знаний, необходимых для диагностики объекта.

Предлагается два варианта представления ММДС ТО с использованием нечетких диагностических правил:

$$\text{ЕСЛИ } X_n \text{ ЕСТЬ } A_{ng_n}, \text{ ТО } Pb(D_k | X_n) \text{ ЕСТЬ } B_l, \quad (3.8)$$

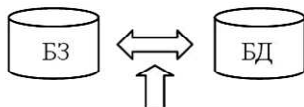
$$\text{ЕСЛИ } (x_1 \text{ ЕСТЬ } A_{g_1}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_N \text{ ЕСТЬ } A_{Ng_N}), \text{ ТО } D_k, \quad (3.9)$$

где X_n – n -й признак отказа; x_n – значение n -го признака отказа; A_{ng_n} – лингвистическая переменная типа "малый", "средний" и т.д., характеризующая признак отказа; $Pb(D_k | X_n)$ – субъективная

вероятность диагноза D_k по признаку X_n , которая может принимать значение из определенного ряда лингвистических переменных B_j .

Для построения модели, основанной на первом варианте представления знаний, введем следующие обозначения субъективных вероятностей состояния диагностируемого объекта: B_0 – исключено; B_1 – почти невероятно; B_2 – очень маловероятно; B_3 – маловероятно; B_4 – более или менее вероятно; B_5 – вероятно; B_6 – более чем вероятно; B_7 – достаточно вероятно; B_8 – очень вероятно; B_9 – почти точно; B_{10} – абсолютно точно.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере технической диагностики электродвигателя, установленного на приводе мешалки. Такие дефекты, как заклинивание подшипника и короткие замыкания между листами активной стали статора, трудно однозначно отличить друг от друга. Поэтому нечеткие диагностические правила локализации этих дефектов дополняют ММДС электродвигателя. В результате опроса группы экспертов для локализации потенциально опасного дефекта статора или подшипника было получено 10 диагностических правил (рис. 3.3). В качестве диагностических признаков использованы температура электродвигателя T , которая оценивается субъективно на уровне одного из подшипников, и потребляемый электродвигателем ток J .



-
- правило 1: если T «немного повышена», то вероятность дефекта подшипника «вероятно»
правило 2: если T «немного повышена», то вероятность дефекта статора «вероятно»
правило 3: если T «высокая», то вероятность дефекта подшипника «достаточно вероятно»
правило 4: если T «высокая», то вероятность дефекта статора «маловероятно»
правило 5: если T «очень высокая», то вероятность дефекта подшипника «почти
-

Рис. 3.3. Диагностические правила для локализации дефектов статора и подшипника электродвигателя

ММДС ТО, построенные с использованием вышеописанных методов, подразумевают недостаток или отсутствие статистических данных по отказам оборудования. В случае, если такие данные имеются, то для определения текущего состояния объекта

целесообразно использовать статистические методы, например, классический Байесовский классификатор или обученную нейронную сеть. Но в этом случае модель представляет собой "черный ящик", что делает невозможным интерпретацию того, как было получено решение. В то же время окончательное решение должен принимать человек и он должен получить полную информацию от экспертной системы, включая объяснение логического вывода независимо от того, какой тип модели использовался.

Поэтому при наличии достаточного количества априорной информации о значениях диагностических признаков при различных состояниях диагностируемого объекта используется специальный тип моделей, основанных на нечеткой нейронной сети [53 – 55, 101, 102]. Нечеткая нейронная сеть (ННС) является аналогом RBF сети [44] и позволяет настраивать параметры функций принадлежности, характеризующих лингвистические переменные признаков отказа по обучающим выборкам (образцам) с использованием градиентного метода для минимизации функции ошибки E :

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P (D_p - D_p^*)^2 \rightarrow \min, \quad (3.18)$$

где p – обучающая выборка; D_p – множество полученных по модели значений субъективных вероятностей диагнозов; D_p^* – множество "желаемых" значений; P – количество обучающих выборок.

Обучение ННС классификации и распознаванию состояний технологического оборудования включает два этапа:

1. Извлечение диагностических правил из численных данных с использованием генетического алгоритма.
2. Оптимизация полученных правил путем настройки параметров функций принадлежности.

Генетический алгоритм позволяет найти малое число диагностических правил, использующих только достаточно информативные признаки отказов. При этом полученные правила наилучшим образом классифицируют отказы по predetermined лингвистическим переменным. Настройка параметров функций принадлежности, характеризующих лингвистические переменные A_{ng_n} с помощью градиентного метода, дает следующие положительные результаты:

- уменьшение числа ошибочно классифицированных образцов;
- повышение компактности базы знаний за счет удаления совпавших нечетких кластеров.

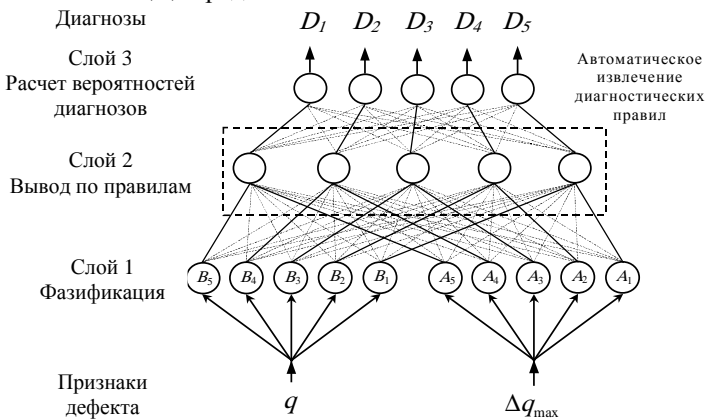
После обучения ННС используется для классификации вновь появляющихся отказов.

Рассмотрим данный подход на примере построения ММДС торцового уплотнения типа Т7 в виде ННС (рис. 3.4). Рассматриваемыми признаками отказа являются величина утечки запирающей жидкости через верхнее кольцо торцового уплотнения q и максимальная скорость ее изменения Δq_{\max} . Признаки отказа характеризуются нечеткими лингвистическими переменными A_i, B_j , $i, j=1, 5$, и определяют субъективные вероятности следующих диагнозов: D_1 – нормальное состояние; D_2 – растрескивание пары трения; D_3 – дефект уплотнительных резиновых колец; D_4 – повышенный износ вследствие попадания в торцевое уплотнение абразива; D_5 – дефект пружин.

ННС состоит из трех слоев. Каждый нейрон первого слоя со значением выхода $O_{ng_n}^1$ вычисляет степень принадлежности n -го диагностического признака определенным лингвистическим понятиям:

$$O_{ng_n}^1 = \mu_{ng_n}(x_n), \quad (3.20)$$

где $\mu_{ng_n}(x_n)$ – функция принадлежности признака x_n к понятию, описываемому лингвистической переменной A_{ng_n} . Данная процедура называется фазификацией или переводом в нечеткое представление. Например, при утечке запирающей жидкости через верхнюю пару трения торцового уплотнения равной $3 \text{ см}^3/\text{ч}$ значение функции принадлежности, характеризующей понятие утечка "очень высокая" – 0,2; "высокая" – 0,8; "средняя" – 0 и "малая" – 0.



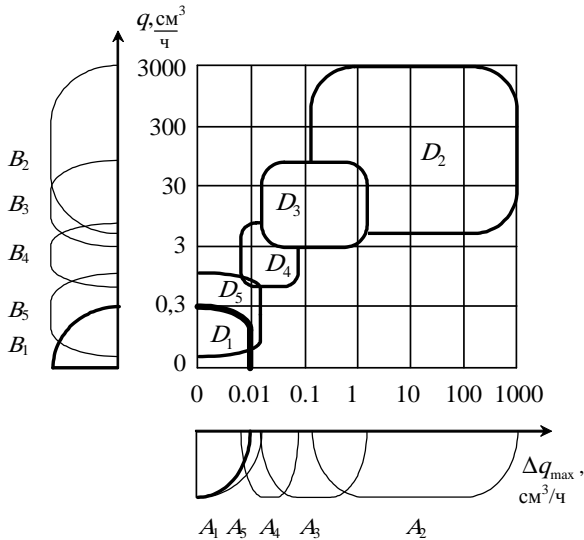


Рис. 3.4. ММДС торцового уплотнения типа Т7 в виде нечеткой нейросети и пространство поиска диагностических правил

Второй слой ННС вычисляет степени принадлежности диагностических правил, используя значения выходов нейронов первого слоя. Количество правил равно количеству нейронов второго слоя. Связи между нейронами первого и второго слоев, формирующие диагностические правила и их число, определяются в результате обработки обучающих выборок генетическим алгоритмом. Выходное значение нейрона второго слоя O_r^2 вычисляется через произведение степеней принадлежности всех предпосылок правила:

$$O_r^2 = \prod_{n, g_n \in r} O_{ng_n}^1, \quad (3.21)$$

где r – номер диагностического правила.

Выходное значение нейрона третьего слоя O_k^3 определяет субъективную вероятность каждого диагноза D_k , исходя из максимальной принадлежности соответствующим правилам, по формуле:

$$D_k = O_k^3 = \max_{k \in r} O_r^2. \quad (3.22)$$

Для представления экспертных знаний всех ММДС ТО, за исключением таблиц неисправностей, используются продукционные правила четкого и нечеткого видов. Главным недостатком продукционных систем является невозможность структуризации знаний и, как следствие, низкая скорость вывода при большом числе продукционных правил. Для повышения эффективности функционирования продукционных систем используется декомпозиционно-иерархическая структура базы знаний. Данный метод отображает сложную ТС как комбинацию множества функционально независимых элементов. Такая организация представления знаний об отказах оборудования позволяет избежать избыточности информации в базе знаний, распространять полученные знания по диагностике ТО для различных МХП, делая систему универсальной.

Подробнее структура экспертной системы технической диагностики описана в разделе 3.4.

В результате решения задачи технической диагностики ТО проводится локализация возможных дефектов и оценка степени их развития с целью выбора оптимальной стратегии ремонта (ОСР) технологического оборудования в условиях неопределенности. Нехватка и неточность информации обусловлена возможной неточностью локализации дефекта и вероятностной природой возникновения отказов оборудования. Решение задачи выбора ОСР ТО включает:

- идентификацию элемента ТО, замена или восстановление которого предполагается в ходе проведения ремонта;
- определение наилучшего типа предстоящего ремонта;
- выбор оптимального времени проведения ремонта.

Данные вопросы рассмотрим более подробно в следующих разделах.

3.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ СРОКОВ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА ТО

Решение задачи технической диагностики состояния ТО часто предполагает, что элемент, вызвавший первые симптомы отказа узла оборудования, имеет потенциально опасный дефект, но может еще проработать определенное время до своего отказа. В случае, если данный элемент при дальнейшем его использовании не может вызвать аварийной ситуации на производстве, то целесообразно отложить ремонт на такое время, в которое суммарные затраты на его проведение будут минимальны.

Затратные составляющие на проведение ремонтных работ включают:

- стоимость заменяемых деталей Z_{Iv}^{det} ;
- затраты на разборку и сборку узла, установку заменяемых деталей Z_{Iv}^{md} ;
- уменьшение прибыли в результате простоя на ремонт Z_{Iv}^{Ap} ;
- затраты, связанные с потерями сырья и энергетики Z_{Iv}^{los} ,

где I – потенциально дефектный элемент, v – тип планируемого ремонта.

Некоторые продукты, выпускаемые на МХП, являются нестойкими в процессе их получения. Поэтому внезапная остановка на определенных технологических стадиях технологического процесса, к примеру, на стадии появления первых симптомов отказа аппарата j^f , ведет к браку и потере сырья. Следовательно, в данной ситуации желательно отложить проведение ремонта на тот период, когда продукт будет выгружен из аппаратов данной стадии и передан на следующую или, если это возможно, на период проведения запланированного технического обслуживания ТО. Во втором случае удастся избежать уменьшения прибыли в результате отсутствия незапланированного простоя МХП.

При этом с течением времени вероятность отказа оборудования будет увеличиваться. Поэтому, планируя ремонт на определенное время, может оказаться, что отказ оборудования произойдет раньше этого времени и вместо ожидаемо малых затрат на проведение ремонта необходимо будет затратить гораздо большую сумму. Такая неопределенность времени возникновения отказа оборудования затрудняет поиск оптимального времени планируемого ремонта и требует разработки специального критерия, учитывающего вероятностную природу возникновения отказов.

Наряду с неопределенностью времени возникновения отказа существует другой вид неопределенности. В простейшем случае при появлении симптомов отказа одного из узлов оборудования после их анализа удастся однозначно определить первопричину такого нарушения и точно локализовать неисправность, не прибегая к разборке узла. При этом очень часто нельзя однозначно сказать, в чем причина появления первых признаков отказа, а, следовательно, появляется неопределенность локализации потенциально опасного дефекта.

Таким образом, для выбора оптимальной стратегии ремонта необходимо определение ремонтируемого элемента, типа ремонта и времени его проведения. Время начала планируемого ремонта и его тип необходимо выбрать такие, чтобы с учетом технологии производства, действующего календарного плана, графиков ППР и имеющихся неопределенных факторов минимизировать суммарные затраты на его проведение [56 – 61]. Внеплановый ремонт является возмущением на текущий календарный план производства и график ППР оборудования. Это требует их оптимальной коррекции на этапе эксплуатации МХП в результате решения задачи оптимального календарного планирования работы совокупности технических систем цеха в условиях ограниченности ремонтного персонала. Данная задача рассматривается в главе 4 и решается для каждого варианта планируемого ремонта с получением затратных составляющих, связанных с уменьшением прибыли в результате простоя на ремонт $Z_{Iv}^{\Delta P}$.

Рассмотрим на примере фрагмента календарного плана (рис. 3.5) построение математической модели определения возможных сроков проведения ремонтных работ ТО. Пусть t_r^{ff} – различные оценки времени до неизбежного отказа оборудования. Сроки возможного проведения ремонтных работ в зависимости от времени до неизбежного отказа t_r^{ff} будем определять следующим образом:

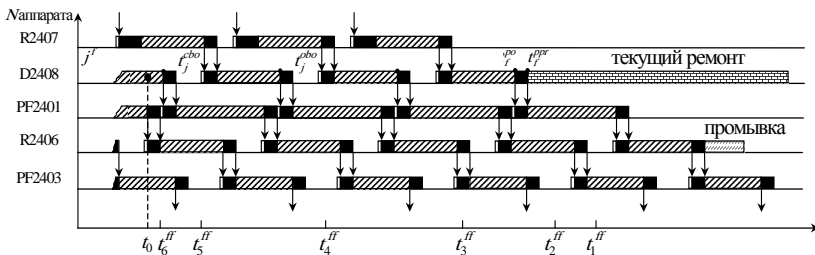


Рис. 3.5. Фрагмент календарного плана выпуска продукции с оценкой времени до полного отказа t_r^{ff}

- 1) после выпуска продукта во время проведения ППР:

$$t_1^{ff} > t_{j^f}^{ppr} - t_0 \text{ и } dr_{Iv}^{rep} < dr_{j^f}^{ppr}; \quad (3.23)$$

- 2) после выпуска продукта с проведением внепланового ремонта:

$$t_2^{ff} > t_{j^f}^{po} - t_0 \text{ и } dr_{I_v}^{rep} > dr_{j^f}^{ppr}; \quad (3.24)$$

3) после выгрузки одной из партий без потерь сырья:

$$t_3^{ff} > t_{j^f}^{bo} - t_0 \text{ и } dr_{I_v}^{rep} > dr^c - dr_{j^f}^b; \quad (3.25)$$

4) после выгрузки одной из партий с потерей сырья:

$$t_4^{ff} > t_{j^f}^{obo} - t_0 \text{ и } dr_{I_v}^{rep} > dr^c - dr_{j^f}^b; \quad (3.26)$$

5) после выпуска текущей партии с потерей сырья:

$$t_5^{ff} > t_{j^f}^{cbo} - t_0 \text{ и } dr_{I_v}^{rep} > dr^c - dr_{j^f}^b; \quad (3.27)$$

6) сразу после первичного отказа:

$$t_6^{ff} < t_{j^f}^{cbo} - t_0; \quad (3.28)$$

7) после выгрузки одной из партий без остановки схемы:

$$dr_{I_v}^{rep} < dr^c - dr_{j^f}^b, \quad (3.29)$$

где j^f – номер аппарата у которого появились первые симптомы отказа; t_0 – время появления первых симптомов отказа; t_r^{ff} – время до неизбежного отказа для r -го варианта проведения ремонта; $t_{j^f}^{ppr}$ – время начала проведения ближайшего ППР аппарата j^f ; $t_{j^f}^{po}$ – время окончания обработки последней партии нарабатываемого продукта в аппарате j^f ; $t_{j^f}^{bo}$ – время окончания обработки n -й партии продукта в аппарате j^f ; $t_{j^f}^{cbo}$ – время окончания обработки текущей партии продукта в аппарате j^f ; $t_{j^f}^{obo}$ – время окончания обработки последней из партий, которые уже обрабатываются в аппарате j^f при появлении первых симптомов отказа; $dr_{I_v}^{rep}$ – продолжительность v -го типа ремонта I -го элемента аппарата j^f ; $dr_{j^f}^{ppr}$ – продолжительность проведения ближайшего ППР j^f -го аппарата; $dr_{j^f}^b$ –

продолжительность пребывания продукта в аппарате j^f ; dt^c – время производственного цикла.

Для определения оптимальных значений времени и типа планируемого ремонта необходимо проанализировать все возможные варианты его проведения в условиях повышенного риска отказа, оценивая суммарные затраты на ремонт. Рассмотрим оценку составляющих суммарных затрат на ремонт при различных сроках проведения ремонтных работ.

Каждому варианту начала проведения ремонтных работ соответствует множество типов ремонта, $v = \overline{1, V}$ с различными затратами на его проведение, поэтому пространство поиска оптимального решения в данном случае является двумерным. Суммарные затраты на ремонт в конечном счете являются определяющим фактором при выборе оптимальной стратегии проведения ремонта.

1. Ремонт можно провести во время ППР, если время до неизбежного отказа больше времени до начала проведения ППР и ремонт укладывается во время ППР. Однако, не всегда такой вариант может оказаться оптимальным, так как время до отказа – величина субъективная и существует вероятность отказа оборудования во время $t_0 \leq t \leq t^{ff}$, где затраты на ремонт могут оказаться высокими. Если деталь узла аппарата, дефект которой вызвал первые симптомы отказа, входит в список заменяемых во время ППР деталей, то затраты $z_{I_v}^{det}$ не учитываются. В противном случае затраты $z_{I_v}^{det}$ учитывать необходимо. Еще одним фактором, отрицательно влияющим на выбор такого варианта ремонта, может являться высокая загруженность ремонтного персонала во время ППР. Если узел с потенциально опасным дефектом не входит в регламентные работы ППР, то время проведения одного из текущих цеховых ППР может быть увеличено. Это влечет за собой увеличение затратных составляющих, связанных с уменьшением прибыли в результате простоя на ремонт $z_{I_v}^{Ap}$.

В общем случае суммарные затраты на проведение ремонта во время ППР представим в следующем виде:

$$z = z_{I_v}^{det} + z_{I_v}^{Ap}. \quad (3.30)$$

2. Если время до неизбежного отказа аппарата j^f больше времени окончания обработки последней партии продукта в этом

аппарате и для него в это время не планируется ППР, то тогда имеется возможность провести внеплановый ремонт. При этом затраты на проведение ремонта после выпуска продукта будут складываться как и в первом случае из затрат (3.30), а также затрат, связанных с разборкой и сборкой узла, установкой заменяемых деталей $z_{I_v}^{md}$. Поэтому суммарные затраты будем рассчитывать следующим образом:

$$z = z_{I_v}^{det} + z_{I_v}^{\Delta p} + z_{I_v}^{md}. \quad (3.31)$$

На рисунке 3.6 изображен фрагмент календарного плана функционирования МХП, функция принадлежности, характеризующая степень возможности отказа, функция суммарных трудозатрат ремонтного персонала цеха и варианты проведения ремонтов в виде отрезков на оси времени.

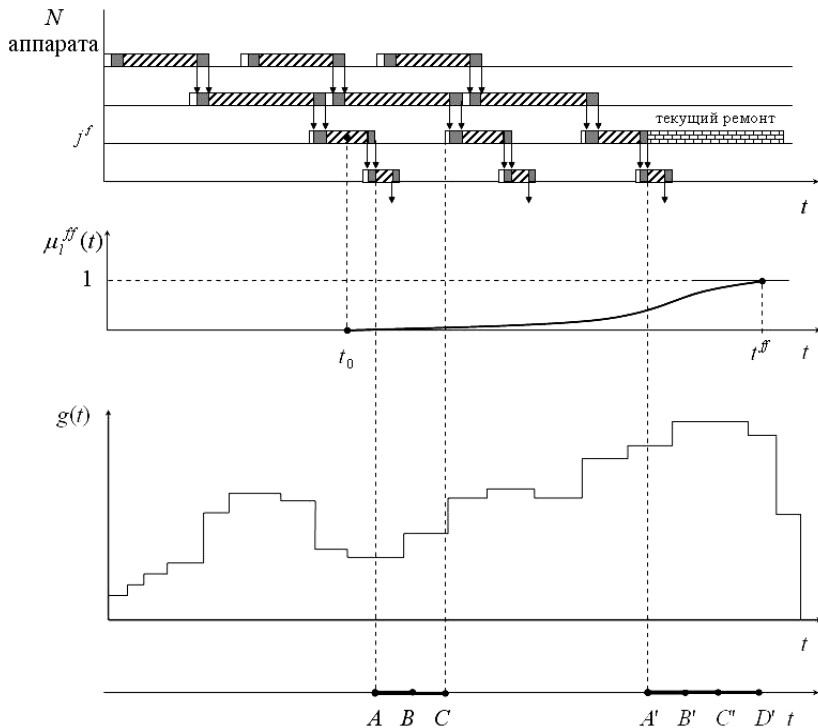


Рис. 3.6. Пример проведения ремонтов AB или AC во время "ожидания" когда аппарат свободен и во время проведения ППР – $A'B', A'C', A'D'$

Загруженность ремонтного персонала и вероятность отказа при планировании ремонта $AB', A'C'$ или AD' выше, чем загруженность

ремонтного персонала и вероятность отказа во время ожидания, т.е. во время ремонтов AB или AC . Из этого следует, что в этом случае целесообразность проведения ремонтных работ во время ППР уменьшается.

Очевидно, что при отсутствии высокой загруженности ремонтного персонала цеха ремонт можно провести не влияя на технологию производства и второе слагаемое (3.31) обратится в нуль. Тогда данный вариант ремонта может "конкурировать" с вариантом 7, так как в обоих случаях не будет прямых затрат, связанных с потерями сырья, энергии и, как следствие, прибыли в результате простоя на ремонт.

3. Время до неизбежного отказа аппарата j^f может быть меньше времени окончания обработки последней партии продукта в этом аппарате $t_{j^f}^{po}$. Но оно может быть больше времени окончания обработки последней из партий, которые уже обрабатываются в аппарате j^f при появлении первых симптомов отказа, т.е. больше времени $t_{j^f}^{obo}$. В этом случае может оказаться целесообразным провести ремонт после обработки одной из партий, время окончания которой больше $t_{j^f}^{obo}$ и меньше $t_{j^f}^{po}$. При этом ремонт проводится с остановкой схемы без потерь сырья. Суммарные затраты рассчитываются по (3.31).

4. Потеря сырья неизбежна для нестойких продуктов в случае, если время до полного отказа меньше времени окончания обработки последней из партий, которые уже обрабатываются МХП при появлении первых симптомов отказа и невозможно провести ремонт во время ожидания, т.е. между выгрузкой текущей партии со стадии j_f и загрузкой следующей. Очевидно, что если загруженность ремонтного персонала на данном интервале равномерная, т.е. не влияет на выбор того или иного ремонта, и вероятность отказа изменяется незначительно, то в данном случае оптимальным временем начала проведения ремонта будет время выгрузки последней, максимально возможной партии. Суммарные затраты на проведение ремонта будут равны:

$$z = z_{I_v}^{det} + z_{I_v}^{\Delta p} + z_{I_v}^{md} + z_{I_v}^{jos}. \quad (3.32)$$

5. Если время до полного отказа больше времени оставшегося до выгрузки только текущей партии и продолжительность ремонта больше времени между выгрузкой текущей и загрузкой следующей

партии продукта на стадии j^f , то ремонт будет проводиться с остановкой схемы. При этом будет потеряна минимум одна партия продукта. Данный вариант является частным случаем 4-го варианта проведения ремонтных работ. С точки зрения возможных потерь, вариантом проведения ремонта, альтернативным данному, может быть 6-й вариант, т.е. проведение ремонта сразу после появления первых симптомов отказа с остановкой схемы. Суммарные затраты будут определяться (3.32).

6. Если время до полного отказа меньше времени, оставшегося до выгрузки текущей партии, то ремонт проводится сразу с потерей минимум одной партии. Суммарные затраты также оцениваются по соотношению (3.32).

7. Если продолжительность ремонта меньше времени между выгрузкой одной и загрузкой следующей партии продукта на стадии j^f , то ремонт целесообразно провести в это время, т.е. во время ожидания. При этом суммарные затраты будут определяться по (3.31)

Необходимо отметить, что при возможности проведения различных типов ремонта v только расчет общих затрат для всех возможных случаев даст возможность определить лучший тип ремонта для данных условий.

После того, как определены составляющие суммарных затрат, которые необходимо учитывать при проведении того или иного варианта ремонта, представим полученные результаты с помощью следующего множества:

$$\{A_r\} = \{a_r^{det}(t), a_r^{md}(t), a_r^{\Delta p}(t), a_r^{md}(t)\}, \quad r = \overline{1, 7}. \quad (3.33)$$

Здесь r – одно из семи правил (3.23) – (3.29), в соответствии с которым, в тот или иной срок проводится ремонт. Каждый элемент множества – это бинарная переменная, принимающая значение единицы в случае, если соответствующая составляющая суммарных затрат учитывается при данном варианте проведения ремонта и равна нулю в обратном случае.

Таким образом, в дальнейшем, при построении математической модели выбора стратегии ремонта в условиях неопределенности, определяется необходимость расчета тех или иных затратных составляющих при различных сроках проведения ремонтных работ.

3.3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ РЕМОНТА ТО В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Для постановки и решения задачи выбора оптимальной стратегии ремонта оборудования в условиях неопределенности необходимо построение математической модели, которая позволила бы учесть возможную неточность локализации дефекта и неопределенность времени возникновения отказа оборудования в условиях развития потенциально опасного дефекта.

Рассмотрим первоначально самый простой случай, когда в результате проведения диагностики точно локализован элемент, вызвавший первые симптомы отказа и известно, что до времени t^{ff} отказ точно не произойдет. При этом затраты на ремонт определяются однозначно, исходя из времени начала проведения ремонта и его типа. Так как пространство поиска является двумерным, то получение оптимального решения гарантирует перебор всех возможных вариантов проведения ремонта по переменным времени планирования ремонта и типа ремонта. Функция затрат на ремонт от варьируемых переменных является многоэкстремальной и определяется следующим образом:

$$z_{I_v}(t) = a^{det}(t)z_{I_v}^{det} + a^{md}(t)z_{I_v}^{md} + a^{\Delta p}(t)z_{I_v}^{\Delta p} + a^{Jos}(t)z_{I_v}^{Jos}. \quad (3.34)$$

Функция затрат на ремонт вычисляется для интервала времени $[t_0, t^{ff}]$, с шагом Δt . Ее проекция на горизонтальную плоскость представляет собой пространство поиска решения в виде прямоугольной сетки.

Затраты на ремонт, связанные со стоимостью заменяемых деталей $z_{I_v}^{det}$ и затраты, связанные с разборкой и сборкой узла, установкой заменяемых деталей $z_{I_v}^{md}$ являются табличными величинами и зависят от стоимости заменяемых деталей и вида проведения ремонта:

$$z_{I_v}^{det} = z^{det}(I, v), \quad (3.35)$$

$$z_{I_v}^{md} = z^{md}(I, v). \quad (3.36)$$

Для расчета затратных составляющих, связанных с потерями сырья и энергетики, введем следующие бинарные переменные: y_{ijk} , x_{ik} и λ , принимающие значение единица либо нуль.

Значение бинарной переменной y_{ijk} примем равной единице, в случае потерь k -й партии i -го продукта j -й стадии, в результате простоя аппарата j^f на ремонт. При этом партия продукта теряется только при выполнении следующих условий:

1. Ремонт "перекрывает" по времени k -ю партию i -го продукта в аппарате j^f . В этом случае бинарная переменная x_{ik} равна единице.

2. Отсутствует возможность хранения партии продукта в аппаратах блока нулевого ожидания, вследствие его нестойкости, $j^f \in [A, B-1]$.

3. Партия является уже загруженной в j -й аппарат, работающий в режиме нулевого ожидания [62] на момент:

– появления первых симптомов отказа при планируемом ремонте $t_\alpha = t_0$;

– аварийной остановки во время $t_\alpha = t$;

где A и B – первая и последняя стадии блока нулевого ожидания; t_0 – время появления первых симптомов отказа; t – время начала проведения ремонта в результате аварийного останова производства. Таким образом, значение бинарной переменной y_{ijk} будем определять следующим образом:

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } (x_{ik} = 1) \wedge (j^f \in [A, B-1]) \wedge (t_{i(j^f-1)}^k + P_{i(j^f-1)}^k < t_\alpha) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.37)$$

$$t_\alpha = \begin{cases} t, & \text{если ремонт аварийный,} \\ t_0, & \text{если ремонт неаварийный.} \end{cases} \quad (3.38)$$

Значение бинарной переменной x_{ik} будем определять так:

$$x_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{если } (t_{ij^f}^k + P_{ij^f}^k \leq t) \vee (t_{i(j^f-1)}^k \geq t + dr_{I_v}) \\ 1, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.39)$$

где $t_{ij^f}^k$, $P_{ij^f}^k$, $t_{i(j^f-1)}^k$, $P_{i(j^f-1)}^k$ – время окончания и продолжительность обработки k -й партии i -го продукта на стадиях j^f и $j^f - 1$ соответственно; dr_{I_v} – время вынужденного простоя аппарата, которое определяется следующим образом:

$$dr_{I_v} = \lambda dr_{I_v}^{rep} + (1 - \lambda) dr_{I_v}^{md}, \quad (3.40)$$

$dr_{l_v}^{rep}$ – продолжительность проведения v -го типа ремонта l -го элемента; $dr_{l_v}^{md}$ – продолжительность дополнительного визуального осмотра (ДВО) l -го элемента с разборкой узла с целью постановки окончательного диагноза; бинарная переменная λ равна единице при проведении ремонта и равна нулю при проведении ДВО.

Таким образом, затратные составляющие, связанные с потерями сырья и энергетики $z_{l_v}^{los}(t)$, будем определять по формуле:

$$z_{l_v}^{los}(t) = \sum_i \sum_k \sum_j Y_{ijk} \left(w_i \sum_{m=1}^{M_{ij}} \zeta_{im} c_i^c + z_{ij}^{eng} \right), \quad (3.41)$$

где w_i – размер партии i -го продукта, т; c_i^c – цена партии i -го продукта, р.; ζ_{im} – расходная норма m -го компонента сырья на 1 т i -го продукта; M_{ij} – количество компонентов сырья, загружаемых в j -й аппарат и необходимых для производства i -го продукта; z_{ij}^{eng} – затраты на энергетику при эксплуатации j -го аппарата для выпуска одной партии i -го продукта.

Затратные составляющие, связанные с уменьшением прибыли в результате простоя на ремонт $z_{l_v}^{\Delta P}$ рассчитываются для каждого варианта проведения ремонтных работ при решении задачи оптимального календарного планирования работы цеха. В результате ее решения для определенного варианта планируемого ремонта определяются новое значение условной прибыли P' и затратные составляющие, связанные с уменьшением прибыли в результате простоя на ремонт, $z_{l_v}^{\Delta P}$ равны:

$$z_{l_v}^{\Delta P} = P - P', \quad (3.42)$$

где P – условная прибыль, получаемая при отсутствии внеплановых ремонтов.

Рассмотрим случай, когда имеет место неопределенность времени возникновения отказа. При этом затраты на ремонт в зависимости от времени, на которое он запланирован, принимают недетерминированный характер. Очевидно, что для любого времени планируемого ремонта t существует тип ремонта w , при котором

затраты на его проведение в это время будут минимальны. Поэтому для упрощения дальнейших рассуждений перейдем к одномерному поиску, положив, что:

$$\forall t: w = \arg \min_v z_{I_v}(t). \quad (3.43)$$

Так как при планировании ремонта на время t имеется вероятность отказа раньше этого времени, начиная с момента появления первых симптомов отказа t_0 , то затраты $\bar{z}_I(t)$, которые в среднем будут необходимы для ремонта, планируемого на время t , будем определять по следующей формуле:

$$\bar{z}_I(t) = z_{I_w}(t)(1 - \mu_I^{ff}(t)) + \frac{\int_{t=t_0}^t z_{I_w}(t') \mu_I^{ff}(t') dt'}{\int_{t=t_0}^t \mu_I^{ff}(t') dt'} \mu_I^{ff}(t), \quad (3.44)$$

где первое слагаемое представляет собой часть условных затрат, необходимых в случае, если преждевременный отказ не происходит и не проводится аварийный ремонт, второе слагаемое представляет собой другую часть условных затрат, необходимых в случае проведения аварийного ремонта. Дробь второго слагаемого представляет собой затраты на ремонт при преждевременном отказе, которые в среднем могут потребоваться в условиях увеличения вероятности его возникновения.

Таким образом, при точной локализации потенциально опасного дефекта I и неопределенном времени отказа узла оборудования, оптимальное время планируемого ремонта будем определять по следующей формуле:

$$t_I^* = \arg \min_t \bar{z}_{I_w}(t). \quad (3.45)$$

Пусть, например, в момент времени t_0 появились первые симптомы дефекта подшипника мотор-редуктора, установленного на приводе мешалки емкостного аппарата. Вероятность того, что причиной появления этих симптомов является дефект другого элемента, равна нулю. Время до отказа мотор-редуктора характеризуется функцией принадлежности $\mu_I^{ff}(t)$ (рис. 3.7). Тогда по формулам (3.35) – (3.43) определяем суммарные затраты на ремонт в различное время его проведения без учета риска преждевременного

отказа и получаем график функции суммарных затрат на ремонт, изображенный в верхней части рис. 3.7. Рассчитываем средние затраты на ремонт для всего периода по (3.44) и в результате получаем кривую средних затрат на ремонт $\bar{z}_{I_w}(t)$, представленную в центре рис. 3.7, и оптимальное время планируемого ремонта t_1^* по формуле (3.45).

Теперь рассмотрим случай неточной локализации потенциально опасного дефекта, когда мы имеем несколько альтернативных объектов ремонта. Число альтернатив равно размерности усеченного множества диагнозов, полученного в результате решения задачи технической диагностики. Множество вариантов проведения ремонта для каждого из объектов получаем аналогично, как и в случае точной локализации потенциально опасного дефекта.

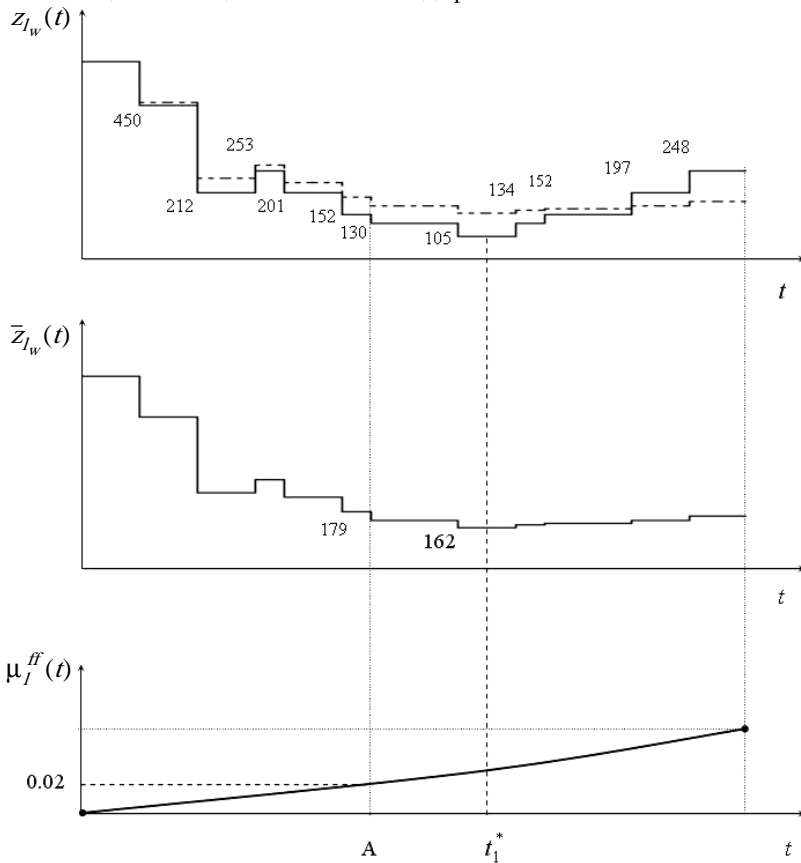


Рис. 3.7. Функции затрат на ремонт без учета неопределенности времени до отказа $z_{l_w}(t)$ и с учетом неопределенности $\bar{z}_{l_w}(t)$

Пусть имеем L возможных диагнозов с заданными вероятностями p_l . Для каждого из них имеется своя функция принадлежности, характеризующая вероятность возникновения соответствующего отказа. Так же как и в предыдущем случае перейдем к одномерному поиску по формуле (3.43) и получим для каждого из диагнозов функцию средних затрат на ремонт от времени (рис. 3.8). Далее необходимо определить время планируемого ремонта t^* , при котором средние затраты на проведение ремонтных работ $\bar{z}(t)$ будут минимальны в условиях неопределенности локализации потенциально опасного дефекта и времени возникновения отказа. Средние затраты на проведение ремонтных работ в условиях неопределенности будем определять следующим образом:

$$\bar{z}(t) = \sum_{l=1}^L p_l \cdot \bar{z}_{l_w}(t). \quad (3.46)$$

Оптимальное время планируемого ремонта в условиях неопределенности локализации потенциально опасного дефекта и времени возникновения отказа определим по формуле:

$$t^* = \arg \min_t \bar{z}(t). \quad (3.47)$$

Таким образом, при планировании ремонтных работ на время t^* минимизируются среднестатистические затраты, требуемые на ремонт и затраты, связанные с ошибкой в выборе объекта ремонта.

В случае неточной локализации элемента, вызвавшего первые симптомы отказа, время планируемого ремонта t^* будет оптимальным только при условии, что исключена возможность дополнительного визуального осмотра с разборкой узла с целью постановки окончательного диагноза. Однако, если такая возможность имеется, то может

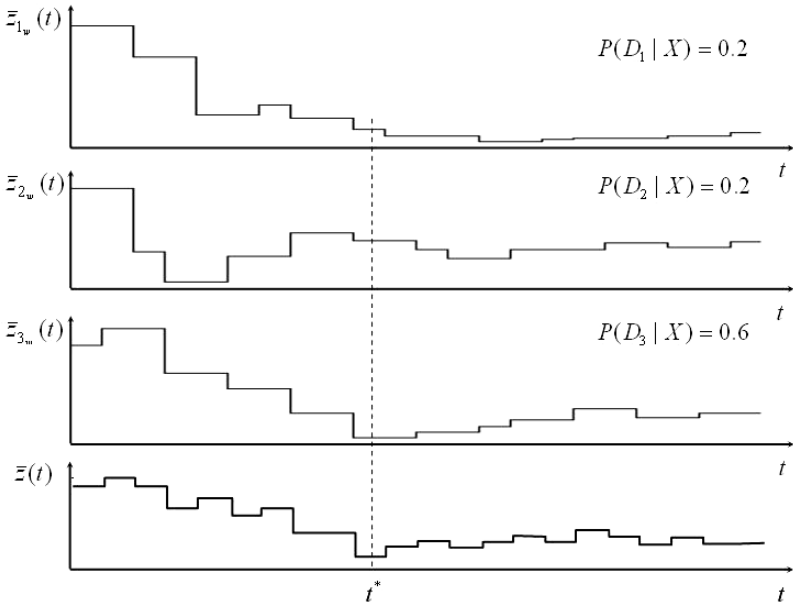


Рис. 3.8. Функции суммарных затрат на ремонт и оптимальное время его планирования в условиях неопределенности оказаться эффективным провести разборку узла с точным определением первопричины появления симптомов отказа и провести ремонт до времени, рассчитанного по формуле (3.47).

Очевидно, что в данном случае затраты на проведение ДВО в среднем должны окупаться и давать выигрыш в экономии затрат на ремонт. Эффект, получаемый от ДВО Δz_e , будем определять следующим образом:

$$\sum_{l=1}^L \left[(\bar{z}_{l_w}(t) - \bar{z}_{l_w}(t_{md})) P_l + \left\{ \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq l}}^L P_l (\bar{z}_{l_w}(t) - \bar{z}_{l_w}(t_r^*) - z_{l_w}^{md}(t_{md}) - z_{l_w}^{\Delta p}(t_{md})) \right\} (1 - P_l) \right], \quad (3.48)$$

где $\bar{z}_{l_w}(t)$ – средние затраты на проведение планируемого ремонта w -го типа при устранении дефекта l -го элемента во время t ; $\bar{z}_{l_w}(t_{md})$ –

средние затраты на проведение планируемого ремонта i -го типа для устранения дефекта l -го элемента во время проведения ДВО; $Z_{lw}^{md}(t_{md})$ – затраты на проведение ДВО с целью локализации дефекта l -го элемента и разборкой узла во время t_{md} ; $Z_l^{Ap}(t_{md})$ – затратные составляющие, связанные с уменьшением прибыли в результате простоя при проведении ДВО и локализации дефекта l -го элемента во время t_{md} .

С целью максимальной экономии затрат на ремонт время ДВО определяется следующим образом:

$$t_{md}^* = \operatorname{argmax}_{t_{md} \in (t_0, t^*)} \Delta z_e, \Delta z_e > 0. \quad (3.49)$$

Разработанная математическая модель выбора стратегии ремонта в условиях неопределенности позволяет учесть возможную неточность локализации дефекта и неопределенность времени возникновения отказа оборудования в условиях развития потенциально опасного дефекта.

Таким образом, сформулируем основные положения выбора стратегии проведения ремонта ТО для МХП. В процессе эксплуатации технологического оборудования с определенной периодичностью проводится диагностирование его технического состояния. При появлении потенциально опасного дефекта ТО проводится его локализация по соответствующей ММДС. Результатом локализации дефекта является элемент l , вызвавший первые симптомы отказа или множество потенциально дефектных элементов $\{l\}$. Так как дефектный элемент узла ТО может быть локализован неточно, а время отказа элемента является вероятностной величиной, то планирование ремонта проводится в условиях неопределенности.

В процессе функционирования многоассортиментных химических производств выбор времени и типа внепланового ремонта имеет большое значение, так как от этого выбора зависят суммарные затраты на проведение ремонтных работ, а соответственно – получаемая прибыль. Возникает вопрос выбора оптимальной стратегии ремонта ТО в условиях неопределенности локализации и времени возникновения отказа. Очевидно, что затраты на ремонт являются недетерминированными, поэтому судить об эффективности того или иного варианта проведения ремонтных работ можно лишь по среднестатистическим затратам.

Затратные составляющие, связанные с уменьшением прибыли в результате простоя на ремонт, должны быть определены для каждого варианта проведения ремонтных работ в результате решения задачи

оптимального календарного планирования работы химико-технологических схем цеха с учетом проведения ППР.

При планировании ремонта необходимо учитывать возможность проведения дополнительного визуального осмотра с разборкой узла, если данное мероприятие позволяет сэкономить затраты на проведение ремонтных работ.

На основании изложенного сформулируем постановку задачи выбора оптимальной стратегии ремонта ТО в условиях неопределенности.

Необходимо найти такое время начала планируемого ремонта t^* и тип планируемого ремонта v^* , при которых условные затраты на проведение ремонтных работ будут минимальны:

$$t^*, w^* = \arg \min_{t, w} \left[\sum_{j=1}^L (P_j \cdot \bar{z}_{j_w}(t)) - \Delta z_e \right] \quad (3.50)$$

при выполнении уравнений связи в виде математических моделей определения возможных сроков проведения ремонтов ТО (3.23) – (3.33), выбора стратегии ремонта в условиях неопределенности (3.34) – (3.49) и следующих ограничений:

- на время проведения ремонта $t_0 \leq t \leq t^{ff}$;
- на количество имеющихся запасных частей l -й детали $k_l \leq K_l^+$;
- на максимальное количество привлекаемых ремонтников $\eta \leq G$;
- на максимально возможные затраты на приобретение запасных частей $\varphi \leq \Phi$.

Алгоритм решения задачи технической диагностики состояния ТО основан на использовании экспертной системы (раздел 3.4) с набором алгоритмов распознавания технического состояния оборудования. Для локализации потенциально опасного дефекта ТО экспертная система использует логический вывод по ММДС ТО четырех типов.

Алгоритм решения задачи выбора оптимальной стратегии ремонта ТО в условиях неопределенности основан на предположении, что при решении задачи технической диагностики с определенной степенью вероятности локализован элемент, вызвавший первые симптомы отказа объекта диагностирования и получена нечеткая экспертная оценка времени возникновения отказа. Факторы неопределенности выражаются временем возникновения отказа и неточной локализацией элемента, подлежащего ремонту. Алгоритм включает следующие этапы: выбор первого элемента, потенциально

являющегося причиной появления первых симптомов отказа; формирование возможных вариантов проведения планируемого ремонта; расчет календарного плана и ППП цеха для каждого варианта проведения ремонтных работ с получением составляющих затрат на ремонт; расчет суммарных затрат на ремонт и уменьшение пространства поиска оптимального решения; расчет оптимального времени планируемого ремонта для текущего потенциально дефектного элемента; проверка списка оставшихся элементов; определение времени планируемого ремонта, оптимального с точки зрения всех элементов; определение целесообразности проведения дополнительного визуального осмотра с разборкой узла и времени его проведения.

Постановка и совместное решение задач технической диагностики состояния ТО и выбора оптимальной стратегии его ремонта позволяет не только выявить возникающий дефект, но и учесть возможную неточность его локализации и неопределенность времени возникновения отказа оборудования в условиях развития потенциально опасного дефекта.

3.4. СТРУКТУРА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТО

Исследования проблемы технической диагностики состояния технологического оборудования показали, что для ее комплексного решения необходимо создавать автоматизированную систему с привлечением экспертных оценок, позволяющую оперировать нечеткими категориями и проводить, так называемые, "приближенные рассуждения". При этом экспертная система (ЭС) должна обеспечивать выполнение следующих функций:

1. Поддержка принятия решений о текущем состоянии оборудования.
2. Определение вероятного времени отказа ТО в случае нарушения его нормального функционирования.
3. Обеспечение возможности обработки ММДС ТО различных типов, основанных на экспертных знаниях о характерных отказах оборудования.
4. Предложение оптимальных методов и периодичности диагностирования узлов ТО.
5. Выбор оптимальной стратегии проведения ремонтных работ при выявлении неисправности ТО.

Применение экспертных оценок для решения задачи технической диагностики ТО объясняется тем, что знания причинно-следственных

связей между признаками отказов и возможными диагнозами удобнее представлять в виде логических правил, чем математическими соотношениями. В этом случае удается учесть диагностические признаки различной природы и получить решение в условиях неполной и (или) нечеткой информации. Неполнота информации и ее нечеткость возникают вследствие недостатка оснащения МХП контролируемыми приборами, зашумленности показаний приборов, субъективизма оценок диагностических признаков.

ЭС технической диагностики по каждому узлу ТО содержит информацию о множествах возможных дефектов D , диагностических признаков X , методов диагностирования MD , методов устранения дефектов MR , а также ММДС элементов ТО, которые в совокупности составляют общую ММДС емкостного аппарата. Для этого собирается информация по характерным отказам рассматриваемого узла, которая затем вносится в базу знаний (БЗ) ЭС. Приобретение знаний может проводиться двумя способами. Первый способ включает опрос экспертов, обработку полученной информации и пополнение БЗ новыми диагностическими правилами. В качестве примера диагностических правил можно привести одно из правил локализации потенциально опасного дефекта торцового уплотнения:

*ЕСЛИ шум = повышен И утечка масла = немного повышена,
ТО Дефект = коррозионное или усталостное разрушение пружин.*

Второй способ приобретения знаний основан на автоматическом извлечении диагностических правил из численных данных об отказах оборудования. Этот подход может осуществляться, например, с помощью генетического алгоритма, и требует достаточного числа априорных диагностических данных. На начальном этапе при отсутствии статистической информации для построения ММДС ТО используется первый способ приобретения знаний.

В случае нарушения нормального функционирования объекта по соответствующей модели проводится локализация потенциально опасного дефекта с точностью до элемента, вызвавшего первые симптомы отказа. Затем определяется достоверность принятого решения и оценивается время оставшееся до полного отказа. После чего выбираются методы устранения предполагаемого дефекта и стратегия проведения ремонтных работ.

Пополнение БЗ новыми диагностическими правилами происходит на протяжении всего периода эксплуатации МХП по мере появления новой информации об отказах ТО (учесть которую на этапе проектирования системы не представлялось возможным); изменении условий эксплуатации ТС в связи с организацией выпуска новых продуктов; старении и износе ТО. Такой подход позволяет

адаптировать ЭС технической диагностики состояния ТО к изменяющимся условиям длительной эксплуатации ТС и своевременно реагировать на появление новых дефектов, предотвращая их в последующем.

В работе предлагается следующая структура ЭС технической диагностики состояния технологического оборудования (рис. 3.9). Главными особенностями данной структуры является способность хранения и обработки разнотипных диагностических знаний, полученных как от экспертов, так и в ходе их автоматического извлечения из численных данных, а также возможность логического вывода по ММДС ТО различных типов с использованием мягких вычислений. Кроме того, пользователь имеет возможность выбрать дополнительно наиболее оптимальный метод диагностирования предположительного дефекта и метод его устранения.

База знаний ЭС содержит ММДС ТО оборудования. В простейшем случае ММДС ТО представляет собой таблицу неисправностей конкретного оборудования, отражающую наличие того или иного диагностического признака при определенном отказе. Если причинно-следственные связи между признаками и диагнозами лучше описываются в виде четких высказываний, используются модели, основанные на четких лингвистических правилах. Часто бывает, что причинно-следственные связи целесообразнее представлять с использованием нечетких правил. В этом случае, принимая также во внимание тот факт, что показания приборов могут быть зашумлены, применяются модели, основанные на нечетких лингвистических правилах или нечетких нейросетях [53 – 55, 101,102].

База данных содержит информацию о предельных значениях диагностических параметров, которые используются для проверки работоспособности диагностируемого объекта; нечеткие бинарные отношения; весовые коэффициенты ННС; экспертные оценки времени до отказа, методы диагностирования и устранения дефектов, используемые при выборе оптимальной стратегии проведения ремонтных работ.



Рис. 3.9. Структура ЭС технической диагностики состояния технологического оборудования

В создаваемой ЭС подсистема приобретения знаний позволяет обрабатывать диагностическую информацию, полученную в результате опроса экспертов с расчетом средневзвешенных оценок субъективных вероятностей отказов по отдельным диагностическим признакам. Кроме того, имеется возможность автоматического

извлечения диагностических правил с помощью генетического алгоритма и их оптимизации с использованием нейрокомпьютинга.

Подсистема поддержки принятия решений представляет собой универсальную машину вывода, позволяющую проводить распознавание технического состояния объекта, локализацию отказов по различным ММДС ТО и оценивать время возникновения и методы устранения дефекта. Интерфейс пользователя предоставляет возможность доступа к отдельным подсистемам ЭС для проведения консультаций в диалоговом режиме, формирования и коррекции БЗ экспертами.

Таким образом, разрабатываемая ЭС имеет нестандартную, комплексную архитектуру, позволяющую использовать как знания и опыт экспертов, так и статистическую информацию по отказам оборудования, проводить логический вывод по математическим моделям диагностирования состояния ТО различных типов.

4. КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

4.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫПУСКА ПРОДУКЦИИ МХП

Основой задачи оптимального календарного планирования работы МХП является выпуск продукции заданного объема и ассортимента в установленные сроки. При ее решении осуществляется поиск такой последовательности наработки продуктов, при которой критерий оптимальности достигает оптимума. Многовариантные расчеты проводятся на базе автоматизированной системы календарного планирования работы МХП (раздел 4.4) с использованием математических моделей выпуска продукции и автоматизированного построения графика ППР ТО. Кроме того, данные модели позволяют учесть ограниченность количества ремонтного персонала и его занятость на проведении других ремонтных работ, что в ряде случаев является критическим фактором, влияющим на оптимальный календарный план работы ТС цеха.

Рассмотрим построение математической модели выпуска продукции МХП, учитывающей ограниченность количества ремонтного персонала цеха. В качестве прототипа для ее построения была использована модель функционирования гибкой химико-технологической схемы, представленная в работе [62]. Главным отличием данной модели является возможность расчета продолжительностей выпуска продукции при выполнении ремонтов в условиях меняющегося во времени количества свободного ремонтного персонала цеха.

Введем основные допущения, принимаемые при построении математической модели выпуска продукции МХП в условиях ограниченности количества ремонтного персонала.

1. МХП функционирует в режиме с частичным перекрытием циклов обработки партий продуктов в аппаратах различных стадий.
2. В состав аппаратурного оформления схемы входят аппараты периодического и непрерывного действия.
3. Маршруты обработки партий продуктов фиксированы.
4. Продолжительности физико-химических превращений в аппаратах периодического действия не зависят от размеров партий,

являются постоянными и превышают время подготовительных операций на любой стадии для данного продукта.

5. При переходе с выпуска одного продукта на другой не допускается одновременный выпуск разных продуктов в параллельных аппаратах.

6. Суточный фонд работы оборудования для всех стадий одинаков.

7. Число ремонтников цеха строго ограничено.

8. Число свободных ремонтников является переменной величиной от времени.

9. Время промывки аппаратов при переходе с выпуска одного продукта на другой является различным и зависит от конкретного перехода.

Выпуск продукции на МХП характеризуется множеством основных характеристик Ω_1 :

- время цикла обработки i -го продукта;
- количество партий i -го продукта, выпускаемых за одни сутки;
- размер партии i -го продукта;
- время обработки партии i -го продукта для каждой стадии;
- время выпуска первой стадии i -го продукта;
- время перехода с одного продукта на другой.

Перечисленные характеристики входят в состав информационно-аналитического регламента МХП, формируемого после решения задачи проектирования и корректируемого при реконструкции на этапе эксплуатации системы.

Маршруты обработки партий продуктов описываются матрицами $\|z_{js}^i\|$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J_i}$, $s = \overline{1, S}$, где s – номер аппарата, S – количество аппаратов МХП, J_i – количество стадий при производстве i -го продукта. Элементы матрицы принимают значения, равные единице, если технологические операции j -й стадии осуществляются при обработке партий i -го продукта в s -м аппарате и равны нулю в противном случае.

Выпуск продукции МХП характеризуется временем перехода с k -го продукта на l -й – Δt_{kl} ($k, l \in I$). Для этого рассчитывается время завершения обработки k -го продукта на j_k -й стадии по рекуррентному соотношению [62]. Это время определяет тот момент, когда продукт начинает передаваться из аппарата j_k -й стадии. Пусть в начальный момент времени при наработке k -го продукта система свободна, т.е.

$$t_{kj_k} = 0, \quad j_k \in J. \quad (4.1)$$

Тогда, согласно работе [62]:

$$t_{kj_k} = \begin{cases} t_{k(j_k-1)} + p_{k(j_k-1)} + \tau_{kj_k}, & \forall j_k, (j_k-1) \in J_b; \\ t_{k(j_k-1)} + \tau_{kj_k}, & \forall (j_k-1) \in J_b, j_k \in J_s, \end{cases} \quad (4.2)$$

где J_s, J_b – множества стадий, оснащенных аппаратами непрерывного и периодического действия, соответственно.

Время окончания обработки партии l -го продукта j_l -й стадии t_{j_l} определяется возможностью аппаратов стадий j_l и j_l+1 принять и обработать партию l -го продукта со стадий j_l-1 и j_l соответственно, что описывается множеством условий готовности Ω_2 .

Обычно, партия продукта после завершения обработки может временно храниться на стадии. Ряд последовательных стадий $A-B$, на которых хранение продукта не допускается, образуют блок нулевого ожидания (ZW). Для того, чтобы обеспечить режим нулевого ожидания в блоке ZW , необходимо задержать начало обработки партии продукта в аппарате стадии A на время запаздывания d_{kl} , определяемое по соотношениям Ω_3 [53].

Таким образом, время перехода с k -го на l -й продукт представим следующим образом:

$$\Delta t_{kl} = (t_{l_j} + p_{l_j}) - (t_{k_j^*} + p_{k_j^*}), \quad (4.3)$$

где J_l – последняя стадия при наработке l -го продукта; J_k^* – последняя стадия обработки партии k -го продукта, в аппарате которой обрабатывается партия l -го продукта:

$$J_k^* = \max_j j_k \quad \text{при} \quad z_{js}^k = z_{js}^j = 1; \quad (4.4)$$

$$j_k = \overline{J_k}, \quad j = \overline{1, J}, \quad s = \overline{1, S}. \quad (4.5)$$

Для описания процесса выпуска продукции во времени используется понятие расписания работы МХП, представляющее собой упорядоченную последовательность состояний, записываемую в виде вектора:

$$\bar{q}_A = \langle i_1, i_2, \dots, i_\alpha, \dots, i_A \rangle. \quad (4.6)$$

Под состоянием понимается наработка на ТС партии i -го продукта или остановка системы. Номер состояния соответствует номеру продукта из ассортимента I при $i_\alpha \leq I$. Состояния, для которых $i_\alpha > I$ соответствуют остановкам выпуска продукции.

Остановки МХП могут быть планируемыми, аварийными и вынужденными. К первому типу остановок относятся периоды проведения планово-предупредительных ремонтов, второй тип обуславливается внезапными отказами оборудования. Вынужденные остановки могут быть вызваны отсутствием на данное время необходимого сырья или переходом на наработку другого продукта.

Вектору состояний \bar{q}_A ставится в соответствие вектор их продолжительностей $\bar{\sigma}_A$:

$$\bar{\sigma}_A = \langle \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_\alpha, \dots, \lambda_A \rangle, \quad (4.7)$$

где λ_α – продолжительность состояния с порядковым номером α . Тогда время смены состояния с порядковым номером α определяется по соотношению:

$$T_\alpha = T_{\alpha-1} + \lambda_\alpha, \quad \alpha = 1, A \text{ при } T_0 = 0. \quad (4.8)$$

Рассмотрим различные варианты при определении продолжительностей состояний:

1. Пусть $i_{\alpha-1} = i_\alpha$. Это означает, что если $i_{\alpha-1}, i_\alpha \leq I$, то в период протекания двух последовательных состояний с номерами $\alpha-1$ и α нарабатывается один и тот же продукт. Следовательно, продолжительность состояния α определяется временем цикла для i -го продукта:

$$\lambda_\alpha = T_{Li}. \quad (4.9)$$

2. Пусть $i_{\alpha-1} \neq i_\alpha$ и $i_{\alpha-1}, i_\alpha \leq I$. Данный вариант соответствует случаю, когда происходит переход с выпуска одного продукта на другой. Продолжительность этого состояния рассчитывается по соотношению (4.3) с учетом условий Ω_2 , характеризующих готовность аппаратов МХП.

3. Пусть $i_{\alpha-1} > I$ и (или) $i_{\alpha+1} > I$. Тогда состояние i_α представляет собой тот случай, когда данному состоянию предшествует и (или) за ним следует полная остановка системы. В этом случае продолжительность λ_α рассчитывается по соотношению (4.3) с определением времени выпуска продукции:

$$\lambda_\alpha = t_{i_\alpha}. \quad (4.10)$$

4. Пусть $\alpha=1$. Это первое состояние ТС, которое началось в прошлом планируемом периоде и закончится в начале расчетного

периода. Тогда λ_1 будет равна продолжительности начального состояния t_n .

5. Пусть $i_\alpha > I$. Это состояние соответствует остановке выпуска продукции. Очевидно, что для уменьшения суммарных простоев оборудования и увеличения прибыли необходимо совмещать вынужденные остановки МХП с графиком проведения планово-предупредительных ремонтов оборудования, поэтому во время данного состояния целесообразно проведение ППР, попадающих по нормативам на время выпуска следующего продукта. При этом должно выполняться следующее ограничение:

$$i_\alpha \in \Delta_\beta, \quad (4.11)$$

где Δ_β – максимально возможное смещение β -го ремонта.

Продолжительность состояния i_α зависит от времени, необходимого на проведение ППР. По существующим нормативам на каждый ремонт оборудования отводится определенное число ремонтных рабочих и количество часов, необходимое для проведения ремонта. При планировании ремонта конкретного аппарата одной из ТС цеха на время t , часть ремонтов других аппаратов цеха может быть уже рассмотрена и определено время их проведения. Поэтому количество используемого ремонтного персонала цеха, при планировании ремонта определенного аппарата, является переменной величиной и зависит от времени проведения ремонтных работ на других ТС.

При планировании ремонта конкретного аппарата формируется временной отрезок $[t_1, t_2]$ согласно действующим нормативам на проведение ППР ТО, входящих в состав информационно-аналитического регламента МХП. При этом изменение величины используемого ремонтного персонала можно представить функцией $g(t)$ (рис. 4.1), ограниченной сверху числом ремонтных рабочих цеха:

$$\forall t: g(t) \leq G. \quad (4.12)$$

Величину $g(t)$ получаем в результате совмещения ремонтов с календарным планом работы ТС цеха по математической модели, рассматриваемой в разделе 4.2. На проведение β -го планово-предупредительного ремонта аппарата j -й стадии n -й ТС необходимо определенное число ремонтных рабочих η_β^{nj} . Так как на временном

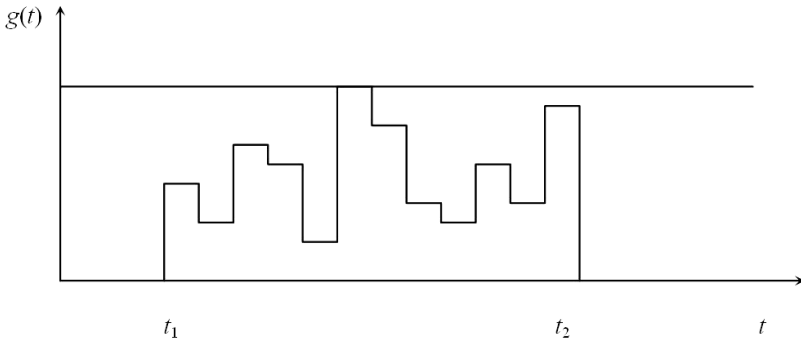


Рис. 4.1. Функция суммарных трудозатрат ремонтного персонала цеха отрезке планирования ремонта $[t_1, t_2]$ число свободных ремонтников цеха может быть как больше так и меньше η_{β}^{ij} , то проведение β -го ремонта может оказаться "растянутым" во времени и реальная продолжительность ремонта будет больше предполагаемой.

Таким образом, при планировании ППР конкретного аппарата его продолжительность определяется функционалом $\Delta t_{\beta}(g(t))$.

Так как продолжительность состояния i_{α} до включения в него ППР λ'_{α} может быть как больше, так и меньше продолжительности ремонта, то необходимо провести его коррекцию в случае, если ремонт не полностью попадает под это состояние. Продолжительность состояния i_{α} определяется по следующей формуле:

$$\lambda_{\alpha} = \max(\lambda'_{\alpha}, \lambda'_{\alpha} + \Delta t_{\beta}(g(t)) + t_{kj} + p_{kj} - t_{l(j-1)}), \quad (4.13)$$

где t_{kj} – время начала выгрузки k -го продукта со стадии проведения ППР j_j ; p_{kj} – продолжительность выгрузки k -го продукта со стадии проведения ППР; $t_{l(j-1)}$ – время поступления l -го продукта на стадию проведения ППР.

Если ППР невозможно перенести на состояние $i_{\alpha} > I$, то ремонт проводится перед состоянием, на который он попал по нормативам, т.е. после выгрузки партии продукта соответствующей стадии. При этом в случае, если $T_{Li} - T_{ij} \leq \Delta t_{\beta}(g(t))$, то в расписание вводится дополнительное состояние со следующей продолжительностью:

$$\lambda_{\alpha} = \Delta t_{\beta}(g(t)) - (T_{Li} - T_{ij}), \quad (4.14)$$

где T_{Li} – время цикла обработки i -го продукта; T_{ij} – время пребывания i -го продукта на j -й стадии.

В результате рассмотрения различных состояний функционирования химико-технологической схемы продолжительность α -го состояния находится следующим образом:

$$\lambda_{\alpha} = \begin{cases} t_n, & \alpha = 1; \alpha = \overline{1, A} \\ T_{Li_{\alpha}}, & i_{\alpha-1} = i_{\alpha}; i_{\alpha-1}, i_{\alpha} \leq I; \\ \Delta t_{i_{\alpha-1}i_{\alpha}}, & i_{\alpha-1} \neq i_{\alpha}; i_{\alpha-1}, i_{\alpha} \leq I; \\ t_{i_{\alpha}}, & (i_{\alpha-1} > I) \vee (i_{\alpha+1} > I); \\ \max(\lambda'_{\alpha}, \lambda'_{\alpha} + \Delta t_{\beta}(g(t)) + t_{kjl} + p_{kjl} - t_{l(jl-1)}), & \exists i_{\alpha} \in \Delta_{\beta}; i_{\alpha} > I; \\ \Delta t_{\beta}(g(t)) - (T_{Li} - T_{ij}), & \exists i_{\alpha} \notin \Delta_{\beta}; i_{\alpha} > I. \end{cases} \quad (4.15)$$

Таким образом, математическая модель выпуска продукции МХП, представленная соотношениями (4.1) – (4.15), множеством основных характеристик ТС Ω_1 , условиями готовности аппаратов различных стадий при переходе с наработки одного продукта на другой Ω_2 и условием обеспечения режима нулевого ожидания в блоке ZW Ω_3 , позволяет рассчитывать календарный план выпуска продукции на МХП с учетом проведения графика ППР в условиях ограниченности количества ремонтного персонала цеха.

4.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТОВ ТО

В существующих постановках задач оптимального календарного планирования выпуска продукции МХП, как правило, вводится допущение, что проведение технического обслуживания схемы и ремонтов аппаратов осуществляется во время, когда аппараты свободны от работы или за счет резервного фонда рабочего времени. При реальной эксплуатации МХП и построении графика ППР такой вариант проведения ремонтных работ является оптимальным, но не всегда выполнимым. Это накладывает дополнительные возмущения на решение задачи календарного планирования работы МХП.

В современных условиях спрос на продукцию МХП сильно меняется, причем как по ассортименту, так и объемам выпуска. Вместе с тем существуют перебои с поставкой сырья, незапланированные ремонты. Все это заставляет часто пересчитывать календарный план выпуска продукции, который может корректироваться ежемесячно для

нескольких МХП одновременно. Поэтому возникает задача автоматизированного построения графика ремонтных работ ТО, которая является внутренней по отношению к задаче оптимального календарного планирования работы совокупности ТС цеха. При ее решении необходимо достижение максимума получаемой прибыли для заданной последовательности наработки продуктов на ТС цеха.

В данной работе предлагается подход для решения задачи оптимального календарного планирования с учетом требований, накладываемых на эксплуатацию МХП при проведении планово-предупредительных ремонтов. Кроме того, существующие нормативы межремонтных периодов и циклов являются неизменными, несмотря на различные условия эксплуатации оборудования. В этой связи предлагается введение дифференцированных показателей обслуживания и ремонта аппаратов, учитывающих возможность функционирования оборудования в нормальных и тяжелых условиях.

В реальных производственных условиях необходимо рассчитывать графики ППР на все ТС цеха и учитывать при этом ограниченность количества ремонтного персонала. От расписания отдельно взятой ТС зависит график ППР ее оборудования. В свою очередь график ППР данной ТС является возмущением на расписания других систем, так как при его построении меняется ситуация по свободному ремонтному персоналу цеха во времени.

Величина прибыли, получаемой предприятием, напрямую зависит от выполнения плановых заданий в установленные сроки. В том случае, если за плановый период не удастся произвести необходимый объем продукции, на предприятие накладываются штрафные санкции. Время выполнения плановых заданий зависит от следующих факторов:

- последовательности наработки продуктов заданного ассортимента МХП цеха. Это объясняется различным временем переходов с выпуска одного продукта на другой, включая переналадку и промывку оборудования, а также возможностью совпадения времени ремонтов оборудования на разных ТС при ограниченности количества ремонтного персонала;

- последовательности совмещения ППР цехового оборудования с календарным планом работы совокупности ТС цеха. Это объясняется различной эффективностью использования рабочего времени ремонтного персонала.

Очевидно, что лучшим расписанием работы МХП цеха будет такое расписание, при котором получаемый цеховой график ППР позволяет выполнить плановые задания за минимальное время. Для получения расписания необходимо перебрать все возможные варианты последовательностей наработки продуктов МХП с определением лучшего из них. Для каждого варианта расписания необходимо

перебрать и проанализировать все возможные варианты совмещения графика ремонтов с календарным планом работы ТС цеха.

Введем следующие допущения для создания математической модели автоматизированного построения графика ППР:

1. На всех ТС цеха продукты нарабатываются последовательно и для них действуют допущения, принятые в разделе 4.1.
2. График ППР включает сроки проведения текущих и капитальных ремонтов.
3. Аппараты для каждой стадии имеют одинаковую наработку.
4. ППР могут переноситься в пределах допустимой нормативами окрестности.
5. ППР не проводятся во время ожидания ТО при заполненном аппарате.

Расписание работы оборудования цеха может быть представлено совокупностью расписаний отдельных МХП. Пусть N – количество ТС цеха. Расписание работы оборудования цеха \tilde{q} представим следующим образом:

$$\tilde{q} = \left\{ \left\langle i_1^1, i_2^1, \dots, i_\alpha^1, \dots, i_{A_1}^1 \right\rangle, \right. \\ \left. \left\langle i_1^2, i_2^2, \dots, i_\alpha^2, \dots, i_{A_2}^2 \right\rangle, \right. \\ \dots, \\ \left. \left\langle i_1^n, i_2^n, \dots, i_\alpha^n, \dots, i_{A_n}^n \right\rangle, \right. \\ \dots, \\ \left. \left\langle i_1^N, i_2^N, \dots, i_\alpha^N, \dots, i_{A_N}^N \right\rangle \right\}, \quad (4.16)$$

где i_α^n – состояние функционирования n -й ТС с порядковым номером α ; A_n – число состояний функционирования n -й ТС.

Кроме множества векторов состояний функционирования ТС \tilde{q} работу цеха описывает множество продолжительностей состояний $\tilde{\sigma}$:

$$\begin{aligned}
\tilde{\sigma} = & \left\langle \lambda_1^1, \lambda_2^1, \dots, \lambda_\alpha^1, \dots, \lambda_{A_1}^1 \right\rangle, \\
& \left\langle \lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_\alpha^2, \dots, \lambda_{A_2}^2 \right\rangle, \\
& \dots, \\
& \left\langle \lambda_1^n, \lambda_2^n, \dots, \lambda_\alpha^n, \dots, \lambda_{A_n}^n \right\rangle, \\
& \dots, \\
& \left\langle \lambda_1^N, \lambda_2^N, \dots, \lambda_\alpha^N, \dots, \lambda_{A_N}^N \right\rangle,
\end{aligned} \tag{4.17}$$

где λ_α^n – продолжительность состояния функционирования n -й ТС с порядковым номером α .

Построение нормативных сроков проведения ППР осуществляется в расчете на планируемый период следующим образом. Пусть на начало планируемого периода j -й аппарат n -й ТС имеет наработку t_{0j}^n . Время наработки при выпуске всего ассортимента продукции составляет T_j^n для j -го аппарата n -й ТС. Тогда учитывая рассмотрение N технических систем, количество капитальных и текущих ремонтов для j -го аппарата n -й ТС в течение планируемого периода определяется следующим образом:

$$K_j^n = \left\lceil \frac{T_j^n + t_{0j}^n}{\Delta t_{Пj}^n} \right\rceil; \tag{4.18}$$

$$M_j^n = \left\lceil \frac{\Delta t_{Пj}^n - t_{0j}^n}{\Delta t_{Пj}^n} \right\rceil + \left\lceil \frac{T_j^n + t_{0j}^n - \Delta t_{Пj}^n}{\Delta t_{Пj}^n} \right\rceil, \tag{4.19}$$

где K_j^n – число капитальных ремонтов (КР) за планируемый период;
 M_j^n – число текущих ремонтов (ТР) за планируемый период;
 $\Delta t_{Пj}^n$, $\Delta t_{Пj}^n$ – межремонтный цикл и период для j -го аппарата n -й ТС; $[a]$ – ближайшее к a целое число, не превышающее a .

При определении времени начала проведения КР и ТР необходимо учитывать, что на стадиях ТС могут быть установлены как один аппарат, так и несколько аппаратов, имеющих одинаковые конструктивные параметры. Тогда для стадий, на которых число аппаратов равно единице, моменты начала проведения КР и ТР рассчитываются:

$$t_{\text{КР}1j}^n = \Delta t_{\text{Ц}j}^n - t_{0j}^n; \quad (4.20)$$

$$t_{\text{ТР}1j}^n = t_{\text{КР}1j}^n - \left[\frac{\Delta t_{\text{Ц}j}^n - t_{0j}^n}{\Delta t_{\text{Ц}j}^n} \right] \Delta t_{\text{Ц}j}^n; \quad (4.21)$$

$$t_{\text{КР}y_j}^n = t_{\text{КР}1j}^n + (y-1) \Delta t_{\text{Ц}j}^n, \quad y = 2, \overline{K_j^n}; \quad (4.22)$$

$$t_{\text{ТР}x_j}^n = t_{\text{ТР}1j}^n + (x-1) \Delta t_{\text{Ц}j}^n, \quad x = 2, \overline{M_j^n}; \quad (4.23)$$

где индексы y и x указывают порядковый номер КР и ТР соответственно.

На стадиях, где установлено по одному аппарату, проведение планово-предупредительных ремонтов возможно, как правило, лишь при остановке выпуска продукции. Чтобы избежать остановок ТС при проведении КР и ТР для стадий, на которых установлено два и более аппаратов, необходимо распределить моменты начала ремонтов аппаратов так, чтобы ремонты не накладывались друг на друга и схема не останавливалась.

Отметим, что это возможно лишь для стадий, аппараты которых способны принять и обработать партию продукта целиком. Такой вариант является характерным для рассматриваемого класса производств.

Отправными значениями времени начала проведения КР и ТР являются значения, полученные по зависимостям (4.20) – (4.23). Распределение осуществляется в пределах, установленных нормативами на отклонение для межремонтного цикла $\pm 10\%$ и для межремонтного периода $\pm 15\%$.

Опираясь на существующую информацию о работе оборудования в различных условиях, а также на данные экспертов, рассчитываются коэффициенты и по согласованию с контролирующей организацией проводится обоснованная коррекция значений межремонтных периодов и циклов ТО в зависимости от веса каждого коэффициента. Существенную помощь в решении данной проблемы может оказать накопленная статистическая информация по отказам аналогичного оборудования, функционирующего в схожих условиях на других промышленных предприятиях, которая накапливается в автоматизированной системе поддержки прогнозирования надежности функционирования ПиА МХП (глава 2).

Таким образом, мы получили модельные соотношения, позволяющие определить количество и время начала проведения текущих и капитальных ремонтов. Как отмечалось выше, момент начала ТР и КР можно переносить в пределах $\pm 15\%$ и $\pm 10\%$

соответственно от $\Delta t_{Пj}^n$ и $\Delta t_{Цj}^n$. Это позволяет получить оптимальный график плано-предупредительных ремонтов, варьируя значениями $t_{ТР,ij}^{mf}$ и $t_{КР,ij}^{mf}$ в указанных интервалах.

Рассмотрим более подробно планирование проведения ремонтных работ для оборудования совокупности ТС цеха в условиях ограниченности количества ремонтного персонала. Множество всех ремонтов цеха за планируемый период имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{r} = \{ & \langle t_1^{1j}, t_2^{1j}, \dots, t_\beta^{1j}, \dots, t_{B_1}^{1j} \rangle, \\ & \langle t_1^{2j}, t_2^{2j}, \dots, t_\beta^{2j}, \dots, t_{B_2}^{2j} \rangle, \\ & \dots, \\ & \langle t_1^{nj}, t_2^{nj}, \dots, t_\beta^{nj}, \dots, t_{B_n}^{nj} \rangle, \\ & \dots, \\ & \langle t_1^{Nj}, t_2^{Nj}, \dots, t_\beta^{Nj}, \dots, t_{B_N}^{Nj} \rangle \}. \end{aligned} \tag{4.24}$$

Каждый элемент множества \tilde{r} имеет следующую индексацию: β – порядковый номер ремонта; n – номер ТС, на которой проводится ремонт; j – номер ремонтируемого аппарата; $t_\beta^{nj} = 1$ – текущий ремонт; $t_\beta^{nj} = 2$ – капитальный ремонт. В множество \tilde{r} входят все ППР цеха, моменты начала которых рассчитаны по соотношениям (4.18) – (4.23) и при решении задачи выбора оптимальной стратегии ремонта к ним добавляется ремонт, планируемый на время t . Необходимо также учитывать тот факт, что в течение проведения β -го ремонта n -й ТС величина свободного ремонтного персонала постоянно меняется, в связи с началом или окончанием ремонтов других систем.

Следовательно, задача оптимального совмещения ремонтов оборудования с календарным планом работы ТС цеха заключается в поиске такого варианта совмещения множеств \tilde{r} и \tilde{q} , при котором "условная" прибыль была бы максимальной.

При рассмотрении ремонтов одной ТС для ее произвольного перестановочного расписания достаточно было бы перебрать все состояния, на которые попали ремонты, с первого до последнего, и в случае необходимости корректировать продолжительность данных состояний.

При рассмотрении ремонтов всех ТС цеха возникает вопрос, в какой последовательности совмещать ремонты цеха \tilde{r} с расписанием

работы \tilde{q} . Самый простой способ, последовательно для всех ТС, начиная с первой, совмещать вектора их ремонтов с векторами состояний. В результате такого совмещения загруженность ремонтного персонала может оказаться малоэффективной. Кроме того, может произойти запаздывание начала наработки продукта, следующего за ремонтом, на той схеме, на которой оно более всего нежелательно.

Для описания произвольной последовательности совмещения множеств \tilde{q} и \tilde{r} в общем случае введем дополнительное множество \tilde{c} :

$$\begin{aligned} \tilde{c} = \{ & \langle c_1^{1j}, c_2^{1j}, \dots, c_{\beta}^{1j}, \dots, c_{B_1}^{1j} \rangle, \\ & \langle c_1^{2j}, c_2^{2j}, \dots, c_{\beta}^{2j}, \dots, c_{B_2}^{2j} \rangle, \\ & \dots, \\ & \langle c_1^{nj}, c_2^{nj}, \dots, c_{\beta}^{nj}, \dots, c_{B_n}^{nj} \rangle, \\ & \dots, \\ & \langle c_1^{Nj}, c_2^{Nj}, \dots, c_{\beta}^{Nj}, \dots, c_{B_N}^{Nj} \rangle. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Элемент c_{β}^{nj} представляет собой "приоритет" ремонта r_{β}^{nj} и определяет порядковый номер его совмещения с календарным планом работы ТС цеха \tilde{q} . Варианты множества \tilde{c} формируются в виде дерева перебора вариантов для каждого \tilde{q} .

Так как при совмещении ремонта r_{β}^{nj} с календарным планом работы ТС цеха величина свободного ремонтного персонала является переменной от времени, то для расчета реального времени на проведение ремонта r_{β}^{nj} , в условиях ограниченности количества ремонтного персонала, необходимо выполнить следующее:

$$\forall n, j, i_{\alpha} > I \left\{ \begin{array}{l} t = t_{kj}^n + p_{kj}^n; \quad d = 0 \\ t = t + h \\ g(t) = g(t) + \eta_{\beta}^{nj} \\ d = d + h \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} g(t) + \eta_{\beta}^{nj} < G \\ d < \tau_{\beta}^{nj} \end{array} \right\} \quad (4.26)$$

$$\Delta t_{\beta}^{nj} = t - t_{kj}^n - p_{kj}^n + \Delta h.$$

Здесь t_{kj}^n – время завершения обработки последней партии k -го продукта, нарабатываемого на n -й ТС, после выгрузки которого

размещается во времени ремонт r_{β}^{nj} ; P_{kji}^n – продолжительность выгрузки k -го продукта; τ_{β}^{nj} и η_{β}^{nj} – общее число часов и количество ремонтного персонала, необходимых для проведения ремонта r_{β}^{nj} ; $g(t)$ – функция суммарных трудозатрат ремонтного персонала цеха; G – число ремонтных рабочих цеха; t – время от начала проведения ремонта; d – время, затраченное на ремонт; Δh – произвольная дискретность времени (часы, минуты и т.п.).

Началу ремонта r_{β}^{nj} будет соответствовать окончание выгрузки k -го продукта n -й схемы, что определяется первым уравнением системы (4.26). Зная общее число дней τ_{β}^{nj} и количество ремонтного персонала η_{β}^{nj} , необходимое для проведения ремонта, проводится постепенное его размещение во времени. При этом, ввиду ограниченности количества ремонтного персонала цеха, текущий ремонт может проводиться с "разрывами" во времени, так как ремонтники могут временно сниматься с выполнения текущего задания для проведения другого, более важного или "лимитирующего" по времени ремонта. Поэтому реальная продолжительность ремонта r_{β}^{nj} , т.е. время от начала проведения ремонта до его завершения, включая "разрывы", может быть больше τ_{β}^{nj} .

В процессе размещения очередного ремонта корректируется функция суммарных трудозатрат ремонтного персонала цеха $g(t)$.

затраченных на ремонт, становится равным нормативному времени на его проведение.

На рисунке 4.2 представлен пример рассчитанного календарного плана цеха азокрасителей ОАО "Пигмент" до и после его совмещения с графиком ППР ТОО. Цех состоит из 5 ТС. За планируемый период, в расчете на один квартал, на первой, четвертой и пятой ТС нарабатываются по четыре продукта, на второй и третьей – по три. Количество ремонтного персонала цеха равно 10 человек. Количество аппаратов на схемах ТС № 1–5 равно 8, 6, 8, 3 и 5, соответственно. Для наглядности представления результатов дискретность по времени была принята одним суткам.

Малые горизонтальные прямоугольники на рис. 4.2 описывают базовые стартовые времена ППР, число человек и дней, необходимых на ремонт по нормативам. Вертикальные прямоугольники внизу рисунка представляют собой полученную функцию суммарных трудовозатрат на ремонтные работы цехового оборудования.

Для произвольной последовательности наработки продуктов на ТС \tilde{q} , задаваемой алгоритмом решения задачи оптимального календарного планирования, по математическим моделям функционирования МХП рассчитывается первоначальный календарный план производства без учета совмещения с ППР.

На рисунке 4.2 представлен календарный план со следующей последовательностью наработки продуктов на схемах \tilde{q} :

$$\tilde{q} = \{ \langle 1, 4, 3, 2 \rangle, \langle 6, 7, 5 \rangle, \langle 9, 8, 10 \rangle, \langle 12, 13, 14 \rangle, \langle 18, 15, 17, 16 \rangle \}. \quad (4.27)$$

На рисунке 4.3 изображен фрагмент календарного плана работы первой и третьей ТС и функция суммарных трудовозатрат, полученная после совмещения трех ремонтов аппаратов этих систем с текущим вариантом календарного плана. Из рисунка видно, что полученные продолжительности ремонтов Δt_{β}^{nif} в основном превышают времена переходов с наработки одного продукта на другой, поэтому начало наработки следующего продукта переносится на более поздний срок. Функция суммарных трудовозатрат изменяется в соответствии с проведением ремонтов.

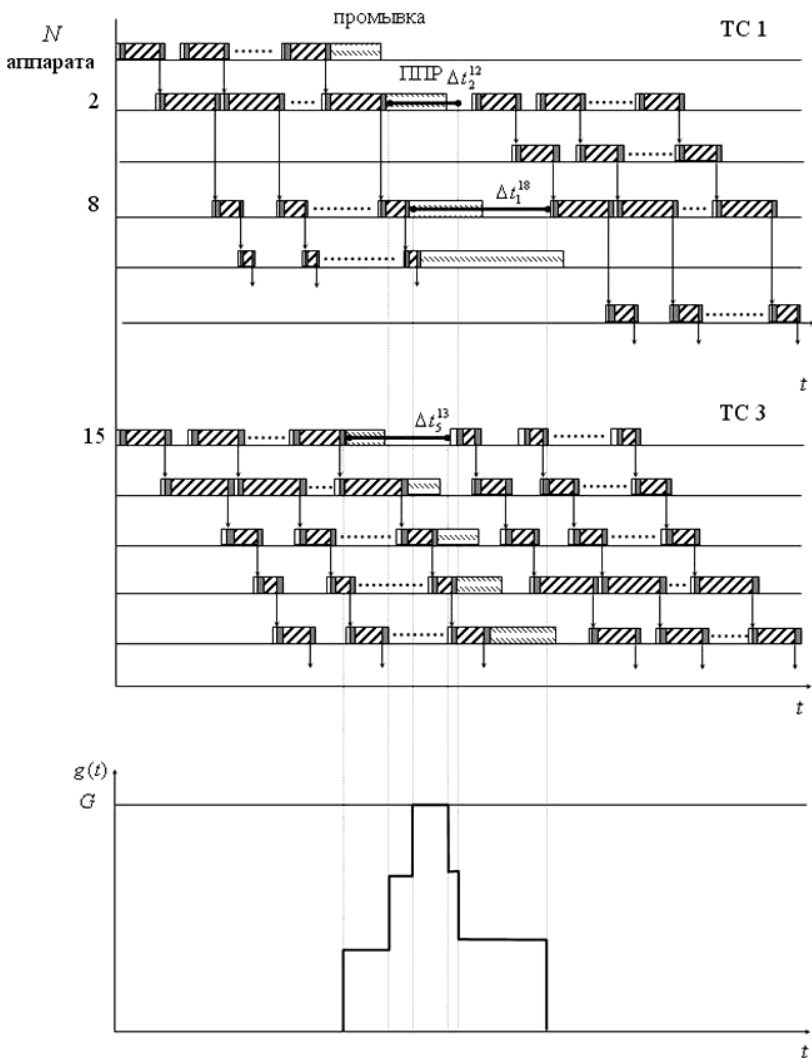


Рис. 4.3. Фрагмент календарного плана двух ТС и функция суммарных трудозатрат, полученная после совмещения трех ремонтов с календарным планом

По уравнениям (4.18) – (4.23) и соотношению (4.26) проведено оптимальное совмещение графика ремонтов с календарным планом работы ТС цеха. Проведена коррекция продолжительности состояний функционирования систем (4.17).

Таким образом, представленная математическая модель автоматизированного построения графика ППР ТО дает возможность построения календарного плана выпуска продукции с учетом проведения ремонтных работ и ограниченности количества ремонтного персонала.

4.3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ СОВОКУПНОСТИ ТС ЦЕХА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОСТИ КОЛИЧЕСТВА РЕМОТНОГО ПЕРСОНАЛА

При постановке задачи оптимального календарного планирования введем критерий оптимальности решения задачи и необходимые ограничения. В условиях рынка важнейшим показателем экономической эффективности производства является прибыль, представляющая собой разность суммы, полученной от реализации продукции, и затратами на ее производство.

С учетом работ [47, 70] в качестве критерия оптимальности решения задачи будем использовать понятие "условная" прибыль при расчете которой не учитываются затраты, не подверженные изменениям при варьировании параметров оптимизации. "Условная" прибыль определяется:

$$\begin{aligned}
 P &= S - Z^C - Z^Э - Z^П - Z^Ш - Z^{PEM} = \\
 &= \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} (Q_{i0}^n + Q_i^n) C_{Pi}^n - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{m=1}^M (R_{im}^n C_{Cm}) Q_i^n - \\
 &- \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{j=1}^J z_{ij}^Э L_{ij}^n Q_i^n - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} \sum_{j=1}^J \left\{ (\Delta Q_{ij}^n L_{ij}^n C_{Pi}^n + z_{Pij}^n L_{ij}^n) \sum_{i=1}^{I_n} T_{ii}^n \right\} - \\
 &- \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} (Q_{Плi}^n - Q_i^n) h_i^n - \sum_{\beta=1}^B \sum_{g=1}^G C_{g\beta}^{3,ч}, \tag{4.28}
 \end{aligned}$$

где S – сумма, полученная от реализации продукции; C_{Pi}^n – цена i -го продукта, выпускаемого на n -й ТС; Q_{i0}^n – запас i -го продукта n -й ТС на начало планируемого периода; Q_i^n – выпуск i -го продукта n -й ТС за планируемый период; Z^C – затраты на сырье; R_{im}^n – расходная норма m -го компонента сырья на 1 т i -го продукта n -й ТС; C_{Cm} – цена сырья; $Z^Э$ – эксплуатационные затраты; $z_{ij}^Э$ – затраты на

эксплуатацию аппарата при выпуске i -го продукта; $Z^{\text{П}}$ – экономические потери при переходе с продукта на продукт; ΔQ_{ij}^n – потери i -го продукта n -й схемы при промывке аппарата j -й стадии; L_{ij}^n – число параллельных аппаратов на j -й стадии n -й схемы при выпуске партии i -го продукта; T_{ij}^n – количество переходов с выпуска i -го продукта на l -й продукт на n -й схеме; $Z^{\text{Ш}}$ – штрафные выплаты за несвоевременную поставку продукции; $Q_{\text{ПЛ}i}^n$ – плановое задание по выпуску i -го продукта на n -й схеме; h_i^n – сумма штрафа за недопоставку 1 т i -го продукта n -й схемы; $Z^{\text{РЕМ}}$ – суммарные затраты на покупку запасных частей при проведении ремонтов; $C_{g\beta}^{3, \text{ч}}$ – стоимость запасной части g при проведении ремонта β .

Сформулируем следующие ограничения задачи.

Количество каждого i -го продукта n -й ТС, произведенного за планируемый период Q_i^n , а также его начальный запас Q_{i0}^n не должны превышать потребностей, т.е.

$$Q_{i0}^n + Q_i^n \leq Q_{\text{ПЛ}i}^n. \quad (4.29)$$

Количество израсходованного сырья за планируемый период не должно превышать имеющихся запасов, складывающихся из количества сырья, поступившего для производства и его остатков:

$$S_{m\text{ИЗР}} \leq S_{m\text{ИЗР}}^{\text{н}} + (S_m^0 - S_{m\text{ИЗР}}^0), \quad m = \overline{1, M}. \quad (4.30)$$

Исходя из вместимости существующих на предприятии хранилищ, суммарное оставшееся количество продуктов нарабатываемого ассортимента не должно превышать емкости хранилища D :

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} (Q_i^n - Q_{\text{ПЛ}i}^n) \leq D. \quad (4.31)$$

При проведении планово-предупредительных ремонтов необходимо соблюдать действующие нормативы, т.е.

$$t_{\beta}^{\text{НОРМ}} - \Delta_{\beta} t_{\beta} \leq t_{\beta}^{nj} \leq t_{\beta}^{\text{НОРМ}} + \Delta_{\beta} t_{\beta}. \quad (4.32)$$

Постановка задачи оптимального календарного планирования работы ТС цеха в условиях ограниченности количества ремонтного персонала формулируется следующим образом.

Необходимо найти множества следующих векторов: состояний функционирования ТС цеха \tilde{q} (4.16), продолжительностей состояний функционирования $\tilde{\sigma}$ (4.17), последовательности проведения планово-предупредительных ремонтов \tilde{r} (4.24) и последовательности их совмещения с расписанием \tilde{c} (4.25), при которых "условная" прибыль достигает максимума

$$\{\tilde{q}^*, \tilde{\sigma}^*, \tilde{r}^*, \tilde{c}^*\} = \arg \max_{\tilde{q}, \tilde{\sigma}, \tilde{r}, \tilde{c}} P(\tilde{q}, \tilde{r}, \tilde{c}, Z^c, Q_i^n, \Delta Q_{ij}^n, h_i^n) \quad (4.33)$$

при выполнении уравнений связи в виде математических моделей выпуска продукции (4.1) – (4.15) и автоматизированного построения графика ремонтных работ ТО (4.18) – (4.23), (4.26) и следующих ограничений:

- на производительность ТС (4.29);
- наличие сырья (4.30);
- на хранение готового продукта (4.31);
- на число ремонтных рабочих цеха (4.12);
- на проведение планово-предупредительных ремонтов (4.32).

Данная задача календарного планирования работы совокупности ТС цеха позволяет обеспечить оптимальный режим работы оборудования в условиях ограниченности количества ремонтного персонала.

4.4. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ МХП

Основной задачей оперативного управления совокупности МХП цеха на этапе эксплуатации является выпуск продукции заданного объема и ассортимента в установленные плановыми заданиями сроки при выполнении требований технического обслуживания и ремонта ТО. При нарушении нормального функционирования оборудования возникает необходимость выбора оптимальной стратегии его ремонта, связанной с решением задачи оптимального календарного планирования работы ТС цеха для каждого из возможных вариантов ремонта с целью определения затратных составляющих, связанных с уменьшением прибыли в результате простоя при проведении ремонтных работ.

Рассматриваемая задача представляет собой поиск таких расписаний работы ТС цеха, при которых критерий оптимизации в виде "условной" прибыли достигает максимума. При этом затратные составляющие, связанные с уменьшением прибыли в результате простоя на ремонт достигают минимума, а цеховой график ППР,

получаемый по расписаниям работы совокупности ТС и ремонтным нормативам оборудования, позволяет выполнить плановые задания за минимальное время в условиях ограниченности количества ремонтного персонала.

Решение данных задач осуществляется многократно в процессе эксплуатации МХП в связи с наличием частых возмущений, накладываемых вследствие выхода из строя оборудования, изменения плановых заданий выпуска продукции, сбоя в поставке сырья и др. При этом необходимо оперативно обрабатывать огромные объемы информации, связанные с особенностями технологического оборудования, производственными регламентами выпуска продуктов, маршрутами выпуска, текущим состоянием ТО, нормативами проведения ППР, экономическими показателями. Поиск наилучших решений невозможен без применения современных методов оптимизации и разработки алгоритмов, опирающихся на использование передовых вычислительных технологий, программных и технических решений [1, 62 – 79].

Рассмотрим структуру предлагаемой автоматизированной системы календарного планирования МХП. Данная система осуществляет решение следующих задач:

- оценка емкости рынка по выпускаемому ассортименту продукции для формирования планового задания;
- оперативный анализ текущего состояния ТО на основе взаимодействия с автоматизированной системой управления технологическим процессом производства;
- взаимодействие с экспертной системой технической диагностики состояния оборудования с целью выбора оптимальной стратегии ремонта ТО;
- построение графика планово-предупредительных ремонтов технологического оборудования;
- формирование оптимального календарного плана работы совокупности ТС цеха в условиях ограниченности количества ремонтного персонала;
- взаимодействие с единой информационной образовательной средой;
- формирование отчетной документации.

Основной блок исходных данных для решения представленных задач – данные о структуре МХП, маршрутах выпуска продукции, длительностях обработки партий, нормативах проведения ремонтных работ и другие сосредоточен в информационно-аналитических регламентах МХП цеха (глава 1). Именно на их основе становится возможным оперативное решение задач этапа эксплуатации МХП и организация взаимодействия с экспертной системой технической

диагностики состояния ТО, автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП), системой оперативного управления производством (СОУ) и единой информационно-образовательной средой.

На основании данных, поступающих из внешней среды (рынки реализации продукции, предприятия-потребители выпускаемой продукции, ярмарки, выставки, аналитические отчеты и др.) и внутренней маркетинговой службы предприятия, автоматизированная система календарного планирования позволяет осуществить предварительную оценку емкости рынка выпускаемой продукции.

Для решения задачи оптимального календарного планирования работы совокупностей ТС цеха исходной информацией является количество продукции заданного ассортимента, которое должно быть выпущено за планируемый период. Оценка емкости рынка и формирование прогноза по ассортименту и объемам выпуска продукции емкости рынка является трудной, неформальной во многих случаях задачей. Поэтому в данном модуле автоматизированной системы реализованы следующие методы определения потребности в выпускаемой продукции [82 – 84]: нормативный, статистико-экстраполяционный и метод экспертных оценок. Для получения наилучшей оценки показателя $Q_{ПЛИ}$ необходимо привлечение всех трех указанных методов.

Оценка текущего состояния технологического оборудования и МХП в целом осуществляется на основе информации, поступающей от АСУ ТП. Современные SCADA-системы дают возможность решать задачи непосредственно связанные с реализацией производственного процесса, предоставляют множество средств и методов взаимодействия и обмена данными с другими информационными системами.

На основе данных, полученных от контрольно-измерительных приборов, установленных на МХП, экспертная система технической диагностики по текущим значениям измеряемых параметров, а также динамике их изменения дает возможность отследить первые признаки появления дефектов и дать прогноз их развития в течение времени. Это необходимо для предотвращения аварий, а также для формирования оптимальной стратегии проведения ремонта ТО (глава 3).

Кроме того, наличие датчиков времени работы ТО и их опрос АСУ позволяет контролировать фактическое время наработки оборудования, в течение которого оно было задействовано в выпуске продукции. Это особенно важно при решении задачи построения графика планово-предупредительных ремонтов ТО, так как именно на

основе данных значений принимается решение о сроках проведения каждого вида технического обслуживания и ремонта.

Взаимосвязь автоматизированной системы календарного планирования работы МХП с системой оперативного управления необходима для получения информации об экономических показателях производства (стоимость продукции, сырья, запасных частей; нормативы расхода сырья и энергии; наличие договоров на выпуск продукции; количество ремонтного персонала, задействованного на МХП и др.). Применение современных систем оперативного управления производством, построенных на базе систем класса ERP, позволяет оперативно предоставить данную информацию для расчета оптимального календарного плана выпуска продукции и построения графика планово-предупредительных ремонтов ТО. Результаты решения задач календарного планирования возвращаются в СОУ для изменения соответствующих данных и документов.

Информационный обмен между автоматизированной системой календарного планирования работы МХП и единой информационно-образовательной средой необходим для организации обучения и повышения квалификации операторов, обслуживающего и ремонтного персонала с целью уменьшения негативного влияния человеческого фактора на надежность функционирования МХП.

Автоматизированная система календарного планирования работы МХП на основе имеющихся данных и производимых расчетов позволяет генерировать необходимые отчеты и документы – календарный план выпуска продукции на заданную производительность, график планово-предупредительных ремонтов на месяц и год, ведомости дефектов на проведение ремонтов и др.

Для Тамбовского ОАО "Пигмент" были разработаны математические модели выпуска продукции и автоматизированного построения графика планово-предупредительных ремонтов ТО с последующей программной реализацией на языке Clarion 2.1.

Таким образом, представленная структура автоматизированной системы календарного планирования работы МХП позволяет в режиме оперативного управления производством производить выбор оптимальной стратегии проведения ремонта технологического оборудования при возникновении признаков его дефекта, формировать календарный план выпуска продукции на совокупности ТС цеха в соответствии с текущими потребностями рынка и графиком планово-предупредительных ремонтов ТО, а также осуществлять взаимодействие с автоматизированной системой управления технологическим процессом, системой оперативного управления производством и единой информационно-образовательной средой.

5. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОФИЛЯ

5.1. СТРУКТУРА АИС НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОФИЛЯ

Специфика предоставляемых образовательных услуг требует единого системного подхода к ее проектированию как всесторонне развитого живого организма, способного к самостоятельному росту и всестороннему развитию. Целевой функцией в данном случае становится качество и эффективность предоставляемых образовательных услуг при максимальном удобстве пользования обучающимися и высокой надежности работы всей системы.

Модель непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля представим следующим образом:

$$P_{i,j} = K(C, R, E_j, S_i, ALP_i, V_j, TR_j, L_j, G_j), \quad (5.1)$$

где $P_{i,j}$ – множество пользователей, обучающихся по i -й программе из множества программ обучения и повышения квалификации I ; j – множество контролируемых знаний, умений, навыков, компетенций, соответствующих выбранной программе обучения или повышения квалификации; C – множество информационно-коммуникационных средств, образующих коммуникационное пространство обучения; R – множество преподавателей и сотрудников, задействованных в образовательном процессе; E_j – множество электронных учебно-методических изданий, используемых в i -й программе обучения; S_i – множество распределенных баз данных; ALP_i – множество автоматизированных лабораторных практикумов; V_j – множество виртуальных объектов; TR_j – множество виртуальных тренажеров; L_j – множество лабораторного оборудования, стендов и установок удаленного доступа; G_j – множество производственных баз удаленного доступа.

Использование информационных технологий и средств коммуникации при подготовке специалистов инженерного профиля требует создания информационно-образовательной среды (ИОС), объединяющей лучший кадровый потенциал ведущих университетов, новейшие учебно-методические разработки, уникальное лабораторное

оборудование. Ее построение осуществляется на базе региональных учебных заведений, имеющих свои виртуальные филиалы в Интернет и объединенных единой системой поиска и навигации.

Рассмотрим подробнее структуру центральной системы информационно-образовательной среды – АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля, разработанную на основе модели (5.1) и применении современных информационно-коммуникационных технологий.

Доступ обучающегося к образовательным ресурсам осуществляется посредством сети Интернет через коммуникационное пространство, включающее:

- внешние ресурсы (e-mail, ICQ и др.), поддерживаемые в сети Интернет, с целью предоставления различных услуг коммуникационного характера, которые могут быть использованы не только для обучения;

- внутренние ресурсы (образовательные web-сайты, чаты, видеоконференции и др.), используемые, как правило, только для учебного процесса, разработанные или адаптированные в рамках проекта по созданию информационно-образовательной среды, и предназначенные для обеспечения доступа к другим образовательным ресурсам или организации связи между преподавателем и обучающимся.

После прохождения регистрации и идентификации на базовом сайте обучающемуся предоставляется возможность удаленного доступа к следующим образовательным ресурсам, составляющим информационную основу АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля:

1. Библиотека электронных изданий. Включает полнотекстовые иллюстрированные электронные версии основных учебных пособий, методических указаний и справочной литературы, используемых для обучения по дисциплинам различных программ подготовки. Технология их организации основана на понятии гипертекста, позволяющего представить текстовую информацию нелинейным способом, используя связи внутри документов и между ними. Применение средств HTML, DHTML, мультимедиа, 3D-графики, flash, Java-апплетов и других дают возможность создавать и представлять в сети Интернет интерактивные электронные учебные пособия на высоком научном и методическом уровне. Взаимодействие с распределенными базами данных позволяет создавать справочные пособия с возможностью формирования запросов и быстрого поиска необходимой справочной информации. Создание открытых библиотек электронных учебно-методических пособий позволит в значительной

степени решить проблему нехватки методической и справочной литературы, а также ускорить процесс ее издания.

2. Библиотека автоматизированных лабораторных практикумов (АЛП) удаленного доступа. На ее базе осуществляется проведение расчетно-графических и лабораторных работ по различным дисциплинам. В ее состав входят три группы АЛП:

а) расчетно-имитационные АЛП, которые дают возможность обучающемуся в интерактивном режиме исследовать протекание тех или иных процессов и явлений на основе разработанных математических моделей;

б) АЛП на базе лабораторного оборудования позволяют дистанционно в режиме on-line проводить эксперименты на лабораторных стендах и установках, осуществлять необходимое управление ими и снимать показания с приборов с целью последующей обработки;

в) АЛП на производственной базе дают возможность обучающемуся наблюдать реальный производственно-технологический процесс на оборудовании предприятий в режимах on-line или off-line.

Разработка библиотек АЛП удаленного доступа дает возможность предоставления полноценного спектра дистанционных образовательных услуг по различным направлениям подготовки специалистов инженерного профиля, а также использовать их в традиционных формах образования вне зависимости от территориального размещения образовательного учреждения, лабораторной и производственной базы.

3. Библиотека распределенных баз данных. В ее состав входят базы данных, содержащие справочную информацию, необходимую для проведения практических занятий, лабораторных работ, курсового и дипломного проектирования по различным дисциплинам инженерного профиля, а также программное обеспечение, позволяющее обучающемуся самостоятельно формировать поисковые запросы для оперативного нахождения интересующих данных. Отдельные базы данных могут быть распределены на различных серверах. Вся информация, которая в них содержится, представляется в режиме дистанционного доступа в сети Интернет, что дает возможность обучающемуся получать все необходимые для расчетов данные, используя лишь свой ПК и ресурсы сети как в образовательном учреждении, так и у себя дома.

4. Библиотека виртуальных объектов. Включает визуализированные модели изучаемых объектов, процессов и явлений. Они дают возможность наглядно представить конструкцию того или иного изделия (3D-модели, виртуальные объекты и др.), отслеживать

изменение его параметров функционирования при коррекции входных воздействий, как на базе математических моделей, так и реальных объектов. Элементы данной библиотеки используются как составные части при разработке различных АЛП удаленного доступа и электронных учебных пособий, что значительно повышает их наглядность и функциональность.

5. Программное обеспечение дистанционного самоконтроля знаний обучающегося. В его состав входят распределенные базы данных с вопросами, иллюстрациями и ответами по различным темам самоконтроля, а также программное обеспечение по проведению дистанционного опроса и анализа полученного результата. Данная система позволяет обучающемуся самостоятельно дистанционно контролировать процесс усвоения знаний и дает возможность обоснованного перемещения по образовательной траектории в информационном пространстве. При соответствующем организационном обеспечении данный модуль может быть использован для проведения компьютерного тестирования по заданной дисциплине при проведении зачетов и экзаменов.

6. Банк данных учета кадров. В его состав входят базы данных по преподавателям, сотрудникам, учащимся и выпускникам, которые принимают то или иное участие в образовательном процессе. Они предназначены для оперативного поиска информации по интересующему лицу, установлению адреса для связи между преподавателем и обучающимся, регистрации обучающихся и др.

7. Лабораторное оборудование, стенды и установки. Составляют лабораторное обеспечение АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля, на базе которого разрабатываются АЛП удаленного доступа. Возможность их дистанционного использования позволяет объединять самое передовое лабораторное оборудование различных университетов вне зависимости от территориального расположения, что приводит к повышению научно-методического оснащения учебного процесса и снижению суммарных затрат на изготовление лабораторных стендов и установок.

8. Удаленные производственные ресурсы. Объединяют производственные площадки различных регионов России и других стран, предоставляющие свое оборудование для изучения его конструкции и протекающих процессов в режиме удаленного доступа в сети Интернет. Вовлечение научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий в учебный процесс позволяет в значительной степени приблизить обучающегося к реальному производству, что для дистанционного инженерного образования до сегодняшнего дня вообще казалось несбыточным. Кроме того,

подготовка специалистов на базе реально функционирующего оборудования является выгодным и для предприятий, так как позволит "не переучивать" завтрашних инженеров, пришедших на данный завод или НИИ.

9. Комплекс виртуальных тренажеров. Предназначен для обучения и приобретения навыков управления техническими системами в штатных и аварийных ситуациях. Может активно использоваться не только для обучения или повышения квалификации обслуживающего персонала промышленных предприятий, но и студентов инженерного профиля при прохождении определенных дисциплин специализации. Соответствие виртуальных тренажеров промышленным установкам и техническим системам позволяет значительно повысить уровень квалификации обслуживающего персонала, а также еще в образовательном учреждении подготовить специалистов, владеющих основными навыками управления промышленными системами. Это особенно актуально для пожаро- и взрывоопасных производств, где нет возможности обучения на "пилотных" установках. Тренинг персонала в нештатных ситуациях на виртуальных тренажерах позволяет также приобрести практические навыки, необходимые для локализации возникающих дефектов технологического оборудования и предотвращения аварий и катастроф.

Необходимость перестройки сложившихся стереотипов изложения материала и последующей оценки знаний обучающихся, принятых при традиционной организации обучения, обусловлена применением новейших информационно-коммуникационных технологий в учебном процессе. Данные факторы предъявляют более высокие требования не только к учебно-методическому материалу, но и профессорско-преподавательскому составу. Для преподавателей становится необходимым освоение новейших информационных технологий, способов представления материала в электронной форме с возможностью его использования в сети Интернет, систем компьютерного управления и сбора информации, вычислительной техники и др. В этой связи необходима организация сети курсов повышения квалификации работников образовательных учреждений, направленных на повышение их уровня информатизации и приобщение к новейшим достижениям в развитии средств электронной коммуникации [85 – 90].

Рассмотрим более подробно методики и технологии, используемые при разработке образовательных составляющих АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля.

5.2. МЕТОДИКИ ОРГАНИЗАЦИИ УДАЛЕННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ДОСТУПА К ЛАБОРАТОРНОМУ И ПРОМЫШЛЕННОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

В основе преподавания основных инженерных дисциплин лежит изучение и демонстрация материала с использованием лабораторных приборов и установок различной сложности и стоимости. Особую роль в данном образовательном процессе играют активные действия обучающегося при освоении знаний. В настоящее время разработка, проектирование и создание лабораторных приборов и установок сопряжены с целым рядом трудностей, таких, как высокая стоимость аппаратной базы, сокращение количества предприятий-производителей, уникальность лабораторного оборудования и др. Основное количество лабораторных стендов, разработанных ранее, на протяжении последних лет устаревает как физически, так и морально. При этом обеспечение образовательных услуг всех форм обучения студентов инженерного профиля требует предоставления возможности обучающимся наблюдать в реальном режиме времени и самостоятельно проводить лабораторные эксперименты.

В связи с этим особенно актуальной является разработка автоматизированных лабораторных практикумов с возможностью удаленного компьютерного доступа. Они позволяют решить проблемы физического, морального старения лабораторного оборудования и нехватки финансовых ресурсов на его разработку и тиражирование, а также обеспечивать доступ к лабораторным ресурсам в системе дистанционного образования. Использование АЛП на базе дорогостоящего уникального оборудования, разработанного различными учебными заведениями (а при необходимости и промышленными организациями), возможно не только при дистанционном, но и всех других формах обучения.

Общие положения в области создания, использования и развития систем автоматизированного лабораторного практикума (в том числе с удаленным компьютерным доступом) отражены в ОСТ 9.2–98 [91]. Рассмотрим основные определения, задачи, цели и требования, предъявляемые к АЛП с удаленным компьютерным доступом на базе лабораторного оборудования.

АЛП с удаленным компьютерным доступом представляют собой комплекс технических, программных и методических средств, обеспечивающих автоматизированное проведение лабораторных работ и экспериментальных исследований непосредственно на физических объектах и (или) математических моделях. При этом управление режимами функционирования физического объекта и (или) параметрами математических моделей осуществляется с компьютера, удаленного на

сколь угодно большое расстояние от места размещения самого объекта [92 – 96].

В качестве объекта АЛП выступает физический объект (лабораторный стенд, промышленная установка и т.д.), используемый для обучения или экспериментального исследования. Субъектом АЛП является пользователь (обучающийся, преподаватель, лаборант и т.д.), работающий в настоящий момент с объектом. При организации АЛП необходимо предусматривать создание следующих подсистем:

1. Объектная подсистема или подсистема нижнего уровня, территориально размещаемая вместе с объектом АЛП и непосредственно с ним связанная. Задача подсистемы – обеспечение процесса проведения лабораторной работы или экспериментального исследования. Включает физический объект, датчики, исполнительные механизмы органов управления и др.

2. Подсистема измерения осуществляет обеспечение измерений текущих параметров лабораторного эксперимента. Включает в себя электронные элементы преобразования электрических величин в кодированную информацию.

3. Подсистема автоматизированного управления осуществляет оперативное управление объектом АЛП, устанавливает и поддерживает заданные режимы лабораторного эксперимента. Включает электронные элементы контроля и управления с выходными электрическими сигналами.

4. Подсистема сбора, передачи и обработки данных предназначена для координации работы измерительных и управляющих устройств объектного уровня, накопления, предварительной обработки, передачи, представления и хранения текущих и накопленных данных лабораторного эксперимента. Включает информационно-вычислительное устройство (ПК, микропроцессорный контроллер, устройства ввода/вывода информации и передачи данных и др.) и специализированное программное обеспечение.

5. Рабочее место пользователя служит для обеспечения интерактивного взаимодействия субъекта АЛП с изучаемым объектом. Представляет собой ПК и специализированное программное обеспечение.

Автоматизированные лабораторные практикумы, включающие перечисленные подсистемы, позволяют организовать автоматизированное измерение исследуемых параметров и управление физическим объектом; накопление, передачу и обработку данных; возможность коллективного использования лабораторного и научно-исследовательского оборудования. При разработке АЛП необходимо также обеспечивать единообразие технического, программного и информационного обеспечения для унификации и стандартизации

отдельных модулей системы. Сформулированные в ОСТ 9.2–98 требования к автоматизированным лабораторным практикумам устанавливают основные положения и направления разработки отдельных подсистем, обеспечивают их совместимость, унифицированность и взаимосвязь в рамках АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля.

Одной из основных составляющих дисциплин инженерного профиля являются лабораторные практикумы, в которых предусмотрено изучение лабораторного оборудования, протекающих в нем процессов, установка режимных характеристик эксперимента и активное воздействие обучающегося на ход проведения эксперимента. Проблемой, которую необходимо решать при организации удаленного доступа к лабораторным ресурсам, является обеспечение активного управления экспериментом со стороны студента в режиме on-line. Данная проблема сопряжена с такими трудностями, как разработка соответствующего аппаратно-программного обеспечения лабораторного практикума, надежность работы оборудования и безопасность управляющих воздействий пользователя, визуализация динамики проведения эксперимента в сети Интернет.

В настоящей работе предлагается один из подходов разработки лабораторных установок открытого удаленного доступа с возможностью дистанционного управления лабораторным оборудованием на основе программно-аппаратных средств компании National Instruments. Он основан на концепции графического программирования виртуальных измерительных систем и систем ввода/вывода сигналов в среде LabVIEW. Необходимо отметить, что согласно ОСТ 9.2–98, программная продукция компании National Instruments (LabVIEW, LabWindows, LabWindows/CVI и др.) является сертифицированным инструментальным средством разработки программного обеспечения для универсальных систем общего назначения, а их аппаратура полностью соответствует международным стандартам на организацию измерительно-управляющих устройств и систем.

Рассмотрим структуру автоматизированного лабораторного стенда с удаленным компьютерным доступом к его органам управления и данным, которые поступают по каналам ввода/вывода информации в режиме on-line (рис. 5.1).

1. Лабораторная установка. Оборудование, на котором выполняется соответствующий эксперимент. Установка должна быть оснащена набором датчиков, необходимым для отображения хода протекания эксперимента и обеспечивающим информационную целостность данных с целью их последующей обработки. Датчики

должны обеспечивать снятие данных характеристик с применением вычислительной техники.

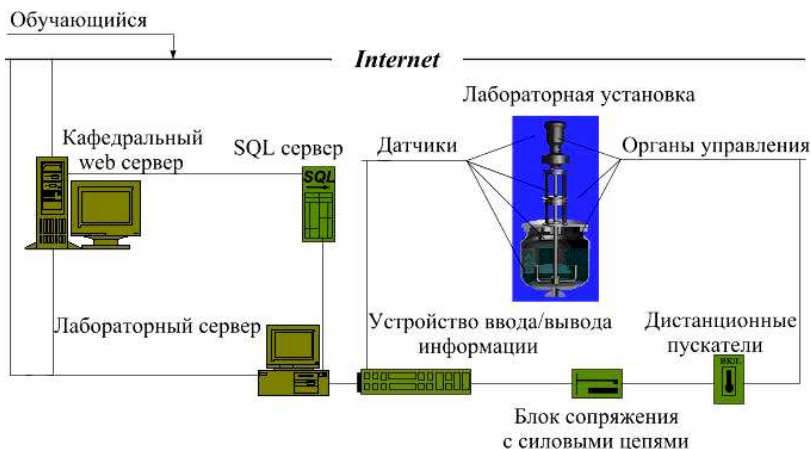


Рис. 5.1. Структура лабораторного стенда удаленного компьютерного доступа (возможность управления экспериментом в режиме on-line)

2. **Кафедраальный web-сервер.** Обеспечивает доступ к основному объему учебно-методического материала для проведения АЛП по соответствующей дисциплине в сети Интернет. Осуществляет маршрутизацию движения студента по необходимым серверам в процессе его обучения.

3. **SQL-сервер.** Обеспечивает доступ к базам справочных данных, необходимых для выполнения лабораторных и расчетных работ в процессе дистанционного обучения, а также накопление результатов эксперимента.

4. **Лабораторный сервер.** Компьютер, обеспечивающий опрос устройства ввода информации и предоставление данных для последующего использования.

5. **Устройство ввода информации.** Обеспечивает аналого-цифровые преобразования сигналов, снимаемых с датчиков лабораторной установки.

6. **Датчики.** Устройства, реагирующие своими чувствительными элементами на изменение исследуемых параметров лабораторной установки и преобразующие данные изменения в удобную для последующей передачи форму.

7. **Блоки сопряжения и дистанционные пускатели.** Служат для обеспечения управляющего воздействия на органы управления, работающие с высокими значениями силы тока и напряжения.

Для обеспечения интерактивного воздействия обучающегося на органы управления лабораторной установки, а также снятия показаний с датчиков стенда в состав аппаратурного оформления введено устройство ввода/вывода информации ЦАП/АЦП или Plugin-Card. Управляющий сигнал, подаваемый на вход одного из каналов блока сопряжения с силовыми цепями, может иметь значение логического нуля или единицы, что соответствует 0 ... 0,2 В и 4,8 ... 5 В. С помощью составного транзистора сигнал усиливается и подается на обмотку электромагнитного реле. Для визуального контроля появления управляющего сигнала параллельно обмотке реле через сопротивление включен светодиод. Для защиты от экстратоков выхода устройства ввода/вывода информации параллельно обмотке включен диод.

При подаче управляющего сигнала нормально разомкнутый контакт реле замыкается и на выходе одного из каналов блока сопряжения с силовыми цепями возникает напряжение ~ 220 В, которое далее подается на обмотку катушки реле пускателя. Пускатель, в свою очередь, коммутирует силовую трехфазную цепь.

Рассмотрим структуру взаимодействия программного обеспечения, осуществляющего генерацию управляющих воздействий, опрос каналов ввода информации, поддержку коммуникационного пространства и др. В состав аппаратурно-вычислительной базы стенда входят два основных компонента – кафедральный web-сервер и лабораторный сервер. Изменения программного оснащения кафедрального web-сервера по сравнению с автоматизированным лабораторным стендом, позволяющим наблюдать за ходом проведения эксперимента без возможности влияния на процесс его проведения, не требуется. Данный факт позволяет успешно наращивать и бесконфликтно сочетать различные лабораторные практикумы удаленного доступа в масштабах специализирующих инженерных кафедр различных образовательных учреждений и промышленных предприятий.

В основе дистанционной контрольно-измерительной системы лежит средство разработки программного обеспечения на базе графического программирования LabVIEW. Разработанный виртуальный инструмент осуществляет опрос каналов аналогового ввода и передачу цифровых сигналов на многофункциональную плату ввода/вывода информации.

На передней панели виртуального инструмента расположены органы управления лабораторной установкой, а также цифровые и графические дисплеи, непосредственно связанные через устройство ввода/вывода информации с датчиками лабораторной установки. Интерфейс передней панели является привычным для пультов

контрольно-измерительных систем. Данный виртуальный инструмент, фактически, является пультом управления и проведения лабораторных экспериментов на стенде в режиме локального доступа.

Установленный на лабораторном сервере G web server (http-сервер), разработанный компанией National Instruments, поддерживает CGI интерфейс, обеспечивающий дистанционное управление лабораторным оборудованием посредством информационного обмена с виртуальным пультом управления, а также осуществляет идентификацию и установку приоритетов пользователей.

HTML (Hypertext Markup Language) документация, представленная как на кафедральном, так и лабораторном сервере, предназначена для представления необходимой обучающемуся учебно-методической и справочной информации по данному лабораторному практикуму и осуществления маршрутизации его движения в коммуникационном пространстве.

Установленный на лабораторном сервере виртуальный инструмент, осуществляющий информационный обмен между сервером и клиентом посредством CGI интерфейса, производит дистанционный запуск виртуальных инструментов (пульта управления) на компьютере-сервере, доставку копии текущего изображения передней панели виртуального инструмента на ПК удаленного клиента через Интернет-браузер, передачу параметров функционирования виртуального инструмента и др.

Запуск виртуального пульта управления лабораторной установкой на лабораторном сервере может быть осуществлен двумя способами:

- локально, посредством запуска LabVIEW на ПК и последующей загрузки vi пульта управления;
- дистанционно, через Интернет-браузер обучающегося.

Необходимо отметить, что в процессе дистанционного управления работой лабораторной установки и проведения эксперимента главным приоритет в управлении остается за лабораторным сервером. Данный компьютер обслуживает дежурный лаборант, ответственный за работу лабораторного стенда удаленного доступа. В его обязанности входит подготовка стенда к работе, запуск лабораторного сервера, подача энергии на установку, а также слежение за подключением удаленных пользователей и ходом протекания эксперимента. В случае необходимости он имеет возможность как программно, так и аппаратно произвести остановку проведения эксперимента и отключение установки в целом.

Разрабатываемые виртуальные инструменты могут также быть опубликованы в сети Интернет с помощью технологии Remote Panel, разработанной компанией National Instruments. При этом на компьютере обучающегося помимо Интернет-браузера должно быть

дополнительно установлено приложение Run-Time Engine, свободно распространяемое на сайте компании <http://www.ni.com>. В этом случае обучающийся получает полный доступ к опубликованному приложению через окно Интернет-браузера. Для доступа к виртуальному инструменту через web-сервер необходимо, чтобы инструмент был открыт на машине-сервере. Данная технология предъявляет более высокие требования по скорости канала доступа обучающегося к виртуальному инструменту и ограничивает лицензионным соглашением число одновременно подключенных пользователей к web-серверу, использующему технологию Remote Panel.

Предложенная методика представления информации по проведению реального эксперимента в сети Интернет может быть успешно использована при создании АЛП на основе математических моделей. При этом расчетные результаты формируются по известным формулам в зависимости от входных данных, устанавливаемых обучающимся в процессе дистанционного проведения лабораторной работы или практического занятия.

При организации учебного процесса в технических образовательных учреждениях всегда возникала проблема оторванности лекционного и методического материала от реальных производств. В этой связи выпускник технического университета, приходя на предприятие, сталкивается с недостатком знаний и практических навыков работы с реальными процессами и оборудованием. На его адаптацию и переподготовку требуется дополнительное время и материальные ресурсы.

Кардинально изменить существующую ситуацию с отрывом учебного процесса от реальных производств в настоящее время может позволить только применение автоматизированных информационных систем в учебном процессе. Внедрение современных средств автоматизации, компьютеризация не только бухгалтерской и учетной деятельности, но и систем управления технологическим процессом и оперативным управлением производством, применение SCADA-систем, отсутствие информационной замкнутости при наличии средств защиты закрытой информации – это факторы, без которых невозможно представить современное конкурентоспособное производство. Необходимость участия предприятий в обучении будущих сотрудников в соответствии с собственными требованиями и традициями очевидна уже сегодня для многих руководителей.

Данные факторы позволяют на сегодняшнем этапе развития информационных технологий организовать удаленный доступ университетов к производственным ресурсам реальных современных предприятий. Использование Интернет-ресурсов, а также методик к

организации удаленного доступа к реальному лабораторному оборудованию (описанных выше) позволяют уничтожить барьеры между реальным производством и университетом.

Именно поэтому системный подход к информационному обеспечению технических систем на всех этапах их жизненного цикла позволяет во многом решить и проблему квалификации персонала, а следовательно и надежности человеческого фактора. Наличие на ТС современной АИС технической диагностики, взаимодействие с АСУ ТП и СОУ позволяют обеспечить выполнение вышеперечисленных требований к осуществлению удаленного доступа к промышленному оборудованию. Данные требования позволяют организовать демонстрацию любого технологического процесса в режиме on-line в сети Интернет. При этом могут быть использованы различные подходы.

1. Данные о текущем состоянии технологического процесса и истории его развития собираются с датчиков и накапливаются в файлах на компьютере, обслуживающем один или несколько производственных процессов. С определенной периодичностью (от нескольких секунд до нескольких минут) данные обрабатываются и представляются в форме, удобной для проведения учебного процесса по соответствующей тематике. При этом обработка и представление информации в сети Интернет осуществляется на компьютерах и серверах предприятия. Выход обучающихся на данные дистанционные базы практики осуществляется с университетских web-серверов в режиме on-line. Необходимый методический материал, как правило, размещается на кафедральных и университетских web-серверах.

2. Данные о технологическом процессе с определенной периодичностью в виде текстовых файлов или баз данных (в том числе на SQL-серверах) помещаются в область общего пользования, например по ftp-протоколу, или пересылаются сервером предприятия на университетские серверы. В этом случае программа, формирующая пользовательский интерфейс обучающегося, с определенной периодичностью считывает данные из файла по определенному ftp-адресу, или использует данные, которые были получены в результате пересылки файла на университетский сервер. Также возможен вариант получения данных по запросу на SQL-сервер предприятия. В данном случае вся обработка и представление данных в сети Интернет ложится на университетские и кафедральные серверы.

Каждый из этих подходов имеет как свои преимущества, так и недостатки. Информационная целостность первого подхода приводит к возрастанию общего трафика предприятия, а также расширению каналов общего доступа. Второй из описанных подходов является

зачастую более приемлемым как для предприятий, так и университетов. В данном случае от предприятия требуется минимум затрат – только сбор информации и обеспечение доступа к ней. Кроме того, работа по представлению информации обучающемуся в окончательной форме открывает широкое поле деятельности преподавателям университета по разработке соответствующих методических материалов.

Создание и развитие концепции лабораторий и производственных баз удаленного доступа позволяет существенно повысить уровень подготовки инженерных кадров, а также повышения их квалификации в процессе производственной деятельности.

5.3. АИС ТРЕНИНГА ПЕРСОНАЛА МХП

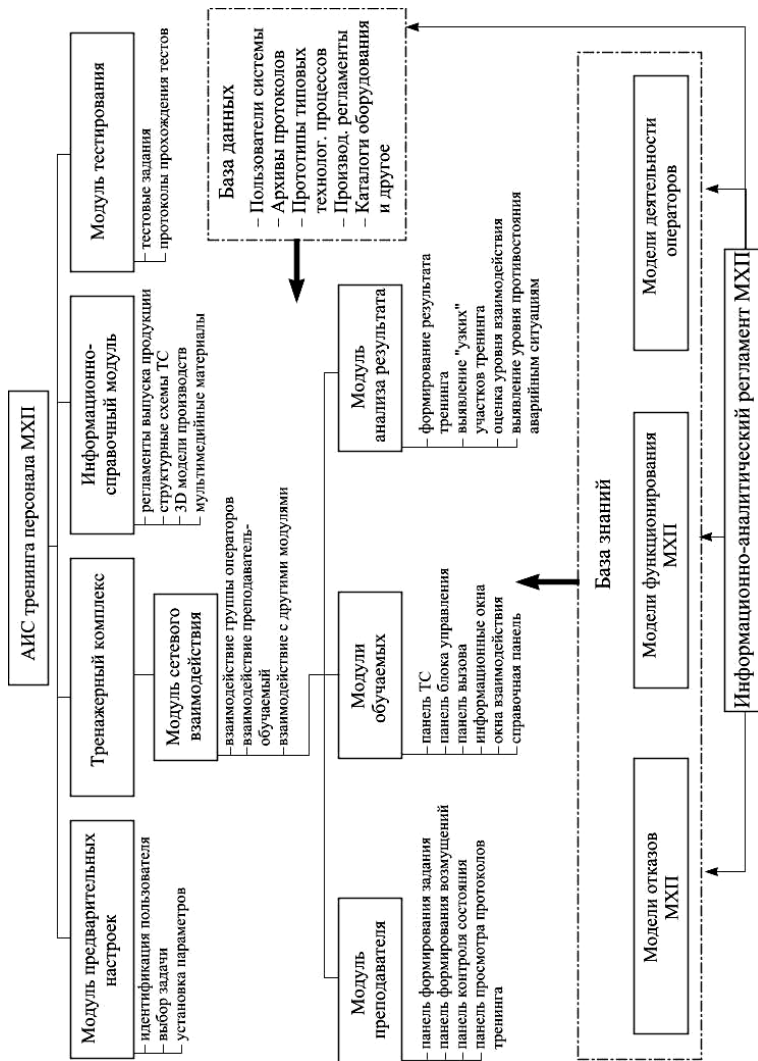
Управление современными промышленными техническими системами сегодня осуществляется с использованием систем автоматизированного управления технологическими процессами, которые создаются, как правило, на базе известных на рынке программного обеспечения SCADA-систем. Применение АСУ ТП позволяет осуществить переход промышленных производств на совершенно новый уровень технологии управления. Кроме того, применение компьютерной техники и информационных технологий предоставляет обслуживающему персоналу удобные и простые в использовании инструменты для контроля за соблюдением технологии и предотвращения нештатных и чрезвычайных ситуаций. Безусловно, для работы с такими системами персонал должен иметь соответствующую подготовку. Таким образом, становится очевидной необходимость включения комплекса виртуальных тренажеров в АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля, призванных предоставлять студентам и работникам промышленных предприятий возможность обучения и повышения квалификации для работы с системами автоматического контроля и управления технологическими процессами. Внедрение таких комплексов на предприятии повышает качество обучения персонала, способствует формированию навыков реальной работы и в значительной степени снижает негативное влияние человеческого фактора на надежность работы ТС [97]. Кроме того, обучение с помощью компьютерных средств можно сделать очень наглядным и удобным, что также немаловажно.

Также весьма перспективным является применение программ-тренажеров в процессе обучения студентов высших учебных заведений инженерного профиля. Очень важно, чтобы у студентов были не только теоретические знания по изучаемой ими

специальности, но и практические навыки, связанные с решением конкретных производственных задач. Это можно достигнуть, применяя в процессе обучения системы, имитирующие работу конкретных производств. Таким образом, достигаются две цели: во-первых, более глубокое понимание изучаемого материала, так как представление работы аппаратов в динамике зачастую более информативно, чем текстовые описания и статические иллюстративные материалы; и, во-вторых, появляется возможность приобретения студентами практических навыков, необходимых при работе на производстве, без необходимости использования реальной аппаратуры, которая зачастую недоступна вовсе, либо ее использование связано с большими сложностями. Очевидно, что в таких случаях использование тренажеров является, практически, единственным способом дать студентам необходимые знания и навыки.

Перспективным направлением в создании виртуальных тренажеров является применение в качестве среды реализации SCADA-системы, используемой на предприятии. С ее помощью можно создавать тренажеры, взаимодействие с которыми полностью имитирует работу за пультом управления на реальном производстве, оснащенный аналогичной системой. Это позволяет обучаемому получить навыки, во многом аналогичные практической работе в цехе. Еще одним преимуществом использования SCADA-систем для создания на их базе тренажеров является то, что практически во все системы этого класса интегрированы современные сетевые протоколы, что позволяет создавать обучающие программы с удаленным доступом через Интернет. Рассмотрим предлагаемую структуру АИС тренинга персонала МХП (рис. 5.2). АИС включает следующие основные функциональные модули:

1. Модуль предварительных настроек. Предназначен для установки начальных параметров работы АИС, выбора моделируемой ТС и продукта, идентификации обучающегося и инструктора.



2. Информационно-справочный модуль. Включает файлы справок по работе с АИС тренинга персонала; описание регламентов выпуска продукции; чертежи технических систем; 3D-модели

технологического оборудования, входящего в состав ТС; мультимедийные ролики, демонстрирующие процесс выпуска продукции и работу оператора.

3. Модуль тестирования. Реализует функции проверки теоретических знаний обучаемого в предметной области, а также знание технологических процессов, моделируемых в АИС. Включает файлы с тестовыми заданиями и протоколами тестирования обучающихся.

4. Тренажерный комплекс предназначен для выработки практических навыков управления ТС в штатных режимах, а также проверки правильности и своевременности действий операторов при возникновении внештатных и аварийных ситуаций.

Комплекс включает:

- модуль сетевого взаимодействия, обеспечивающий тренинг группы операторов, осуществляющих совместное управление ТС; формирование сценариев тренинга и возмущающих воздействий преподавателем; совместную работу других модулей;

- модуль преподавателя. Включает панели формирования задания для тренинга и возмущений в ходе его проведения; контроля текущего состояния тренинга и просмотра базы протоколов тренинга;

- модули обучаемых. Позволяют отображать структуру ТС и ее фрагментов, а также текущее состояние технологического процесса. Включают совокупности панелей пультов управления ТС, вызова служб предприятия; окна сопутствующей информации и взаимодействия с другими операторами; справочную панель;

- модуль анализа результатов. Формирует и отображает результаты тренинга; выявляет наличие "узких" мест, соответствующих наиболее частым ошибкам и неправильным действиям, которые могут привести к серьезным авариям; оценивает уровень взаимодействия группы операторов и противостояния возникающим аварийным ситуациям.

АИС тренинга персонала МХП опирается на базу данных и базу знаний, включающую представленные ранее математические модели функционирования и отказов функционирования МХП, а также модель деятельности оператора, которые формируются на основе информационно-аналитического регламента МХП.

На основании разработанной структуры АИС тренинга операторов сформулируем постановку задачи проектирования тренажерного комплекса для обучения персонала МХП.

Необходимо разработать тренажерный комплекс для обучения персонала МХП, включающий:

– кластер функциональных блоков панелей управления системой $[\Phi]$

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \bar{S}_1 & \bar{W}_1 & \bar{Z}_1 & \bar{C}_1 & [\Theta_1] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{S}_n & \bar{W}_n & \bar{Z}_n & \bar{C}_n & [\Theta_n] \end{bmatrix},$$

где \bar{S}_i – вектор, определяющий состав функционального блока; \bar{W}_i – вектор размеров функционального блока; \bar{Z}_i – вектор координат функционального блока; \bar{C}_i – вектор, определяющий цветовое исполнение функционального блока; $[\Theta_i]$ – матрица элементов функционального блока; n – число функциональных блоков;

– кластер информационно-справочных материалов $[\Lambda]$

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \bar{T}_1 & \bar{G}_1 & \bar{M}_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \bar{T}_k & \bar{G}_k & \bar{M}_k \end{bmatrix},$$

где \bar{T}_j – вектор, определяющий состав текстовых информационно-справочных материалов; \bar{G}_j – вектор, определяющий состав графических информационно-справочных материалов; \bar{M}_j – вектор, определяющий состав мультимедийных информационно-справочных материалов; k – число продуктов, выпускаемых на ТС;

– способы и каналы сетевого взаимодействия обучаемых и инструктора Net, формирующие требуемый состав и уровень навыков управления технической системой в штатных и аварийных ситуациях \bar{Z}_j^* , в соответствии с входящими в состав информационно-аналитического регламента R математическими моделями функционирования и отказов МХП, моделями деятельности операторов ТС

$$R: \bar{Z}_j \xrightarrow{[\Phi], [\Lambda], \text{Net}} \bar{Z}_j^*. \quad (5.2)$$

Используемая в постановке задачи матрица элементов функционального блока $[\Theta_j]$ описывается следующим образом:

$$[\Theta_j] = \begin{bmatrix} r_1 & x_1 & y_1 & c_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_k & x_k & y_k & c_k \end{bmatrix},$$

где r_i – размер элемента, x_i, y_i – координаты элемента в функциональном блоке; c_i – цветовое исполнение элементов; k – число элементов функционального блока.

Необходимо отметить, что при формировании виртуальных панелей управления тренажерного комплекса необходимо добиваться полного соответствия реальным пультам управления ТС. Отклонения могут вызвать появление у обучающегося навыков, не соответствующих реальным производствам и носят негативный характер [98 – 102].

Важную роль при разработке пульта управления и всего тренажерного комплекса играют математические модели функционирования и отказов МХП (главы 2, 3, 4), а также модель деятельности человека-оператора, которые необходимо создавать еще на этапе проектирования МХП и включать в состав ИАР. Представим математическую модель деятельности оператора в виде:

$$M = S(A, B, X, Y, O, Z, H), \quad (5.3)$$

где $A = \{a_i\}^n$ – множество n значений управляющих элементов пульта (переменные положения запорной арматуры, перемешивающих устройств, нагревателей и др.); $B = \{b_j\}^m$ – множество m значений индикаторов пульта (переменные значений объемов реагентов, температуры в аппарате или теплоносителя, давления в аппарате и др.); $X = \{x_j\}^k$ – множество k воздействий на органы управления ТС;

$Y = \{y_j\}^l$ – множество l значений параметров состояния оборудования технологической схемы; $O = \{\alpha(x_i, y_j)\}^j$ – множество j ограничений на допустимые параметры технологического процесса (ограничения на объем или массу передаваемых реагентов, максимальные/минимальные значения температуры или давления в аппарате и др.); $Z = \{z_j\}^e$ – множество e логических функций изменения состояний; $H = \{h_j\}^f$ – множество f состояний

функционирования ТС, формируемых на основе информационно-аналитического регламента системы и возможных действий оператора и инструктора; $S = S(a_i, b_i, x_i, y_i, o_i, z_i, h_i)$ – сценарий тренинга.

В ходе реализации сценария тренинга происходит преобразование потоков X и Y в потоки A и B , определяемое функциями перехода:

$$A = \alpha(X) \text{ и } B = \beta(Y). \quad (5.4)$$

При этом множество состояний функционирования моделируемой ТС описывается графом $G(H, D)$, где H – множество вершин; D – множество дуг графа. Переход из одного состояния в другое описывается системой продукций вида

$$(d_{ij}); V; R_{ij}^*; h_i \Rightarrow h_j; R_{ij}^*, \quad (5.5)$$

где d_{ij} – имя продукции – дуга, осуществляющая переход из состояния h_i в h_j ; V – сфера применимости продукции d_{ij} ; R_{ij}^* – условия, определяющие возможность применения ядра продукции d_{ij} ; R_{ij}^* – постусловия, активизация которых станет возможной после применения ядра продукции d_{ij} ; $h_i \Rightarrow h_j$ – ядро продукции d_{ij} .

Для описания ядра продукции используем правила вида

ЕСЛИ условие ТО действие 1, ИНАЧЕ действие 2.

Например, для производства пигмента бордо стадия приготовления солянокислого альфанафтиламина работа перемешивающего устройства определяется продукцией вида:

d_{45} ;

приготовление солянокислого альфанафти ламина;

$$B_1 \geq O_1 \wedge B_2 \geq O_2 \wedge B_3 \geq O_3 \wedge B_4 \geq O_4;$$

ЕСЛИ $B_5 = 0$ ТО $A_5 = 1$;

$$B_5 = 1,$$

где 1 – объем воды; 2 – температура среды в аппарате; 3 – объем альфанафтиламина; 4 – объем соляной кислоты; 5 – растворение альфанафтиламина.

Таким образом, осуществляется построение математической модели деятельности оператора ТС, которая используется при разработке виртуальных тренажеров или автоматизированных лабораторных практикумов. Оснащение проектируемых эргатических ТС комплексами виртуальных тренажеров (рис. 5.3) позволит

организовать системную подготовку обслуживающего персонала, повышение его квалификации при переходе с одного производства на другое, а также обучение студентов инженерного профиля при прохождении производственной практики и выполнении АЛП.

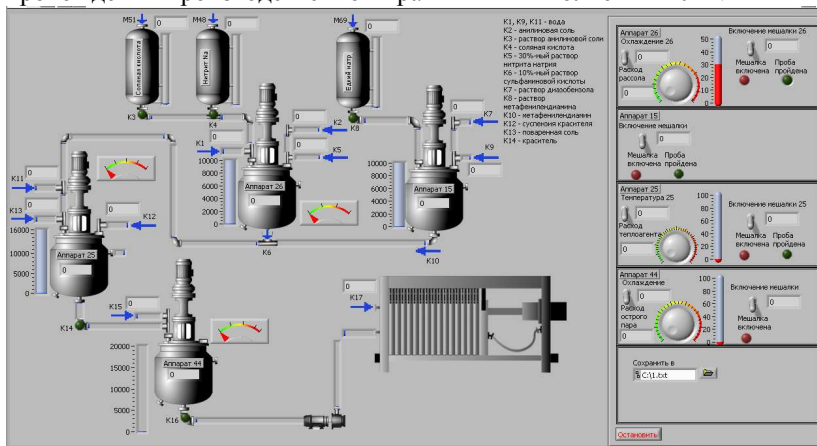


Рис. 5.3. Передняя панель тренажера

В результате проведенных исследований были разработаны компоненты информационно-образовательной среды, основой которой стала АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля по направлению "Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии" (<http://www.gaps.tstu.ru> и <http://www.170514.tstu.ru>).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлена методология прогнозирования и обеспечения надежности функционирования процессов и аппаратов многоассортиментных химических производств. В результате исследования жизненного цикла МХП, методов повышения надежности функционирования оборудования, методик подготовки специалистов инженерного профиля и их последующей работы на предприятиях химико-технологического профиля поставлена задача формирования информационно-аналитического регламента МХП как единой информационной основы, объединяющей основной объем исходной информации для решения задач обеспечения надежности функционирования ПиА МХП на этапе эксплуатации, а также при последующей реконструкции производства.

Предложены математические постановки задач:

- проектирования МХП на множестве состояний функционирования;
- технической диагностики состояния технологического оборудования;
- выбора оптимальной стратегии ремонта ТО в условиях неопределенности;
- оптимального календарного планирования работы совокупности ТС цеха с учетом проведения графика ППР оборудования в условиях ограниченности количества ремонтного персонала;
- проектирования тренажерного комплекса персонала МХП формируют единый системный подход к решению проблемы прогнозирования и обеспечения надежности функционирования ПиА МХП.

Особо отметим, что разработанная АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля позволила объединить ресурсы образовательных учреждений и промышленных предприятий для формирования у обучаемых требуемого на производстве множества компетенций, а также обеспечить соответствие работников предприятий современному уровню развития науки и технологий.

Предложенные в работе постановки задач, математические модели, алгоритмы и методики помогут проектировщикам, студентам и аспирантам при решении конкретных задач проектирования и эксплуатации МХП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров, В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы в химической промышленности / В.В. Кафаров, В.В. Макаров. – М., 1990. – 319 с.
2. Кафаров, В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы (ГАПС) химической промышленности / В.В. Кафаров // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1987. – Т. 32, № 3. – С. 252.
3. Кафаров, В.В. Современные тенденции проектирования гибких автоматизированных химических производств / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.И. Спицын, М.А. Кузьмин // Химическая промышленность за рубежом. – 1990. – № 1. – С. 42 – 61.
4. Кафаров, В.В. Гибкие автоматизированные производственные системы химической и смежных отраслей промышленности / В.В. Кафаров, В.В. Макаров, А.Ф. Егоров. – М., 1988. – Т. 16. – С. 92 – 181.
5. Кафаров, В.В. Моделирование и оптимизация периодических процессов и систем химической технологии / В.В. Кафаров, В.В. Макаров, Нгуен Суан Нгуен // Итоги науки и техники: Процессы и аппараты химической технологии. – М., 1984. – Т. 12. – С. 3 – 97.
6. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Е.П. Марков. – М., 1986. – 359 с.
7. Кафаров, В.В. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Г. Гун и др. – М., 1987. – 272 с.
8. Дорохов, И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Интеллектуальные системы и инженерное творчество в задачах интенсификации химико-технологических процессов и производств / И.Н. Дорохов, В.В. Меньшиков. – М. : Наука, 2005. – 584 с.
9. Карпушкин, С.В. Выбор аппаратурного оформления многоассортиментных химических производств / С.В. Карпушкин. – М. : "Издательство Машиностроение-1", 2006. – 140 с.
10. Бодров, В.И. Стратегия синтеза гибких автоматизированных химико-технологических систем / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий // Теоретические основы химической технологии. – 1991. – Т. 25, № 5. – С. 716 – 730.
11. Шубин, В.С. Надежность оборудования химических производств / В.С. Шубин. – М., 1989. – 96 с.
12. Муромцев, Ю.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах / Ю.Л. Муромцев. – М., 1990. – 143 с.
13. Муромцев, Ю.Л. Определение границ эффективности и работоспособности сложных систем / Ю.Л. Муромцев // Автоматика и телемеханика. – 1988. – № 4. – С. 164 – 176.

14. Муромцев, Ю.Л. Теоретические основы исследования сложных систем с учетом надежности / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, В.Н. Грошев и др. – М., 1987. – 116 с.
15. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надежности / Т.А. Голинкевич. – М., 1985. – 168 с.
16. Винаров, А.Ю. Основные этапы разработки ГАПС биотехнологических производств / А.Ю. Винаров, Л.С. Гордеев // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1987. – Т. 32, № 3. – С. 293 – 300.
17. Бодров, В.И. Разработка прогрессивных технологических процессов и оборудования перенастраиваемых многоассортиментных производств синтетических красителей / В.И. Бодров, С.В. Мищенко, С.И. Дворецкий и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1995. – № 1. – С. 7 – 22.
18. Дворецкий, С.И. Синтез гибких автоматизированных малотоннажных химических производств : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С.И. Дворецкий. – М., 1991. – 32 с.
19. Бодров, В.И. Методы и алгоритмы решения задач дискретной математики в автоматизированном проектировании : учебное пособие / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий. – Тамбов, 1988. – 98 с.
20. Макаров, В.В. Модель и алгоритм синтеза гибкой ХТС многоассортиментного производства : тр. ин-та / В.В. Макаров, Е.С. Тарасова // Моск. хим.-техн. ин-т им. Д.И. Менделеева. – 1988. – Вып. 152. – С. 81 – 85.
21. Гурковская, Е.В. Автоматизированный синтез совмещенных химико-технологических систем многономенклатурных производств / Е.В. Гурковская, В.В. Макаров. – М., 1985. – 26 с.
22. Макаров, В.В. Управление взаимодействием аппаратурных стадий гибких автоматизированных химико-технологических систем / В.В. Макаров, Е.С. Тарасова. – М., 1986. – 19 с.
23. Макаров, В.В. Метод выбора технологического оборудования при проектировании совмещенных схем многоассортиментных производств / В.В. Макаров, Л.Г. Ибрагимов // Проблемы автоматизированного проектирования и автоматизация эксперимента : тр. МХТИ им. Д.И. Менделеева. – М., 1983. – Вып. 127. – С. 103 – 109.
24. Малыгин Е.Н., Карпушкин С.В. Автоматизированный расчет оборудования гибких технологических производств // Химическая промышленность. – 1985. – № 2. – С. 118 – 122.
25. Малыгин, Е.Н. Проектирование гибких производственных систем в химической промышленности / Е.Н. Малыгин, С.В. Мищенко // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1987. – Т. 32, № 3. – С. 280 – 286.
26. Зайцев, И.Д. Автоматизированная система выбора и расчета оптимальной структуры химико-технологической системы и ее аппаратурное оформление / И.Д. Зайцев // Химическая промышленность. – 1977. – № 2. – С. 42 – 47.
27. Егоров, А.Ф. Оптимальный выбор типового оборудования при проектировании многоассортиментных химических производств / А.Ф.

Егоров, В.П. Бельков, Н.С. Тюрина // Химическая промышленность. – 2001. – Т. 78, № 2. – С. 40 – 45.

28. Voudouris, V.T. Mixed-Integer Linear Programming Reformulations for Batch Process Design with Discrete Equipment Sizes / V.T. Voudouris, I.E. Grossmann // Ind. Eng. Chem. Res. – 1992. – Vol. 31, N. 5. – P. 1315 – 1325.

29. Grossman, I.E. Optimal Design of Multipurpose Chemical Plants / I.E. Grossman, R.W.H. Sargent // Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev. – 1979. – Vol. 18, N. 2. – P. 343 – 348.

30. Papageorgaki, S. Optimal Design of Multipurpose Batch Plants. 1. Problem Formulation / S. Papageorgaki, G.V. Reklaitis // Ind. and Eng. Chem. Res. – 1990. – Vol. 29, N. 10. – P. 2054 – 2062.

31. Knopf, F.C. Optimal Design of Batch/Semicontinuous Processes / F.C. Knopf, M.R. Okos, G.V. Reklaitis // Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev. – 1982. – Vol. 21, N. 1. – P. 79 – 86.

32. Yen, N.C. Synthesis and Sizing of Batch/Semicontinuous Processes: Single Product Plants / N.C. Yen, G.V. Reklaitis // Comput. chem. Eng. – 1987. – Vol. 11, N. 6. – P. 639 – 654.

33. Modi, A.K. Design of Multiproduct Batch Processes with Finite Intermediate Storage / A.K. Modi, I.A. Karimi // Comput. chem. Eng. – 1989. – Vol. 13, N. 1/2. – P. 127 – 139.

34. Kocis, G.R. Global Optimization of Nonconvex MINLP Problems in Process Synthesis / G.R. Kocis, I.E. Grossmann // Ind. Eng. Chem. Res. – 1988. – Vol. 27. – P. 1407 – 1421.

35. Suhami, I. Optimal Design of Multipurpose Batch Plants / I. Suhami, R.S.H. Mah // Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev. – 1982. – Vol. 21, N. 1. – P. 94 – 100.

36. Wellons, H.S. The Design of Multiproduct Batch Plants under Uncertainty with Staged Expansion / H.S. Wellons, G.V. Reklaitis // Comput. chem. Eng. – 1989. – Vol. 13, N. 1/2. – P. 115 – 126.

37. Мешалкин, В.П. Экспертные системы в химической технологии / В.П. Мешалкин. – М. : Наука. – 1995. – 366 с.

38. Построение экспертных систем сложных химико-технологических объектов / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, П.И. Елисеев и др. // Химическая технология. – 1989. – Т. 304, № 6.

39. Хейс-Рот, Ф. Построение экспертных систем / Ф. Хейс-Рот, Д. Уотерман, Д. Ленат. – М. Мир, 1987. – 441 с.

40. Построение экспертных систем сложных химико-технологических объектов / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, П.И. Елисеев // Доклады АН СССР. – 1989. – Т. 304, № 6.

41. Мешалкин, В.П. Модели представления знаний о процедуре технической диагностики отказов теплообменных аппаратов / В.П. Мешалкин, Л.В. Гурьева, Б.Е. Сельский // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32, № 2. – С. 201 – 207.

42. Джарратано, Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование / Д. Джарратано, Г. Райли. – М. : Изд-во "Диалектика", 2006. – 1152 с.

43. Джексон, П. Введение в экспертные системы / П. Джексон. – М. : Изд-во "Вильямс", 2001. – 624 с.
44. J.-S. Roger Jang. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics / J.-S. Roger Jang. – 1993. – Vol. 23(03). – P. 665 – 685.
45. Абрамова, Н.А. Человеческий фактор в управлении / Н.А. Абрамова, К.С. Гинсберг, Д.А. Новиков. – М. : Изд-во КомКнига, 2006. – 496 с.
46. Лари, К. Человеческий фактор в программировании / К. Лари. – М. : Изд-во "Символ-Плюс", 2004. – 384 с.
47. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Применение нечетких множеств / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Е.П. Марков. – М. : Наука, 1986. – 359 с.
48. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
49. Харазов, А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин / А.М. Харазов, С.Ф. Цвид. – М. : Машиностроение, 1983. – 132 с.
50. Палюх, Б.В. Надежность систем управления химическими производствами / Б.В. Палюх, В.Л. Перов. – М. : Химия, 1987. – 178 с.
51. Клюев, В.В. Технические средства диагностирования : справочник / В.В. Клюев. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.
52. Проблемы обеспечения безопасности и эксплуатационной надежности химических производств / В.В. Кафаров, В.А. Иванов, Б.В. Палюх и др. // Итоги науки и техники. Процессы и аппараты химических производств. – М. : Химия, 1992. – Т. 19. – 188 с.
53. Баршдорф, Д. Нейронные сети и нечеткая логика. Новые концепции для технической диагностики неисправностей / Д. Баршдорф // Приборы и системы управления. – 1996. – № 2. – С. 48 – 53.
54. Sayama, H. Artificial Neural Network Approach to Process Fault Diagnosis. International Academic Publishers / H. Sayama, Y. Shimada, Z. Yang, J. Song, K. Suzuki. – China, 1993. – P. 8 – 13.
55. Horikawa, S. On Fuzzy Modeling Using Neural Networks with the Back-Propagation Algorithm / S. Horikawa, T. Furuhashi, Y. Uckikawa / IEEE Trans. on Neural Networks. – 1992. – Vol. 3, N. 5. – P. 801 – 806.
56. Ермаков, В.И. Технология ремонта химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шеин. – Л. : Химия, 1977. – 302 с.
57. Фарамазов, С.А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов / С.А. Фарамазов. – М. : Химия, 1988. – 304 с.
58. Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий химической промышленности. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
59. Ермаков, В.И. Ремонт и монтаж химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шеин. – Л. : Химия, 1981. – 368 с.
60. Володин, В.М. Задача оптимального управления ремонтом технологического оборудования / В.М. Володин, В.В. Матвеев //

Теоретические основы химической технологии. – 1987. – Т. 11, № 4. – С. 539 – 545.

61. Шубин, В.С. Надежность оборудования химических производств / В.С. Шубин. – М., 1989. – 96 с.

62. Малыгин, Е.Н. Задача оптимального календарного планирования гибких химико-технологических схем / Е.Н. Малыгин, Т.А. Фролова // Химическая промышленность. – 1992. – № 6. – С. 367 – 372.

63. Заде, Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем / Л.А. Заде. – М.: Знание, 1974. – С. 5 – 49.

64. Танаев, В.С. Теория расписаний / В.С. Танаев // Математика и кибернетика. – 1988. – № 2. – 52 с.

65. Островский, Г.М. Оптимизация химико-технологических процессов в условиях неопределенности / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Е.И. Барит и др. // Теоретические основы химической технологии. – 1993. – Т. 27, № 2. – С. 183 – 191.

66. Перов, В.Л. Стратегия гибкого управления многоассортиментными химическими производствами в условиях неопределенности / В.Л. Перов, А.Ф. Егоров // Теоретические основы химической технологии. – 1994. – Т. 28, № 5. – С. 519 – 529.

67. Оптимизация расписания работы совмещенных технологических схем многоассортиментного химического производства / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий, О.В. Толмачев и др. // Химическая промышленность. – 1991. – № 3. – С. 185 – 191.

68. Pekny, J.F. Exact Solution of the No-Wait Flowshop Scheduling Problem with a Comparison to Heuristic Methods / J.F. Pekny, D.L. Miller // Comput. Chem. Eng. – 1991. – Vol. 15, N. 11. – P. 741 – 748.

69. Зайцев, И.Д. Автоматизированная система выбора и расчета оптимальной структуры химико-технологической системы и ее аппаратное оформление / И.Д. Зайцев // Химическая промышленность. – 1977. – № 2. – С. 42 – 47.

70. Birewar, D.B. Incorporating Scheduling in the Optimal Design of Multiproduct Plants / D.B. Birewar, I.E. Grossmann // Comput. Chem. Eng. – 1989. – Vol. 13. – P. 141 – 161.

71. Vaselenak, J.A. An Embedding Formulation for the Optimal Scheduling and Design of Multipurpose Batch Plants / J.A. Vaselenak, I.E. Grossmann, A.W. Westerberg // Ind. Eng. Chem. Res. – 1987. – Vol. 26. – P. 139 – 148.

72. Voudouris, V.T. MILP Model for Scheduling and Design of a Special Class of Multipurpose Batch Plants / V.T. Voudouris, I.E. Grossmann // Comput. and Chem. Eng. – 1996. – Vol. 20, N. 11. – P. 1335 – 1360.

73. Sahinidis, N.V. MINLP Model for Cyclic Multiproduct Scheduling on Continuous Parallel Lines / N.V. Sahinidis, I.E. Grossmann // Comput. Chem. Eng. – 1991. – Vol. 15, N. 2. – P. 85 – 103.

74. Birewar, D.B. Simultaneous Production Planning and Scheduling in Multiproduct Batch Plants / D.B. Birewar, I.E. Grossmann // Ind. Eng. Chem. Res. – 1990. – Vol. 29, N. 4. – P. 570 – 580.

75. Kuriyan, K. Scheduling Flowshops to Minimize Makespan / K. Kuriyan, G.V. Reklaitis // Comput. Chem. Eng. – 1989. – Vol. 28, N. 8. – P. 191 – 200.

76. Subrahmanyam, S. Decomposition Approach to Batch Plant Design and Planning / S. Subrahmanyam, J.F. Pekny, G.V. Reklaitis // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1996. – Vol. 35. – P. 1866 – 1876.
77. Ahmed, S. Robust Process Planning under Uncertainty / S. Ahmed, N. Sahinidis // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1998. – Vol. 37. – P. 1883 – 1892.
78. Ku, H.M. Scheduling in Batch Processes / H.M. Ku, D. Rajagopalan, I.A. Karimi // *Chem. Eng. Prog.* – 1987. – N. 8. – P. 35 – 45.
79. Reklaitis, G.V. Review of Scheduling of Process Operations / G.V. Reklaitis // *AICHE Symp. Ser.* – 1982. – N. 78. – P. 119 – 133.
80. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход (АИМА) / С. Рассел, П. Норвиг. – М. : Изд-во "Диалектика", 2007. – 1408 с.
81. Ефремов, В.П. Интеллектуальные системы управления / В.П. Ефремов. – М. : Изд-во "Либроком", 2009. – 304 с.
82. Прауде, В.Р. Маркетинг: Актуальные вопросы теории и практики / В.Р. Прауде. – Рига, 1991. – 348 с.
83. Голубков, Е.П. Маркетинг: Выбор лучшего решения / Е.П. Голубков, Е.Н. Голубкова, В.Д. Секерин. – М., 1993. – 224 с.
84. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М., 1974. – Вып. 1. – 406 с.
85. Юрин, В.Н. Инженерное образование и информационные технологии: проблемы и опыт их решения / В.Н. Юрин // *Вестник машиностроения.* – 1998. – Т. 5. – С. 44 – 51.
86. Солдаткин, В.И. Основы открытого образования / В.И. Солдаткин // *Российский государственный институт открытого образования.* – М. : НИИЦ РАО, 2002. – Т. 1. – 676 с.
87. Солдаткин, В.И. Основы открытого образования / В.И. Солдаткин // *Российский государственный институт открытого образования.* – М. : НИИЦ РАО, 2002. – Т. 2. – 680 с.
88. Солдаткин, В.И. Российский портал открытого образования: обучение, опыт, организация / В.И. Солдаткин. – М. : МГИУ, 2003. – 508 с.
89. Полат, Е.С. Дистанционное обучение / Е.С. Полат, М.В. Моисеева, А.Е. Петров и др. – М. : Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 1998. – 192 с.
90. Полат, Е.С. Дистанционное обучение : организационный и педагогический аспект / Е.С. Полат // *Информатика и образование.* – М., 1996. – № 3. – С. 87 – 91.
91. Учебная техника для образовательных учреждений. ОСТ 9.2–98 : приказ Минобразования России от 14.10.98 № 2610.
92. Арбузов, Ю.В. Новый подход к инженерному образованию: теория и практика открытого доступа к распределенным информационным и техническим ресурсам / Ю.В. Арбузов, В.Н. Леньшин, С.И. Маслов, А.А. Поляков, В.Г. Свиридов. – М. : Центр-Пресс, 2000. – 238 с.
93. Арбузов, Ю.В. Новое в концепции дистанционного образования. Дистанционный лабораторный практикум / Ю.В. Арбузов, В.Н. Леньшин, С.И. Маслов, А.А. Поляков, В.Г. Свиридов // *Проблемы информатизации Высшей школы.* – Бюллетень 1–2 (7–8). – 1997. – С. 50 – 58.
94. Арбузов, Ю.В. Комплекс средств обеспечения учебного процесса и научных исследований в открытом техническом образовании / Ю.В. Арбузов,

В.Н. Воронов, С.И. Маслов, Г.Ф. Филаретов // Индустрия образования : сб. ст. – М. : МГИУ, 2001. – Вып. 1. – С. 175 – 182.

95. Кузнецов, Ю.М. Опыт разработки и перспективы создания учебных лабораторий удаленного доступа по дисциплинам радиотехнического профиля / Ю.М. Кузнецов, А.А. Мартяшин, А.А. Поляков, П.П. Чураков // Индустрия образования : сб. ст. – М. : МГИУ, 2001. – Вып. 1. – С. 190 – 199.

96. Зинченко, В.П. Дистанционное образование: к постановке проблемы / В.П. Зинченко // Научно-теорет. журнал "Педагогика". – М., 2000. – № 2. – С. 23 – 34.

97. Егоров, А.Ф. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий / А.Ф. Егоров, Т.В. Савицкая. – М. : Химия, КолосС, 2004. – 416 с.

98. Шлаен, П.Я. Эргономическое обеспечение разработки и эксплуатации изделий, управляемых и обслуживаемых человеком / П.Я. Шлаен. – М. : МАИ, 1985.

99. Кристенсен, Ж. Человеческий фактор / Ж. Кристенсен, Д. Мейстер, П. Фоули. – М. : Мир, 1991. – Т. 1.

100. Богачев, И.И. Модели деятельности человека в эргатических системах / И.И. Богачев, А.Я. Донов, В.В. Львов и др. – М. : МАИ, 1987.

101. Хайкин, С. Нейронные сети / С. Хайкин. – М. : Изд-во "Диалектика", 2008. – 1104 с.

102. Рутковская, Д.А. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д.А. Рутковская, М.В. Пилинский, Л.П. Рутковский. – М. : Изд-во "Горячая линия – Телеком", 2008. – 452 с.

103. Левин, В.И. Логическая теория надежности сложных систем / В.И. Левин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.

104. Левин, В.И. Логические методы в теории надежности. I. Математический аппарат / В.И. Левин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 873 – 884.

105. Левин, В.И. Логические методы в теории надежности. II. Математические модели надежности / В.И. Левин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 119 – 132.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ	5
2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ	14
2.1. Математические модели функционирования и отказов МХП	14
2.2. Критерий оптимальности решения задачи проектирования МХП	23
2.3. Постановка задачи проектирования МХП на множестве состояний функционирования	27
2.4. Структура автоматизированной системы поддержки прогнозирования надежности функционирования МХП	33
3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ЕГО РЕМОНТА	36
3.1. Постановка задачи технической диагностики состояния технологического оборудования	36
3.2. Математическая модель определения возможных сроков проведения ремонта ТО	45
3.3. Постановка задачи выбора оптимальной стратегии ремонта ТО в условиях неопределенности	51
3.4. Структура экспертной системы технической диагностики состояния ТО	60
4. КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ	65
4.1. Математическая модель выпуска продукции МХП	65
4.2. Математическая модель автоматизированного построения графика планово-предупредительных ремонтов ТО	71
4.3. Постановка задачи оптимального календарного планирования работы совокупности ТС цеха в условиях ограниченности количества ремонтного персонала	81
4.4. Структура автоматизированной системы календарного	83

планирования работы МХП	
5. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОФИЛЯ	87
5.1. Структура АИС непрерывной подготовки специалистов инженерного профиля	87
5.2. Методики организации удаленного компьютерного доступа к лабораторному и промышленному оборудованию	91
5.3. АИС тренинга персонала МХП	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108

Научное издание

КРАСНЯНСКИЙ Михаил Николаевич

**НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ
МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Редактор Е.С. Мордасова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Сдано в набор 05.05.2010. Подписано в печать 15.05.2010
Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 7,25
Тираж 400 экз. Заказ 263

ООО "Издательство Машиностроение",
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru