

СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Никищенко Алексей Николаевич

УДК 658.5.012.7

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
КОНТРОЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
СИСТЕМ СО СКРЫТЫМИ ОТКАЗАМИ

Специальность: 05.13.07 — Автоматизация процессов управления
(05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (по отраслям))

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

Обжерин Ю.Е.

Севастополь — 2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ.....	11
1.1 Анализ установки пайки двойной волной припоя «WS 330-SF» Essemtec как объекта управления	12
1.2 Характеристики и стратегии технического контроля	17
1.3 Виды и характеристики отказов	20
1.4 Теоретические исследования в области контроля скрытых отказов	22
1.5 Характеристики надежности и экономической эффективности восстанавливаемых систем, описываемых полумарковскими процессами с общим фазовым пространством состояний.....	27
1.6 Выводы и постановка задач исследований.....	35
РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА ПОЛУМАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ СО СКРЫТЫМИ ОТКАЗАМИ.....	37
2.1 ПМ модель проведения естественного периодического КТС системы с внезапными СО методом пробы	37
2.2 ПМ модель проведения искусственного периодического КТС системы с постепенными СО.....	47
2.3 ПМ модель проведения естественного периодического КТС системы с постепенными СО методом пробы.....	59
2.4 Верификация построенных аналитических моделей КТС однокомпонентных ПС	74
2.4.1 Имитационная модель календарного контроля наличия постепенных скрытых отказов производственной системы	76
2.4.2 Определение требуемого количества циклов для выхода на стационарный режим работы имитационной модели	79

2.4.3	Верификация полумарковских моделей с помощью имитационного моделирования.....	82
2.5	Выводы	84
РАЗДЕЛ 3. ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПОКОМПОНЕНТНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ С НАЛИЧИЕМ СКРЫТЫХ ОТКАЗОВ 85		
3.1	Использование метода суперпозиции ПМП для описания функционирования многокомпонентных систем	87
3.2	Стационарные характеристики многокомпонентной ПС со СО и покомпонентным КТС	95
3.3	ПМ модель покомпонентного контроля установки пайки двойной волной припоя «SW 330-SF» Essemtec	98
3.3.1	Контроль плотности флюса в блоке флюсователя	98
3.3.2	Контроль качества припоя в блоке пайки	99
3.3.3	Контроль температурных параметров установки пайки волной припоя.....	100
3.3.4	Параметры ПМ модели покомпонентного контроля установки пайки волной припоя «SW 330-SF» Essemtec.....	101
3.4	Выводы	102
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ.....		
4.1	Структура автоматизированной системы принятия решений при оптимизации периодичности КТС.....	105
4.2	Модуль системы поддержки принятия решения по выбору закона распределения случайной величины и/или его параметров	109
4.2.1	Определение параметров блока флюсования.....	110
4.2.2	Контроль качества припоя	112

4.2.3	Определение параметров закона распределения наработки на СО блоков, контролируемых в процессе термопрофилирования.....	114
4.3	Модуль системы поддержки принятия решений по выбору оптимального процесса управления.....	116
4.3.1	Многокритериальная оптимизация с использованием генетического алгоритма для поиска решений.....	117
4.3.2	Однокритериальная оптимизация процесса управления при задании значимости критериев.....	121
4.4	Выводы.....	124
РАЗДЕЛ 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЯ БЛОКОВ		
	УСТАНОВКИ ПАЙКИ ВОЛНОЙ ПРИПОЯ «SW 330-SF» ESSEMTEC.....	125
5.1	Многокритериальная оптимизация периодичности контроля.....	125
5.2	Скалярная оптимизация периодичности контроля.....	131
5.3	Выводы.....	132
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ		133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		135
ПРИЛОЖЕНИЕ А.	Решение системы интегральных уравнений (2.2)	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.	Определение скорости конвейера и температурных параметров установки по температурному профилю	148
ПРИЛОЖЕНИЕ В.	Описание пассивного эксперимента по определению экспериментальной функции распределения времени достижения плотностью флюса заданного уровня	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.	Описание пассивного эксперимента по определению экспериментальной функции распределения скорости загрязнения медью ванны припоя	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.	Акт о внедрении результатов диссертационной работы	161

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АСПР	—	автоматизированная система принятия решения
ВЦМ	—	вложенная цепь Маркова
ГА	—	генетический алгоритм
ИМ	—	имитационная модель
ЛПР	—	лицо, принимающее решение
КТС	—	контроль технического состояния
ОК	—	объект контроля
ПМ	—	полумарковский(-ая)
ПМВ	—	процесс марковского восстановления
ПМП	—	полумарковский процесс
ПП	—	печатная плата
ПС	—	производственная система
ПР	—	плотность распределения
СВ	—	случайная величина
СК	—	средства контроля
СО	—	скрытый отказ
СППР	—	система поддержки принятия решения
ТК	—	технический контроль
ТО	—	техническое обслуживание
ТП	—	технологический процесс
УД	—	упреждающий допуск
УПП	—	управление процессом
ФПС	—	фазовое пространство состояний
ФР	—	функция распределения

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Снижение эффективности производственной системы (ПС) происходит из-за влияния многих факторов. Один из них — возможность возникновения в ПС скрытых отказов (СО). Согласно ГОСТ 27.002–89 СО отказ, обнаружение которого невозможно без проведения технического обслуживания (ТО) либо специальными методами и способами диагностики. В рамках данной работы принято, что для выявления СО требуется проведение контроля технического состояний с использованием специальных средств диагностики (КТС) ПС. КТС позволяет выявить возникший СО в системе либо диагностировать скорое наступление постепенного СО. По результатам КТС принимается решение о проведении ТО ПС. Подобная стратегия ТО является стратегией обслуживания по состоянию. В настоящее время в химической отрасли в 55% случаев используется стратегия ТО с КТС системы, что позволяет по сравнению с другими стратегиями проведения ТО в 33% случаев увеличить срок службы оборудования, в 2% — повысить производительность, в 23% случаев — снизить использование запасных деталей, в 16% случаев — снизить затраты на рабочую силу, в 2% случаев — сократить отходы производства.

Модели контроля скрытых отказов рассматривались в работах В.А. Каштанова, Ф. Байхельта, Г.Н. Черкесова, Е.Ю. Барзиловича, И.Б. Герцбаха, Б. Винтера, С. Ферсмана, Р. Барлоу, Р. Джонсона, К.Р. Мобли, Б. Шикари и других.

Управление процессом ТО с КТС ПС производится на основе большого числа различных параметров. Кроме того, процесс управления усложняется наличием нескольких критериев оптимизации, наличием в ПС независимо функционирующих компонентов и необходимостью сбора и обработки большого объема информации о техническом состоянии ПС.

Обеспечение эффективного управления ПС в таких условиях является проблемой, успешное решение которой возможно путём разработки и

внедрения автоматизированной системы принятия решений при управления процессом (АСПР УПП) ТО. Это приводит к необходимости решения следующих задач: построение математических моделей процесса контроля-восстановления ПС с учетом проведения технического контроля (ТК, в данном случае и далее под ТК понимается КТС) наличия внезапных либо постепенных СО, оптимизация процесса принятия решения на основе разработанных моделей, автоматизация принятия решений при управлении периодичностью календарного ТК СО ПС.

Таким образом, разработка АСПР УПП ТО с системой оптимизации периодичности ТК СО ПС является актуальной задачей, решение которой позволит повысить точность результатов контроля, сократить время восстановления после обнаружения отказа, что повысит надежность и качество функционирования ПС.

Связь с научными программами, планами и темами. Диссертация выполнена в рамках научного направления кафедр высшей математики и автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета «Стохастические модели автоматизированных производственных систем». Результаты исследований вошли составной частью в отчеты по госбюджетным НИР «Мера-4» (гос. регистрация №0108U001272) и «Мера-5» (гос. регистрация №0111U003331).

Целью диссертационного исследования является повышение отказоустойчивости и экономических характеристик ПС за счет оптимизации периодичности календарного ТК СО ПС на основе разработанных математических моделей. Для достижения цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

- анализ существующих современных стратегий ТК СО ПС;
- разработка полумарковских (ПМ) и имитационных моделей функционирования ПС с учетом ТК СО;

- получение в явном виде функциональных зависимостей критериев эффективности системы от входных параметров;
- верификация разработанных ПМ моделей на основе имитационного моделирования;
- разработка структуры АСПР УПП ТО ПС со СО с учетом КТС;
- оптимизация функционирования ПС со СО с учетом КТС на основе ее надежностных и экономических критериев эффективности.

Объект исследования: многокомпонентная ПС с покомпонентным периодическим ТК внезапных и постепенных СО.

Предмет исследования: процесс контроля-восстановления многокомпонентной ПС со СО с учетом проведения КТС.

Методы исследования. Выполненные в диссертационной работе теоретические исследования ТК СО ПС, базируются на применении различных аппаратов исследований: теории надежности, теории восстановления, теории Марковских и полумарковских процессов (ПМП), теории вероятностей, математической статистики, интегрального и дифференциального исчисления, имитационного моделирования.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые на основе теории ПМП построены математические модели однокомпонентных ПС с учетом календарного ТК постепенных СО методом пробы, найдены в явном виде стационарные характеристики рассматриваемых систем. Это позволило аналитически описать параметры блоков рассматриваемой системы.

2. С помощью метода суперпозиции ПМП впервые найдены характеристики надежности и экономической эффективности функционирования многокомпонентной ПС произвольной структуры с покомпонентным периодическим ТК наличия постепенных или внезапных СО, что позволяет проводить моделирование данных систем.

3. Предложен подход для решения задачи оптимизации на основе сформулированных задач векторной и скалярной оптимизации периодичности КТС ПС, что позволило создать систему поддержки принятия решений по определению оптимальной периодичности контроля.

4. Получила дальнейшее развитие АСПР УПП ТО с учетом проведения календарного ТК СО ПС, что позволило провести оптимизацию периодичности КТС многокомпонентной ПС.

Практическое значение полученных результатов. Результаты работы представлены в госбюджетных НИР «Мера-4» и «Мера-5», внедрены на производство в ООО «Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры». Разработанная АСПР позволяет решать проблемные ситуации определения периодичности экологического мониторинга, неразрушающего контроля технологических систем (вибрационный, температурный контроль, контроль технологических жидкостей), контроля на горно-обогатительных и металлургических предприятиях (контроль проб исходного сырья, промежуточных шихт и конечной продукции) и в других сферах. Разработанные модели КТС СО могут быть использованы для описания процесса ТО с КТС широкого класса ПС, в учебном процессе.

Личный вклад соискателя. При выполнении общих работ с соавторами, лично соискателю принадлежат следующие материалы: [1, 2] — определение характеристик надежности многокомпонентной системы с использованием метода суперпозиции ПМП; [3] — построение математической модели однокомпонентной ПС с учетом ТК внезапных СО методом пробы; [4] — расчет характеристик надежности и экономической эффективности и оптимальной периодичности контроля для конкретного технологического процесса (ТП) на базе разработанной математической модели однокомпонентной ПС с учетом ТК внезапных СО; [5] — определение характеристик надежности двухкомпонентной ПС с покомпонентным мгновенным КТС СО с использованием метода суперпозиции ПМП.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались на ряде научно-технических конференций: «Прикладные задачи математики и механики», г. Севастополь, 12–16 сентября, 2011 г. [6]; «Стратегия качества в промышленности и образовании», г. Варна, Болгария, 3–10 июня 2011 г. [7]; «Автоматика 2011», г. Львов, 28–30 сентября, 2011 г. [8]; «Прикладные задачи математики и механики» г. Севастополь, 10–14 сентября, 2012 г. [9]; «Стратегия качества в промышленности и образовании», г. Варна, Болгария, 8–15 июня 2012 г. [10]; «Автоматизация: проблемы, идеи, решения», г. Севастополь, 3–7 сентября, 2012 г. [11, 12]; ИТММ-2013, г. Днепропетровск, 26 – 28 марта 2013 г. [13]; «Автоматика 2013», г. Николаев, 25–27 сентября, 2013 г. [14]; «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» г. Севастополь, 9 — 13 сентября, 2013 г. [15]; «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013», г. Севастополь, 22–26 апреля 2013 г. [16]; «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке», г. Харьков, 22–24 апреля 2013 г. [17].

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 работ (7 без соавторов), в том числе 5 статей (2 без соавторов) в международных журналах или сборниках научных трудов, которые входят в перечень научных специальных изданий, утвержденных ВАК Украины.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Текст изложен на 144 страницах машинописного текста, в числе которых 24 рисунка и 12 таблиц. В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и указаны возможные пути их применения. Список литературы — 92 наименования. В приложениях представлены: решение системы интегральных уравнений, описание пассивных экспериментов по определению экспериментальных функций распределения (ФР) некоторых параметров установки «WS 330-SF», акт внедрения.

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Проблемы, связанные с разработкой АСПР УПП ТО ПС, остаются актуальными в современных производственных условиях, так как их решение позволяет обеспечить достижение высоких качественных и количественных показателей ТП и продукции, и, как следствие, её конкурентоспособность на мировом рынке.

В параграфе 1.1 рассмотрена установка пайки двойной волной припоя «WS 330-SF» Essemtec как объекта управления. В параграфах 1.2 — 1.3 приводится классификация типов и стратегий ТК и видов СО.

В параграфе 1.4 проведен обзор теоретических исследований в области ТО по техническому состоянию. В параграфе 1.5 представлены сведения из теории ПМП с общим фазовым пространством состояний (ФПС).

Эффективность ПС определяется тем, насколько рационально используются имеющиеся ресурсы. Такие факторы как простои, функционирование в состоянии СО, длительное ТО системы снижают надежность и экономические показатели ПС.

Одним из основных подходов к решению указанной проблемы является разработка АСПР при управлении КТС ПС, что является неотъемлемой частью ТО по техническому состоянию, на стадии эксплуатации, где особенно остро проявляется необходимость в оперативной оценке надежности функционирования ПС и принятии решений о своевременном ТО ПС.

Согласно [18] под ТО по техническому состоянию понимается плановое ТО, при котором КТС выполняется с периодичностью и объемом, установленными в нормативно-технической документации, а объем и момент начала ТО определяются техническим состоянием объекта контроля (ОК).

АСПР УПП ТО ПС должна обеспечивать быстрое реагирование на изменение параметров ПС, характеризующих возможность исправного функционирования системы, и поддержку необходимого уровня безотказности системы с учетом материальных, трудовых и финансовых затрат.

Своевременное проведение КТС для раннего распознавания неисправностей системы и (или) ее компонентов, и сбор, сохранение и обработка на ЭВМ всей информации о состоянии оборудования и привлечение ресурсов системы ТО является необходимыми условиями обоснованного выбора тактики КТС ПС.

1.1 Анализ установки пайки двойной волной припоя «WS 330-SF» Essemtec как объекта управления

В качестве объекта для выбора структуры АСПР и разработки алгоритмов автоматизированного управления периодичностью КТС рассмотрена установка «WS 330-SF» Essemtec для проведения групповой пайки печатных плат с выводными компонентами [19].

Вес установки 265 кг (550 кг в рабочем режиме), габариты — 1700мм*1020мм*1400мм, необходимое рабочее пространство — 2840мм*1020мм, общая мощность — 12 кВт. Внешний вид установки представлен на рисунке 1.1.

В установке выделяются следующие функциональные блоки: транспортная система (конвейер); пенный флюсователь; модуль подогрева (предварительного нагрева); модуль пайки; вытяжная вентиляция; подплатник (рамка, палета).

Длина конвейера 1550 мм, ширина — 470 мм, диапазон скоростей 300 – 2500 мм/мин, организована возможность увеличения времени преднагрева за счет остановки конвейера при прохождении платы зоны преднагрева. Угол наклона конвейера 5-9 градусов.



Рисунок 1.1. Внешний вид установки WS 330-SF Essemtec

На установке используется пенный блок флюсования «ETC 250» ERSA [20] (далее флюсователь). Объем флюсователя 2 литра. Рабочая ширина 250 мм. Флюсователь оснащен средствами удаления избытка флюса с печатной платы (ПП) (воздушный нож).

Модуль предварительного нагрева является конвекционной печью с двумя температурными зонами. Температура задается для каждой зоны отдельно. Максимальная температура в каждой из зон — 300 °С. Длина каждой зоны 700 мм. Суммарная циркуляция воздуха в зоне предварительного нагрева 1000 м³/час.

Вытяжная вентиляция должна состоять из двух патрубков диаметром 150 мм, отдельно для блока флюсователя и для блока пайки. Производительность вытяжки для каждого из них не должна быть ниже 600 м³/час. Температура воздуха в вытяжке не превышает 45 °С.

Модуль пайки позволяет проводить пайку как свинцовыми, так и безсвинцовыми припоями. Емкость ванны для припоя 220 кг. Возможность

организации λ - и chip -волны. Диапазон температуры нагрева припоя 230 – 300 °С. Время разогрева ванны 2 ч.

Установка имеет встроенную микропроцессорную систему управления и контроля. Данная система позволяет задавать 80 режимов работы установки. Кроме того проводится непрерывный контроль встроенными средствами контроля (СК) следующих параметров установки: скорость конвейера, температура в каждой из зон предварительного нагрева, температура припоя в ванне, давления в общей магистрали вентиляционной системы. Данные параметры устанавливаются при выборе режима пайки оператором.

Технологические этапы процесса волновой пайки приведены на рисунке 1.2.

ПП с установленными на ней выводными компонентами устанавливается в рамку и через устройство загрузки передается на транспортер линии пайки. Конвейер последовательно перемещает ПП через блоки линии пайки. В блоке флюсования поверхность монтажных элементов, подлежащих пайке, смачивается флюсом, подающимся в виде пены к нижней поверхности ПП.

В блоке подогрева происходит испарение жидкости, используемой в качестве растворителя флюса, необходимого для предотвращения разбрызгивания расплавленного припоя при попадании на него капелек жидкого флюса с поверхности ПП, а также подогрев ПП до 75-135 °С с целью уменьшения термоудара при погружении ПП в волну расплавленного припоя при температуре 260-280 °С. Температура нагрева ПП при пайке должна быть максимальной, но не выше той, которую допускают элементы, установленные на ПП.

В настоящее время установка работает в одну смену. Между сменами производится планово-предупредительный и профилактический ремонт в соответствии с эксплуатационной документацией [19], [20].

Кроме плановых ТО, которые прописаны в руководстве к эксплуатации установкой, на установке пайки волной припоя проводится периодический ТК

ряда параметров непосредственно во время функционирования установки. Введение одного контроля для проверки соответствия всех параметров не представляется возможным ввиду различия контролируемых объектов, методов контроля и порядков времен наступления СО (постепенных либо внезапных) отказов для разных блоков установки пайки волной припоя.

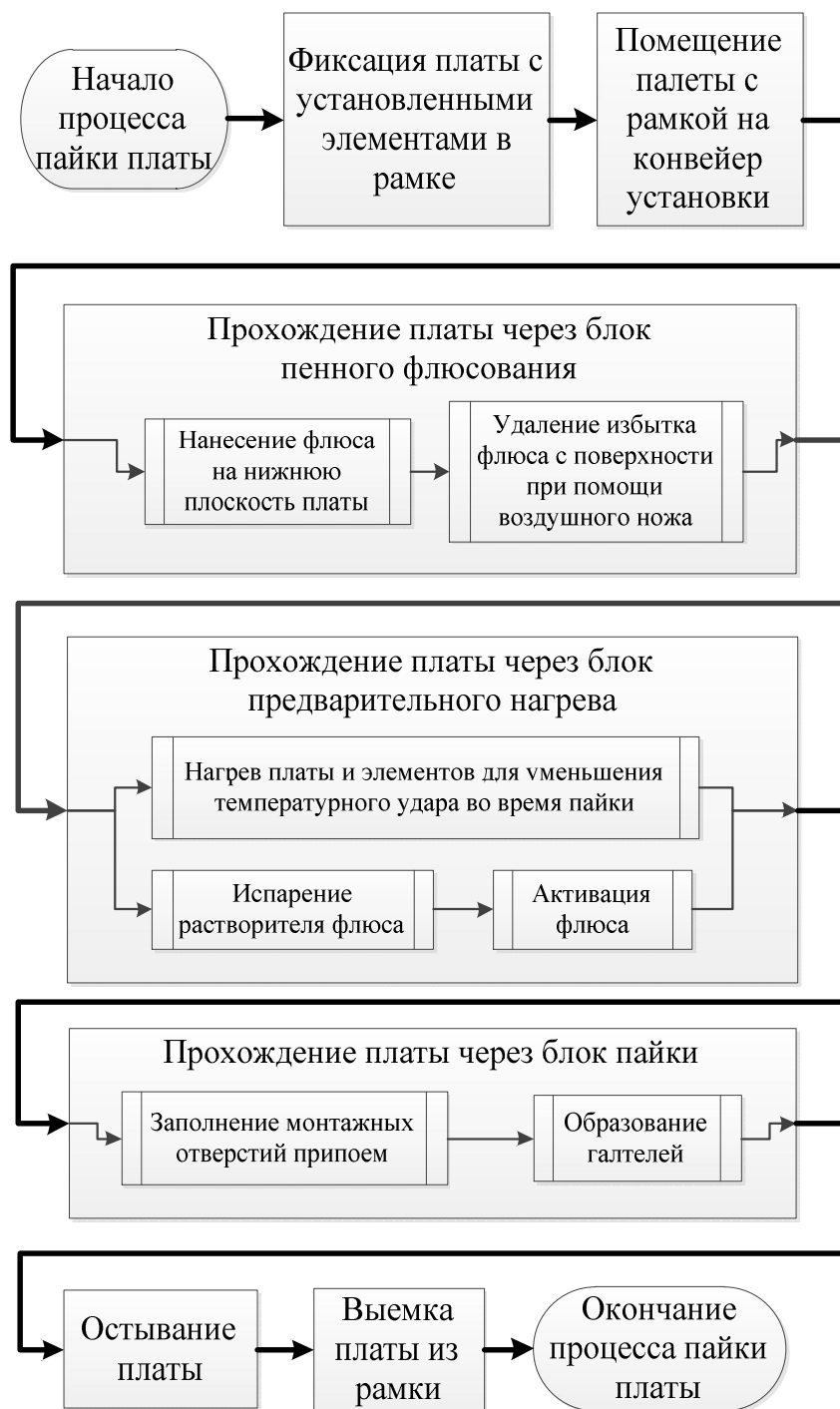


Рисунок 1.2. ТП пайки ПП с выводными компонентами на установке пайки волной припоя

Операции контроля, проведение которых требуется во время функционирования установки и для которых представляется возможным провести оптимизацию периодичности, сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Операции КТС на установке пайки волной припоя

ТК	Методика КТС	Контролируемый параметр	Блок ПС	Вид СО	Тип системы
Плотности флюса	Проводится взятие пробы флюса с последующим замером плотности с остановкой работы блока	Плотность флюса	Флюсователь	Постепенный	Однокомп. ПС с наличием постепенных СО с проведением искусственного календарного КТС
Температурных параметров	На печатную плату крепятся датчики, плата проходит пайку, после завершения пайки проводится анализ температурного профиля	Скорость нагрева платы	Преднагрев	Внезапный	Однокомп. ПС с наличием внезапных СО с проведением естественного календарного КТС методом пробы
		Температура предварительного нагрева			
		Температура пайки	Ванна припоя		
Качества припоя	Происходит взятие пробы припоя из ванны, полученная проба передается на анализ в лабораторию	Состав припоя	Ванна припоя	Постепенный	Однокомп. ПС с наличием постепенных СО с проведением естественного календарного КТС методом пробы

Для операций, которые проводятся с использованием внешних СК, требования относительно периодичности проведения КТС блоков зависят от конкретных условий проведения пайки: используемые материалы, размеры и виды ПП, режимы пайки и др. Это приводит к необходимости создания и

внедрения АСПР УПП ТО установки пайки волной припоя. Данная система управления должна определять оптимальный алгоритм проведения КТС блоков, на основе статистических данных работы компонентов, используемого метода контроля и критериев оптимизации.

С точки зрения АСПР УПП ТО, установка пайки волной припоя является системой, состоящей из трех независимых компонентов. Каждый из компонентов в свою очередь представляет собой КТС однокомпонентной системы со СО.

1.2 Характеристики и стратегии технического контроля

Технический контроль представляют собой совокупность ОК, технических устройств, программного обеспечения и человека-оператора, позволяющих осуществить контроль.

Стратегией контроля называется правило, однозначно определяющее выбор характеристик контроля с учетом структуры контролируемой системы.

Система — совокупность приборов и устройств, состоящих из элементов, объединенных общей конструкцией или соответствующей схемой соединения. Однако функциональное разделение приборов и устройств на элементы не всегда совпадает с конструктивным разделением их на блоки.

Компонент — составляющая часть, элемент чего-либо. В случае если система функционально состоит из одного элемента, который нет смысла разделять с точки зрения наступления скрытых отказов, то ее называют однокомпонентной. Систему, которая имеет структуру, состоящую из $n \geq 2$ неделимых элементов, называют многокомпонентной.

Согласно ГОСТ 16504–81 Процессы ТК классифицируются по различным признакам, основные из которых приведены в таблице 1.2.

Неразрушающий контроль — вид ТК, после проведения которого ОК остается пригодным к использованию по назначению.

Таблица 1.2. Классификация видов ТК

Классификационный признак	ТК
ОК	Качества продукции
	Технической документации
	Средств технического оснащения
	Технологического процесса
Этапы процесса производства	Входной
	Операционный
	Приемочный
Связь с ОК во времени	Летучий
	Непрерывный
	Периодический
Влияние на ОК	Разрушающий
	Неразрушающий
Применяемые СК	Измерительный
	Регистрационный
	По контрольному образцу
	Органолептический
Степень механизации и автоматизации	Ручной
	Механизированный
	Автоматизированный
	Автоматический
Характер воздействия на ход производственного процесса	Активный
	Пассивный
Режим контроля	Естественный
	Искусственный
Наличие ошибок контроля	Идеальный
	Неидеальный

Измерительный контроль — контроль, осуществляемый с применением средств измерения.

При измерительном контроле различают методы: количественной оценки параметров (применяются измерительные приборы и инструменты) и качественной оценки параметров, соответствующие принципу «да»-«нет».

Активный контроль — производственный контроль, результаты которого используются для непрерывного управления процессом изготовления.

Естественный режим контроля предусматривает проведение контроля работающей системы, и *искусственный*, используемый при неработающей системе.

Идеальный контроль работоспособности системы – это контроль, при котором все возникающие отказы обнаруживаются достоверно.

Неидеальный контроль работоспособности системы – это контроль, при котором возникают скрытые отказы контроля, а также ошибки АСК.

Операционный контроль проводят с целью своевременного предотвращения отступлений от требований конструкторской и нормативно-технической документации при изготовлении деталей, а также выявление характера и причин отклонений от ТП в ходе производства.

Задачами операционного контроля являются:

- проверка соответствия режимов и параметров ТП требованиям технологической документации;
- регулирование ТП, т.е. внесение необходимых корректив по результатам проверки его режимов и параметров.

Проведение *контроля методом взятия пробы* характеризуется взятием образца ОК, который анализируется в течение определенного времени (время контроля). По результатам анализа определяется техническое состояние ПС. Следует акцентировать внимание, что в данном случае определяется техническое состояние системы на момент взятия пробы.

В диссертационной работе рассматривается идеальный календарный КТС системы с полным восстановлением работоспособности ОК. В параграфах 2.1 и 2.3 рассмотрен естественный контроль, в параграфе 2.2 — искусственный контроль.

1.3 Виды и характеристики отказов

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Работоспособное состояние (работоспособность) — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Согласно ГОСТ 27.002–89 и [18] отказы производственных систем классифицируются по различным признакам, основные из которых приведены в таблице 1.3.

Термины «внезапный отказ» и «постепенный отказ» позволяют разделять отказы на две категории в зависимости от возможности прогнозировать момент наступления отказа. В отличие от внезапного отказа, наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить наступление отказа и (или) принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий. В документе [21] дано следующее определение внезапного отказа: это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

По мере совершенствования расчетных методов и средств контрольно-измерительной техники, позволяющих своевременно обнаруживать источники возможных отказов и прогнозировать их развитие во времени, все большее число отказов относят к категории постепенных.

Таблица 1.3. Классификация видов отказов

Отказ	Определение
<i>по возможности восстановления объекта:</i>	
Устранимый	отказ, после возникновения которого работоспособность объекта подлежит восстановлению
Неустранимый	отказ, после возникновения которого работоспособность объекта восстановлению не подлежит в рассматриваемых условиях эксплуатации
<i>по способу обнаружения:</i>	
Явный	отказ, появление которого сопровождается признаками, непосредственно воспринимаемыми органами чувств наблюдателя или средствами контроля, без проведения дополнительных операций по контролю работоспособности объекта
Скрытый	отказ, обнаружение которого невозможно без проведения специальных операций по контролю работоспособности объекта
<i>по скорости изменения параметров объекта:</i>	
Внезапный	отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта
Постепенный	отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта
<i>по сохранению функциональности системы:</i>	
Параметрический	отказ, характеризующийся отклонением значения хотя бы одного рабочего параметра объекта за пределы допуска. У технологических систем в результате параметрического отказа сохраняется функционирование, но происходит выход значений одного или нескольких показателей качества предмета производства и (или) ритма выпуска за пределы, допускаемые в нормативно-технической документации
Функциональный	отказ, характеризующийся прекращением функционирования системы

При возможности возникновения в системе параметрического отказа для предупреждения его наступления используют *диагностический признак (параметр) объекта* — признак (параметр) объекта диагностирования, используемый в установленном порядке для определения технического

состояния объекта. Для этого вводят *упреждающий допуск диагностического параметра* (УД) — диапазон изменения диагностического параметра, в котором, в соответствии с эксплуатационной или ремонтной документацией, нарушается исправность изделия при сохранении его работоспособности.

При нахождении диагностического параметра в УД система находится в *предотказном состоянии*.

В данной работе будут рассматриваться *устраняемые параметрические скрытые отказы* (далее скрытые отказы, СО) ПС различных типов согласно приведенной классификации. В параграфе 2.1 рассмотрены внезапные СО, в параграфах 2.2 и 2.3 — постепенные СО.

1.4 Теоретические исследования в области контроля скрытых отказов

Основополагающая роль обеспечения надежности большинства ПС со СО отводится ТО по техническому состоянию (ТО с КТС).

В [22, 23] приводятся различные статистические данные по поводу использования различных стратегий ТО, используемых методов и полученной выгоды при обслуживании технологического оборудования в химической промышленности. Приводится, что в 55% случаев используется стратегия ТО с КТС системы, в 29% — ТО по наработке, в 16% — другие стратегии. Основные методики КТС: анализ уровня вибрации и шума (35%), анализ теплового излучения (5%), анализ смазочных материалов и технологических жидкостей (13%), ультразвуковая диагностика (5%), неразрушающий контроль (41%), другие методики (1%). Акцентируется внимание на том, что использование ТО с КТС позволило в 33% случаев увеличить срок службы оборудования, в 2% — повысить производительность, в 23% случаев — снизить использование запасных деталей, в 16% случаев — снизить затраты на рабочую силу, в 2% случаев — сократить отходы производства. Кроме того в [22] проводится анализ видов отказов технических систем и методов диагностики.

В книге [24] рассматриваются методы обеспечения безотказности сложных технических систем на различных этапах их жизненного цикла: при разработке, производстве и эксплуатации. Основное внимание уделяется системным методам качественного анализа безотказности («дерево отказов», метод анализа характера и последствий потенциальных отказов), превентивным методам борьбы с отказами (принципы обеспечения бездефектного производства, обнаружение предотказного состояния и предотвращения отказов в эксплуатации). Большой раздел посвящен методологическим основам предотвращения отказов при эксплуатации технических систем. Приводятся статистические данные, говорящие о том, что большинство эксплуатационных отказов носит постепенный характер и связано это с нарастающим старением систем и развитием СК. Отмечено, что затраты на обеспечение качества продукции распределяются следующим образом: 5-10% на предупредительные мероприятия (анализ производственных процессов, исследование в области надежности, создание системы сбора информации, содержание управленческого аппарата по качеству продукции и др.); 16-32% на оценку качества продукции (входной контроль, проведение текущего контроля и испытаний, содержание контрольно-измерительной лаборатории и т.д.); 79-58% на мероприятия, связанные с браком (анализ дефектов, исправление дефектов, потери от брака, изготовление деталей взамен дефектных, содержание станций обслуживания и т.д.).

На основе приведенной статистики можно резюмировать, что проведение ТО по техническому состоянию является наиболее перспективной стратегией ТО на данный момент, так как проведение КТС позволяет выявить предотказное состояние системы и предотвратить появление СО.

Очевидно, что полноценное использование КТС невозможно без математического моделирования ПС. В научно-технической литературе присутствуют различные модели ТК ПС: вероятностно-аналитические модели [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]; имитационные [34, 35, 36, 37]; модели,

использующие аппарат теории сетей [38, 39]; модели на основе теории расписаний [40, 41] и др.

Работа [42] посвящена различным видам ТО с КТС. Рассматриваются следующие вопросы: экономическая эффективность различных видов ТО; роль систем управления при организации КТС; преимущества ТО с КТС по сравнению с другими методами ТО; виды КТС при мониторинге различных параметров ПС; методики проведения КТС. Детально рассматривается вибрационный, температурный метод КТС и анализ содержания твердых частиц в смазочных материалах и содержания загрязняющих веществ в технологических жидкостях. В книге отмечается, что ТО с КТС ПС не может улучшить эффективность системы без использования АСПР УПП ТО.

В монографии [43] разбирается ТО с КТС ПС. Рассматриваются различные виды СО и методы их обнаружения. Рассматриваются четыре возможных состояния системы: работоспособное состояние системы, работа в предотказном состоянии, функционирование со СО, явный отказ с прекращением функционирования. Приводятся методики определения величин УД при контроле параметрического отказа и алгоритмы проведения КТС.

В книге [44] показывается, как КТС может быть использован для обнаружения СО в технических системах, что позволяет проводить ТО по техническому состоянию, основываясь на фактическом состоянии оборудования. Автор выделяет пять общих категорий КТС ПС: контроль вибрации; визуальный осмотр и неразрушающий контроль; мониторинг производительности; анализ содержания твердых частиц в смазочных материалах и содержания загрязняющих веществ в технологических жидкостях; а также электромагнитные испытания на производстве. В книге подробно рассматриваются два метода КТС: анализ вибрации, анализ производительности. Автор акцентирует внимание, что использование автоматизированных систем управления контролем позволяет максимально полно использовать преимущества КТС: раннее выявление параметрических и

деградационных отказов, сведения к минимуму затрат на капитальный ремонт оборудования и эксплуатационные затраты, экономия энергетических ресурсов.

В монографии [29] достаточно полно представлено большинство разделов современной теории надежности. Одно из центральных мест занимают главы, посвященные оптимизации ТО. В качестве критериев оптимальности служат прежде всего средние затраты на восстановление в единицу времени (интенсивность затрат на восстановление) и коэффициент готовности. При рассмотрении простых систем сделаны следующие принципиальные предположения: система всегда находится в одном из двух состояний: работоспособности или отказа; распределение наработки системы принадлежит классу возрастающих функций интенсивности; соответствующая плотность распределения существует и является непрерывной; процесс функционирования системы продолжается неограниченно долго; все мероприятия по восстановлению осуществляются за пренебрежимо малое время, после чего система мгновенно начинает работу.

Монография [33] посвящена построению вероятностных моделей функционирования систем, на основе которых методами теории вероятностей решается ряд задач нахождения оптимальных правил обслуживания систем. Приводится ряд типовых примеров ТО. Всем этим примерам присущи общие черты: имеется объект, поведение которого является случайным; требуется выбрать режим профилактики; выбор режима должен быть подчинен заданному критерию оптимальности. Таким образом, поиск оптимального режима обслуживания трактуется как задача нахождения оптимального управления случайным процессом. Приводятся модели профилактики, которые удастся рассмотреть в рамках теории управляемых ПМП. Рассмотрены ситуации, имеющие следующую особенность: система (элемент) имеет только два состояния — исправности и неисправности (отказа), известна ФР времени безотказной работы. Рассматривается профилактика систем, у которых можно помимо состояний исправности и отказа выделить ряд «промежуточных»

состояний, дающих возможность судить о степени «приближения» системы к отказу (постепенный отказ).

В монографии [45] рассмотрены вопросы использования современной методологии и математических методов надежности и эффективности при создании, отработке и применении сложных технических систем, а также вопросы их обслуживания и эксплуатации, оценки надежности и эффективности, связанные с учетом динамики структуры сложных технических систем, роли оператора и вопросов диагностики.

В монографии [46] дается краткая характеристика сложных систем и средств их обслуживания. Излагаются различные математические модели эксплуатации сложных систем. Подробно рассматриваются вопросы повышения достоверности контроля сложных систем, диагностики их технического состояния, взаимодействия оператора и сложной системы.

В монографии [47] для моделирования многокомпонентных ПС, в том числе автоматизированных линий, применяется комплекс математических методов и моделей, построенных на основе итерационного подхода с использованием марковских и ПМ процессов с дискретным и общим ФПС.

В работах [48, 49, 50] рассмотрен ряд ПМ моделей однокомпонентных систем с проведением ТК наличия СО. Рассматривается процесс естественного и искусственного контроля.

В работе [51] для моделирования двухкомпонентных систем используется суперпозиция двух процессов восстановления либо двух альтернирующих процессов восстановления. В работе [30] рассмотрено и дано определение суперпозиции конечного числа независимых процессов Марковского восстановления (ПМВ), каждый из которых может находиться в дискретном множестве состояний. В [52] приведена теория по нахождению стационарных характеристик многокомпонентных систем, состоящих из конечного числа независимых компонентов с использованием метода суперпозиции.

Модели контроля СО также рассматривались в работах В.А. Каштанова, Г.Н. Черкесова, Е.Ю. Барзиловича, И.А. Ушакова, Б. Винтера, С. Ферсмана, Б. Гласа, Р. Джонсона, Дж. Брюле, Е. Клетски.

Таким образом, чаще остальных для расчета показателей надежности и качества функционирования восстанавливаемых систем используются марковские и ПМ процессы. Кроме того, использование ПМП не требует специальных предположений о характере исходных данных. Однако большинство результатов получено для однокомпонентных систем и систем с экспоненциальным и нормальным распределениями. Мало внимания уделяется построению ПМ моделей обнаружения постепенных СО и моделей контроля методом взятия пробы.

Обзор теоретических работ, выполненный в параграфе 1.4, позволяет сделать вывод, что для построения моделей процесса КТС восстанавливаемых ПС, наиболее перспективным является метод, основанный на применении ПМП с общим ФПС. Основная трудность, которая при этом возникает, состоит в размерности моделей. Данная проблема может быть решена с помощью метода суперпозиции ПМП. Этот метод применяется в диссертации.

1.5 Характеристики надежности и экономической эффективности восстанавливаемых систем, описываемых полумарковскими процессами с общим фазовым пространством состояний

Приведем определения и положения теории ПМП с общим ФПС [30], которые будут использованы в работе.

Определение. ПМ ядром в измеримом пространстве $(E, \mathbf{B})$ называется функция $Q(t, x, B)$, удовлетворяющая условиям:

- $Q(t, x, B)$ — неубывающие, непрерывные справа функции по $t \geq 0$, $Q(0, x, B) = 0$, $x \in E$, $B \in \mathbf{B}$;

- $Q(t, x, B)$ при фиксированном $t > 0$ является полустохастическим ядром:
 $Q(t, x, B) \leq 1$;
- $Q(+\infty, x, B)$ является стохастическим ядром по x, B , т.е. $Q(+\infty, x, E) \equiv 1$.

Для задания ПМП используются ПМВ.

Определение. ПМВ называется двухмерная цепь Маркова $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ со значениями в $E \times [0, \infty)$, вероятности перехода которой определяются равенством:

$$P\{\xi_{n+1} \in B, \theta_{n+1} \leq t / \xi_n = x\} = Q(t, x, B),$$

где $Q(t, x, B)$ – ПМ-ядро в $(E, \mathbf{B})$.

Первая компонента $\{\xi_n; n \geq 0\}$ ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$ является цепью Маркова, переходные вероятности которой определяются через ПМ-ядро $Q(t, x, B)$ равенством:

$$P(x, B) = P\{\xi_{n+1} \in B / \xi_n = x\} = Q(+\infty, x, B),$$

она называется вложенной цепью Маркова (ВЦМ) ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$.

Случайная величина (СВ) $\theta_n, n \geq 0$, составляющие вторую компоненту ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$, определяют интервалы между моментами марковского восстановления τ_n :

$$\tau_n = \sum_{k=1}^n \theta_k, n \geq 1, \tau_0 = 0.$$

Рассмотрим считающий процесс $\nu(t): \nu(t) = \sup\{n: \tau_n \leq t\}$, процесс $\nu(t)$ считает число моментов марковского восстановления на отрезке $[0, t]$.

Определение. Процесс $\xi(t) = \xi_{\nu(t)}$ называется ПМП, соответствующим ПМВ $\{\xi_n, \theta_n; n \geq 0\}$.

Из определения следует, что ПМП является скачкообразным процессом, траектории которого непрерывны справа: $\xi(t+0) = \xi(t)$.

В другом способе задания ПМП, задаются:

- стохастическое ядро

$$P(x, B) = P\{\xi_{n+1} \in B \mid \xi_n = x\}, x \in E, B \in \mathbf{B};$$

- ФР времен пребывания на переходах ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$

$$G(t, x, y) = G_{xy}(t) = P\{\theta_{n+1} \leq t \mid \xi_n = x, \xi_{n+1} = y\}.$$

Тогда ПМ ядро $Q(t, x, B)$ определяется по формуле

$$Q(t, x, B) = \int_B G(t, x, y) P(x, dy).$$

Стационарное распределение $\rho(\cdot)$ ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ удовлетворяет интегральному уравнению:

$$\rho(B) = \int_E \rho(de) P(e, B), B \in \mathbf{B}. \quad (1.1)$$

Пусть некоторая система S описывается ПМП $\xi(t)$ с фазовым пространством $(E, \mathbf{B})$. Предположим, что $E_\eta \subset E$ есть фиксированное подмножество состояний. Тогда множество состояний ПМП $\xi(t)$ можно представить в виде:

$$E = E_\eta \cup \bar{E}_\eta, E_\eta \cap \bar{E}_\eta = \emptyset, E_\eta \in \mathbf{B}, \bar{E}_\eta \in \mathbf{B}.$$

Здесь $\bar{E}_\eta = E \setminus E_\eta$ — дополнительное множество к E_η .

Известно [30], что если существует единственное стационарное распределение ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$ ПМП $\xi(t)$, описывающего функционирование системы S , то при некоторых предположениях доля времени $\pi(E_\eta)$ пребывания в фиксированном подмножестве состояний E_η ПМ процесса в установившемся режиме и среднее стационарное время $T(E_\eta)$ пребывания ПМП в подмножестве состояний E_η определяются равенствами:

$$\pi(E_\eta) = \frac{\int_{E_\eta} m(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)}, \quad (1.2)$$

$$T(E_\eta) = \frac{\int_{E_\eta} m(e) \rho(de)}{\int_{E_\eta} \rho(de) P(e, \bar{E}_\eta)} = \frac{\int_{E_\eta} m(e) \rho(de)}{\int_{\bar{E}_\eta} \rho(de) P(e, E_\eta)}, \quad (1.3)$$

где $\rho(\cdot)$ — стационарное распределение ВЦМ $\{\xi_n; n \geq 0\}$, $m(e)$ — среднее время пребывания в состоянии $e \in E$. Отметим, что $\pi(E_\eta)$, $T(E_\eta)$ и $T(\bar{E}_\eta)$ связаны соотношением:

$$\pi(E_\eta) = \frac{T(E_\eta)}{T(E_\eta) + T(\bar{E}_\eta)}. \quad (1.4)$$

Приведем определения и формулы для основных надежностных характеристик восстанавливаемых систем, описываемых ПМП.

Пусть некоторая система S описывается ПМП $\xi(t)$ с фазовым пространством $(E, \mathbf{B})$. Предположим, что множество состояний ПМП $\xi(t)$ представлено в виде:

$$E = E_+ \cup E_-, \quad E_+ \cap E_- = \emptyset, \quad E_+ \in \mathbf{B}, \quad E_- \in \mathbf{B},$$

где E_+ интерпретируется как множество работоспособных состояний системы S , а E_- — множество неработоспособных состояний системы.

Часто используются следующие характеристики восстанавливаемых систем:

- а) стационарный коэффициент готовности K_T (доля времени пребывания в работоспособном подмножестве состояний E_+),
- б) наработка на отказ системы T_+ (среднее стационарное время безотказной работы системы),
- в) среднее стационарное время восстановления системы T_- .

С учетом выражений (1.2), (1.3) характеристики T_+ , T_- , K_Γ находятся по формулам:

$$T_+ = T(E_+) = \frac{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}{\int_{E_+} \rho(de) P(e, E_-)}, \quad (1.5)$$

$$T_- = T(E_-) = \frac{\int_{E_-} m(e) \rho(de)}{\int_{E_+} \rho(de) P(e, E_-)}. \quad (1.6)$$

$$K_\Gamma = \pi(E_+) = \frac{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)}. \quad (1.7)$$

Отметим, что характеристики K_Γ , T_+ , T_- связаны соотношением:

$$K_\Gamma = \frac{T_+}{T_+ + T_-}. \quad (1.8)$$

Экономическими критериями оценки качества функционирования ПС с учетом проведения контроля и ТО на бесконечном интервале времени являются [29, 46, 28, 53]: S — средняя прибыль в единицу календарного времени ; C — средние затраты в единицу времени исправного функционирования.

Средняя прибыль определяется следующим выражением [54]:

$$S = \frac{\int_E m(e) f_s(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)}, \quad (1.9)$$

где $f_s(e)$ — ограниченная В-измеримая функция, определяющая прибыль в каждом состоянии.

Средние затраты определяются зависимостью [55]:

$$C = \frac{\int_{E_+} m(e) f_c(e) \rho(de)}{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}, \quad (1.10)$$

где $f_c(e)$ — ограниченная В-измеримая функция, определяющая затраты в каждом состоянии.

Отметим, что по определению прибыль в общем случае определяется разностью дохода, получаемого от работы системы, и затрат, необходимых для обеспечения данной работы. Это позволяет связать функции $f_s(e)$ и $f_c(e)$ следующим соотношением:

$$f_s(e) = \begin{cases} f'_s(e), & e \in E_+, \\ -f_c(e), & e \in E, \end{cases}$$

где $f'_s(e)$ — ограниченная В-измеримая функция, определяющая доход в каждом состоянии системы из подмножества E_+ (очевидно, что в множестве E_- система не приносит дохода).

С учетом данного выражения, (1.7) можно преобразовать к следующему виду:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\int_{E_+} m(e) f'_s(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} - \frac{\int_E m(e) f_c(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} = \frac{\int_{E_+} m(e) f'_s(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} - \\ &- \frac{\int_E m(e) f_c(e) \rho(de)}{\int_{E_+} m(e) \rho(de)} \frac{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} = \frac{\int_{E_+} m(e) f'_s(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} - C \cdot K_\Gamma. \end{aligned}$$

Отметим, что в случае, когда удельный доход системы за единицу времени функционирования в работоспособном состоянии задается постоянной величиной $f'_s(e) = g_+$, где g_+ — доход, получаемый за единицу времени

исправного функционирования системы, данное уравнение может быть преобразовано следующим образом:

$$S = g_+ \frac{\int_{E_+} m(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} - C \cdot K_\Gamma = (g_+ - C) K_\Gamma.$$

Это позволяет ввести зависимость используемых параметров надежности и эффективности системы для случая, когда $f'_s(e) = g_+$:

$$\begin{cases} S = (g_+ - C) K_\Gamma, \\ C = g_+ - \frac{S}{K_\Gamma}, \\ K_\Gamma = \frac{S}{g_+ - C}. \end{cases} \quad (1.11)$$

Если:

- 1) в рассматриваемой системе можно выделить n различных независимых процессов η_i влияющих на доход системы, при этом совокупность выделенных процессов η_i , $i \in \overline{1, n}$ составляют множество $\mathbf{H}$;
- 2) в рассматриваемой системе можно выделить m различных независимых процессов σ_j влияющих на затраты системы, при этом совокупность выделенных процессов σ_j , $j \in \overline{1, m}$ составляют множество $\mathbf{\Sigma}$;
- 3) из множества E , можно выделить подмножество $E_\eta \subset E$, $\forall \eta \in \mathbf{H}$, в которых процесс η влияет на доход системы, и подмножество $E_\sigma \subset E$, $\forall \sigma \in \mathbf{\Sigma}$, в которых процесс σ влияет на затраты в системе;
- 4) $f'_s(e) = g_\eta$, $\forall e \in E_\eta$, $E_\eta \subset E$; где $g_\eta = const$, $g_\eta \geq 0$;
- 5) $f'_s(e) = -c_\sigma$, $\forall e \in E_\sigma$, $E_\sigma \subset E$; где $c_\sigma = const$, $c_\sigma \geq 0$;

то

$$S = \sum_{\forall \eta \in \mathbf{H}} g_\eta \pi(E_\eta) - \sum_{\forall \sigma \in \mathbf{\Sigma}} c_\sigma \pi(E_\sigma). \quad (1.12)$$

Покажем, что выражение (1.12) является следствием из (1.9) и условий 1)-5). Согласно условиям 1)-5), функция $f_s(e)$ примет вид:

$$f_s(e) = \begin{cases} g_{\eta 1}, e \in E_{\eta 1}, \\ \dots \\ g_{\eta n}, e \in E_{\eta n}, \\ -c_{\sigma 1}, e \in E_{\sigma 1}, \\ \dots \\ -c_{\sigma m}, e \in E_{\sigma m}. \end{cases}$$

Тогда среднюю прибыль, приходящуюся на единицу календарного времени, можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\sum_{i=1}^n \int_{E_{\eta i}} m(e) g_{\eta i} \rho(de) - \sum_{j=1}^m \int_{E_{\sigma j}} m(e) c_{\sigma j} \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} = \sum_{i=1}^n g_{\eta i} \frac{\int_{E_{\eta i}} m(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} - \\ &- \sum_{j=1}^m c_{\sigma j} \frac{\int_{E_{\sigma j}} m(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)} = \sum_{i=1}^n g_{\eta i} \pi(E_{\eta i}) - \sum_{j=1}^m c_{\sigma j} \pi(E_{\sigma j}). \end{aligned}$$

Введем дополнительные экономические характеристики системы.

Средний доход в единицу календарного времени G_η в системе от производственного процесса η определяется следующим выражением:

$$G_\eta = \frac{\int_{E_\eta} m(e) f_s^{(\eta)}(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)},$$

где $f_s^{(\eta)}(e)$ — ограниченная В-измеримая функция, определяющая доход от процесса η в каждом состоянии системы из подмножества E_η .

Средние затраты в единицу календарного времени $\tilde{C}_\sigma$ в системе от производственного процесса σ определяются следующим выражением:

$$\tilde{C}_\sigma = \frac{\int_{E_\sigma} m(e) f_s^{(\sigma)}(e) \rho(de)}{\int_E m(e) \rho(de)},$$

где $f_s^{(\sigma)}(e)$ — ограниченная В-измеримая функция, определяющая затраты от процесса σ в каждом состоянии системы из подмножества E_σ .

С учетом введенных определений и специального вида функции $f_s(e)$ среднюю прибыль системы в единицу календарного времени можно представить как разность суммы средних доходов системы

$\sum_{\forall \eta \in \mathbf{H}} G_\eta = \sum_{\forall \eta \in \mathbf{H}} g_\eta \pi(E_\eta)$ в единицу календарного времени и суммы средних

затрат системы $\sum_{\forall \sigma \in \Sigma} \tilde{C}_\sigma = \sum_{\forall \sigma \in \Sigma} c_\sigma \pi(E_\sigma)$ в единицу календарного времени:

$$S = \sum_{\forall \eta \in \mathbf{H}} G_\eta - \sum_{\forall \sigma \in \Sigma} \tilde{C}_\sigma. \quad (1.13)$$

1.6 Выводы и постановка задач исследований

Анализ структуры и путей повышения надежности восстанавливаемой многокомпонентной ПС, обзор теоретических исследований в области ТО по техническому состоянию позволили сформулировать цель и задачи данной работы.

Целью диссертационного исследования является повышение отказоустойчивости и экономических характеристик ПС за счет оптимизации периодичности календарного ТК СО ПС на основе разработанных математических моделей.

Для достижения цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. анализ существующих современных стратегий ТК СО ПС;
2. разработка ПМ и имитационных моделей (ИМ) функционирования ПС с учетом ТК СО;

3. получение в явном виде функциональных зависимостей критериев эффективности системы от входных параметров;
4. верификация разработанных ПМ моделей на основе имитационного моделирования;
5. разработка структуры АСПР УПП ТО ПС со СО с учетом КТС;
6. оптимизация функционирования ПС со СО с учетом КТС на основе ее надежности и экономических критериев эффективности.

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА ПОЛУМАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ СО СКРЫТЫМИ ОТКАЗАМИ

*В настоящем разделе построены математические модели идеального календарного КТС однокомпонентных систем с внезапными и постепенными СО. Для построения моделей контроля использован аппарат **теории ПМП** с общим ФПС [30, 56].*

В параграфе 2.1 рассмотрена модель проведения естественного периодического КТС системы с внезапными СО методом пробы. В параграфе 2.2 рассмотрена модель проведения искусственного календарного КТС системы с постепенными СО. В параграфе 2.3 рассмотрена модель проведения естественного календарного КТС системы с постепенными СО методом пробы. Для исследуемых системы найдены стационарные надежность и экономические характеристики их функционирования.

В параграфе 2.4 обоснован выбор имитационного моделирования для проведения верификации аналитических моделей ПС, построена имитационная модель проведения естественного календарного КТС системы с постепенными СО методом пробы, определено необходимое количество итераций для выхода на стационарный режим, проведено сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования.

2.1 ПМ модель проведения естественного периодического КТС системы с внезапными СО методом пробы

Рассмотрим однокомпонентную систему, функционирующую следующим образом. В начальный момент времени система начала работу, контроль включен. Время безотказной работы компонента — СВ α с ФР $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$ и плотностью распределения (ПР) $f(t)$. Контроль начинается через случайные (в общем случае) интервалы времени δ с ФР $R(t) = P\{\delta \leq t\}$ и ПР $r(t)$. СО обнаруживается, только если он произошел до момента начала

контроля. Длительность проведения контроля — СВ γ с ФР $V(t) = P\{\gamma \leq t\}$ и ПР $v(t)$. После завершения контроля начинается отсчет времени до следующего контроля. В случае обнаружения отказа компонента начинается восстановление (принимается решение о начале ТО). Время восстановления (длительность ТО) — СВ β с ФР $G(t) = P\{\beta \leq t\}$ и ПР $g(t)$. На время ТО контроль отключается. После ТО все свойства системы полностью обновляются.

Временная диаграмма функционирования системы приведена на рисунке 2.1. Граф переходов системы представлен на рисунке 2.2.

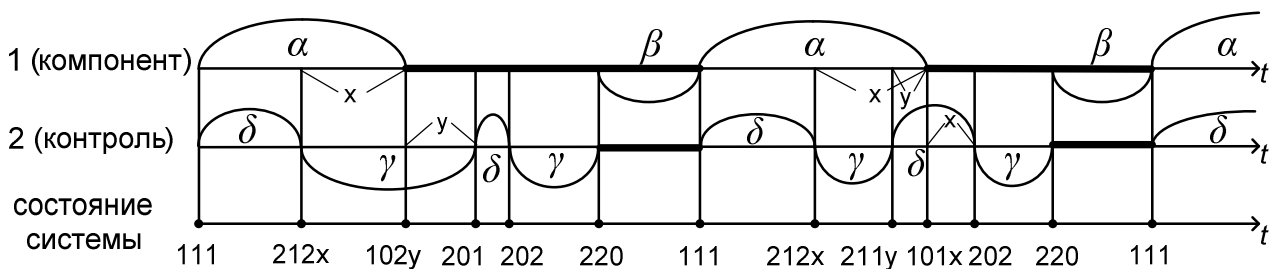


Рисунок 2.1. Временная диаграмма функционирования системы

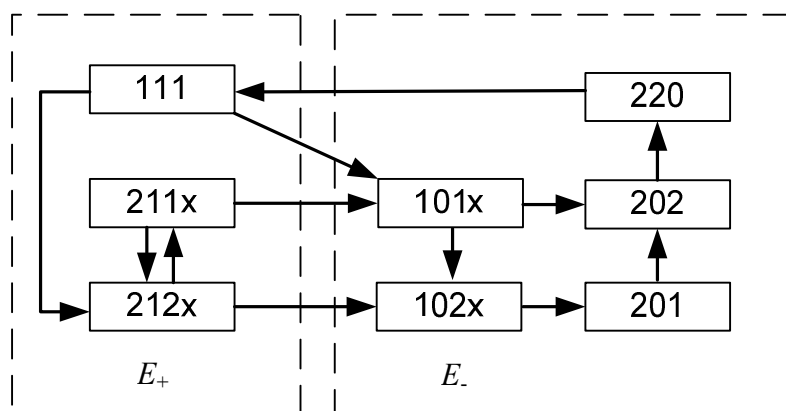


Рисунок 2.2. Граф переходов системы

Для описания функционирования системы дополним физические состояния до ПМ введением непрерывной компоненты x , фиксирующей «времена вперед».

Система описывается следующим пространством ПМ состояний:

$$E = \{111, 211x, 212x, 101x, 102x, 201, 202, 220\},$$

где 111 — система начала работать, контроль включен;

211х — начался контроль, компонент работоспособен, до наступления СО осталось время х;

212х — контроль окончился, компонент работоспособен, до наступления СО осталось время х;

101х — наступил СО, до начала проведения контроля осталось время х;

102х — наступил СО, контроль проводится, до завершения контроля осталось время х (отказ в данном случае обнаружен не будет);

220 — отказ обнаружен, контроль отключился, началось восстановление системы;

201 — компонент функционирует со СО, завершился контроль;

202 — компонент функционирует со СО, начался контроль.

Определим вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n, n \geq 0\}$ системы:

$$\begin{aligned} p_{111}^{212y} &= \int_0^{\infty} f(y+t)r(t)dt; & p_{111}^{101y} &= \int_0^{\infty} r(y+t)f(t)dt; \\ p_{211x}^{101y} &= r(y+x), \quad y > 0; & p_{212x}^{211y} &= v(x-y), \quad 0 < y < x; \\ p_{212x}^{102y} &= v(y+x), \quad y > 0; & p_{211x}^{212y} &= r(x-y), \quad 0 < y < x; \\ p_{101x}^{202} &= p_{102x}^{201} = p_{201}^{202} = p_{202}^{220} = p_{220}^{111} = 1. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Обозначим через $\rho(111)$, $\rho(201)$, $\rho(202)$ и $\rho(220)$ значение стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ на состояниях 111, 201, 202 и 220 и предположим существование стационарных плотностей $\rho(211x)$, $\rho(212x)$, $\rho(101x)$ и $\rho(102x)$ для состояний 211х, 212х, 101х и 102х соответственно. Составим для них систему интегральных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\rho_0 = \rho(111) = \rho(220) = \rho(202), \\
\rho(212x) = \rho(111) \int_0^\infty f(x+t)r(t)dt + \int_x^\infty \rho(211y)r(y-x)dy, \\
\rho(211x) = \int_x^\infty \rho(212y)v(y-x)dy, \\
\rho(101x) = \rho(111) \int_0^\infty r(x+t)f(t)dt + \int_0^\infty \rho(211y)r(y+x)dy, \\
\rho(102x) = \int_0^\infty \rho(212y)v(x+y)dy, \\
\rho(201) = \int_0^\infty \rho(102y)dy, \\
\rho(202) = \int_0^\infty \rho(101y)dy + \rho(201), \\
3\rho_0 + 3 \int_0^\infty \rho(102x)dx + \int_0^\infty \rho(212x)dx + \int_0^\infty \rho(211x)dx + 2 \int_0^\infty \rho(101x)dx = 1.
\end{array} \right. \quad (2.2)$$

Последнее уравнение в системе (2.2) — условие нормировки.

В приложении А с использованием метода последовательных приближений показано, что система уравнений (2.2) имеет следующее решение:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\rho(111) = \rho(202) = \rho(220) = \rho_0, \quad \rho(212x) = \rho_0 \int_x^\infty h^{(0)}(t-x)f(t)dt, \\
\rho(211x) = \rho_0 \int_x^\infty h^{(1)}(t-x)f(t)dt, \quad \rho(102x) = \rho_0 \int_0^\infty f(t)v^{(0)}(t,x)dt, \\
\rho(101x) = \rho_0 \int_0^\infty f(t)v^{(1)}(t,x)dt, \quad \rho(201) = \rho_0 \int_0^\infty [H^{(0)}(t) - H^{(1)}(t)]f(t)dt, \\
\rho_0 = \left[5 + 2 \int_0^\infty H^{(0)}(t)f(t)dt \right]^{-1}.
\end{array} \right. \quad (2.3)$$

Здесь $h^{(0)}(t) = \sum_{n=1}^\infty r * (v * r)^{*(n-1)}(t)$ — плотность функции 0-восстановления

$H^{(0)}(t) = \sum_{n=1}^\infty R * (V * R)^{*(n-1)}(t)$ альтернирующего процесса, порожденного СВ

δ и γ ; $h^{(1)}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (r * v)^{*(n)}(t)$ — плотность функции 1-восстановления

$H^{(1)}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (R * V)^{*(n)}(t)$ этого же альтернирующего процесса;

$v^{(0)}(t, x) = \int_0^t v(x + t - y) h^{(0)}(y) dy$ — плотность распределения остаточного

времени контроля; $v^{(1)}(t, x) = r(t + x) + \int_0^t r(x + t - y) h^{(1)}(y) dy$ — плотность

распределения остаточного времени ожидания контроля [29].

Для исходной системы множества работоспособных состояний E_+ и неработоспособных состояний E_- имеют вид:

$$E_+ = \{111, 211x, 212x\}, E_- = \{101x, 102x, 201, 202, 220\}.$$

Определим стационарные характеристики исходной системы.

Найдем средние времена пребывания в состояниях исходной системы:

$$\begin{aligned} m(111) &= \int_0^{\infty} \bar{F}(t) \bar{R}(t) dt; & m(212x) &= \int_0^x \bar{V}(t) dt; & m(211x) &= \int_0^x \bar{R}(t) dt; \\ m(101x) &= x; & m(102x) &= x; & m(201) &= M\delta; \\ m(202) &= M\gamma; & m(220) &= M\beta. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Среднюю стационарную наработку на отказ T_+ и среднее стационарное время восстановления T_- найдем по (1.7), (1.6). С учетом формул (2.1), (2.3) и (2.4), найдем выражения, входящие в (1.7), (1.6).

$$\begin{aligned} \int_{E_+} m(e) \rho(de) &= m(111) \rho(111) + \int_0^{\infty} m(212x) \rho(212x) dx + \\ &+ \int_0^{\infty} m(211x) \rho(211x) dx = \rho_0 \int_0^{\infty} dx \int_0^x \bar{R}(t) dt \int_x^{\infty} h^{(1)}(y-x) f(y) dy + \\ &+ \rho_0 \int_0^{\infty} \bar{F}(t) \bar{R}(t) dt + \rho_0 \int_0^{\infty} dx \int_0^x \bar{V}(t) dt \int_x^{\infty} f(y) h^{(0)}(y-x) dy. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Согласно [50] данное выражение в результате эквивалентных преобразований сводится к следующему виду:

$$\int_{E_+} m(e) \rho(de) = \rho_0 M \alpha. \quad (2.6)$$

Далее,

$$\begin{aligned} \int_{E_-} m(e) \rho(de) &= m(220) \rho(220) + m(202) \rho(202) + m(201) \rho(201) + \\ &+ \int_0^\infty m(102x) \rho(102x) dx + \int_0^\infty m(101x) \rho(101x) dx = \rho_0 M \beta + \rho_0 M \gamma + \\ &+ \rho_0 M \delta \int_0^\infty [H^{(0)}(t) - H^{(1)}(t)] f(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty x dx \int_0^\infty f(t) \nu^{(0)}(t, x) dt + \\ &+ \rho_0 \int_0^\infty x dx \int_0^\infty f(t) \nu^{(1)}(t, x) dt = \rho_0 \left(M \beta + M \gamma + M \delta \int_0^\infty [H^{(0)}(t) - H^{(1)}(t)] f(t) dt \right) + \\ &+ \rho_0 \int_0^\infty f(t) dt \int_0^\infty x [\nu^{(0)}(t, x) + \nu^{(1)}(t, x)] dx = \rho_0 \left(M \beta + M \gamma + M \delta \int_0^\infty H^{(0)}(t) f(t) dt - \right. \\ &\left. - M \delta \int_0^\infty H^{(1)}(t) f(t) dt + M \gamma \int_0^\infty H^{(0)}(t) f(t) dt + M \delta \int_0^\infty \hat{H}^{(1)}(t) f(t) dt - M \alpha \right) = \\ &= \rho_0 \left(M \beta + [M \delta + M \gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt - M \alpha \right). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Здесь $\hat{H}_0(t) = 1 + H_0(t)$.

В преобразованиях выражения (2.7) использовалось тождество:

$$\int_0^\infty [\bar{V}^{(0)}(t, y) + \bar{V}^{(1)}(t, y)] dy = M \gamma \cdot H^{(0)}(t) + M \delta \cdot \hat{H}^{(1)}(t) - t.$$

$$\text{Тогда, } \int_E m(e) \rho(de) = \rho_0 \left((M \gamma + M \delta) \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(z) f(z) dz + M \beta \right). \quad (2.8)$$

Далее,

$$\begin{aligned}
\int_{E_+} P(x, E_-) \rho(de) &= \rho(111)P(111, E_-) + \int_0^\infty \rho(211x)P(211x, E_-)dx + \\
&+ \int_0^\infty \rho(210x)P(210x, E_-)dx = \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f(t)r(t+x)dt + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty dx \int_x^\infty h^{(0)}(t-x)f(t)dt \int_0^\infty v(x+y)dy + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_x^\infty h^{(1)}(t-x)f(t)dt \int_0^\infty r(x+y)dy.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

В результате эквивалентных преобразований данное выражение сводится к следующему виду [50]:

$$\int_{E_+} P(x, E_-) \rho(de) = \rho_0.$$

Таким образом, средняя стационарная наработка на отказ T_+ имеет вид:

$$T_+ = M\alpha. \tag{2.10}$$

Среднее стационарное время восстановления T_- определяется формулой:

$$T_- = M\beta + [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt - M\alpha. \tag{2.11}$$

Стационарный коэффициент готовности найдем из (1.8):

$$K_g = \frac{M\alpha}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}. \tag{2.12}$$

Отметим вероятностный смысл функционала в формуле (2.12):

$\int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt$ — среднее число взятия проб до обнаружения СО компонента.

Найдем экономические характеристики исследуемой системы: среднюю прибыль S в единицу календарного времени и средние затраты C в единицу времени исправного функционирования системы.

Выделим дополнительные группы из множества состояний системы E :

- E_f — множество состояний, в которых система функционирует;

- E_c — множество состояний, в которых проводится КТС;
- E_m — множество состояний, в которых проводится ТО объекта;
- E_{pf} — множество состояний, в которых система находится в состоянии СО.

Для рассматриваемой системы введенные множества включают следующие состояния системы:

$$\begin{aligned} E_f &= \{111, 211x, 212x, 102x, 202, 101x, 102x, 202, 202\}; \\ E_c &= \{212x, 102x, 202\}; \\ E_m &= \{220\}; \\ E_{pf} &= \{101x, 102x, 202, 202\}. \end{aligned} \tag{2.13}$$

Отметим, что $E_{pf} \cup E_m = E_-$, $E_f = E \setminus E_m$.

Предположим, что g_+ — удельный доход, получаемый за единицу времени пребывания системы в работоспособном состоянии; c_f (function) — удельные затраты на единицу времени функционирования системы; c_m (maintenance) — удельные затраты на единицу времени проведения ТО; c_c (control) — удельные затраты на единицу времени проведения контроля работоспособности системы; c_{pf} (parametric failure) — удельные затраты на единицу времени работы с параметрическим отказом по причине выпуска брака.

Тогда для рассматриваемой системы функции $f_s(e)$ и $f_c(e)$ с учетом (2.13) имеют следующий вид:

$$f_s(e) = \begin{cases} g_+, & e \in E_+, \\ -c_f, & e \in E_f, \\ -c_m, & e \in E_m, \\ -c_c, & e \in E_c, \\ -c_{pf}, & e \in E_{pf}, \end{cases} \quad f_c(e) = \begin{cases} c_f, & e \in E_f, \\ c_m, & e \in E_m, \\ c_c, & e \in E_c, \\ c_{pf}, & e \in E_{pf}. \end{cases} \tag{2.14}$$

С учетом специального вида функции $f_s(e)$ величина средней прибыли S в единицу календарного времени определяется выражением (1.13):

$$S = g_+ K_r - \left[c_f \pi(E_f) + c_c \pi(E_c) + c_m \pi(E_m) + c_{pf} \pi(E_{pf}) \right].$$

Определим неизвестные выражения с учетом (2.3), (2.4) и (2.13):

$$\int_{E_m} m(e) \rho(de) = m(220) \rho(220) = \rho_0 M \beta,$$

$$\int_{E_f} m(e) \rho(de) = \int_E m(e) \rho(de) - \int_{E_m} m(e) \rho(de) = \rho_0 \left(M \beta + \left[M \delta + M \gamma \right] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt \right) - \rho_0 M \beta = \rho_0 \left[M \delta + M \gamma \right] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt,$$

$$\int_{E_{pf}} m(e) \rho(de) = \int_{E_-} m(e) \rho(de) - \int_{E_m} m(e) \rho(de) = \rho_0 \left(M \beta - M \alpha + \left[M \delta + M \gamma \right] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt \right) - \rho_0 M \beta = \rho_0 \left(\left[M \delta + M \gamma \right] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt - M \alpha \right),$$

$$\begin{aligned} \int_{E_c} m(e) \rho(de) &= m(202) \rho(202) + \int_0^\infty m(102x) \rho(102x) dx + \int_0^\infty m(212x) \rho(212x) dx = \\ &= \rho_0 M \gamma + \rho_0 \int_0^\infty x dx \int_0^\infty f(t) \nu^{(0)}(t, x) dt + \rho_0 \int_0^\infty f(y) dy \int_0^y h^{(0)}(y-x) dx \int_0^x \bar{V}(t) dt = \\ &+ \rho_0 \left(M \gamma + \int_0^\infty x dx \int_0^\infty f(t) \nu^{(0)}(t, x) dt + \int_0^\infty f(y) dy \int_0^y h^{(0)}(y-x) dx \int_0^x \bar{V}(t) dt \right) = \\ &= \rho_0 M \gamma \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt. \end{aligned}$$

В результате получили, что:

$$\begin{aligned} S &= \left[- \left[(c_{pf} + c_f) M \delta + (c_{pf} + c_f + c_c) M \gamma \right] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt + \right. \\ &\left. + (g_+ + c_{pf}) M \alpha - c_m M \beta \right] / \left[M \beta + \left[M \delta + M \gamma \right] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f(t) dt \right]. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Затраты в единицу времени исправного функционирования системы определяются по формуле (1.9):

$$C = c_m \frac{M\beta}{M\alpha} + \frac{(c_{pf} + c_f)M\delta + (c_{pf} + c_f + c_c)M\gamma}{M\alpha} \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt - c_{pf}. \quad (2.16)$$

Другие экономические параметры системы принимают следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_+ = \frac{g_+ M\alpha}{M\beta + [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}, \\ \tilde{C}_f = \frac{c_f [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}{M\beta + [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}, \\ \tilde{C}_m = \frac{c_m M\beta}{M\beta + [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}, \\ \tilde{C}_{pf} = c_{pf} \frac{[M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt - M\alpha}{M\beta + [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}, \\ \tilde{C}_c = \frac{c_c M\gamma \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}{M\beta + [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t)f(t)dt}. \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Получим формулы для K_r , G , $\tilde{C}$, S и C исследуемой системы при условии постоянного времени периодичности контроля $\tau > 0$ и постоянной длительности контроля $h > 0$. Учитывая, что $R(t) = 1(t - \tau)$, где $\tau = const$, $V(t) = 1(t - h)$, где $h = const$, выражения (2.12), (2.15), (2.17) и (2.16) примут вид:

$$K_r = \frac{M\alpha}{M\beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^\infty \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}, \quad (2.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_+ = \frac{g_+ M \alpha}{M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_f = \frac{c_f (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}{M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_m = \frac{c_m M \beta}{M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_{pf} = c_{pf} \frac{(\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right) - M \alpha}{M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_c = \frac{c_c h \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}{M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right)}, \end{array} \right. \quad (2.19)$$

$$S = \left[- \left[(c_{pf} + c_f)(\tau + h) + c_c h \right] \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right) + \right. \\ \left. + (g_+ + c_{pf}) M \alpha - c_m M \beta \right] / \left[M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right) \right], \quad (2.20)$$

$$C = c_m \frac{M \beta}{M \alpha} + \frac{(c_{pf} + c_f)(\tau + h) + c_c h}{M \alpha} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right) - c_{pf}. \quad (2.21)$$

Полученные формулы позволяют вычислить значения стационарного коэффициента готовности, среднюю прибыль и средние затраты.

2.2 ПМ модель проведения искусственного периодического КТС системы с постепенными СО

Рассмотрим систему, функционирующую следующим образом. В начальный момент времени система начала работу, контроль включен. Время

безотказной работы компонента — СВ α_0 с ФР $F_0(t) = P\{\alpha_0 \leq t\}$ и ПР $f_0(t)$. После завершения времени безотказной работы один из контролируемых параметров компонента переходит в УД, т.е. компонент переходит в предотказное состояние. Время нахождения компонента в предотказном состоянии — СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P\{\alpha_1 \leq t\}$ и ПР $f_1(t)$. После завершения пребывания компонента в предотказном состоянии, он переходит в состояние СО. Контроль начинается через случайные (в общем случае) интервалы времени δ с ФР $R(t) = P\{\delta \leq t\}$ и ПР $r(t)$. Длительность проведения контроля — СВ γ с ФР $V(t) = P\{\gamma \leq t\}$ и ПР $v(t)$. На время контроля работа компонента останавливается. В результате проведения контроля, обнаруживается наличие как СО, так и нахождение параметра в УД. ТО начинается в случае обнаружения компонента в предотказном состоянии, либо в состоянии СО. Время восстановления системы — СВ β с ФР $G(t) = P\{\beta \leq t\}$ и ПР $g(t)$. На время ТО контроль отключается. После восстановления все свойства системы полностью обновляются.

Временная диаграмма функционирования описанной системы приведена на рисунке 2.3. Граф переходов системы представлен на рисунке 2.4.

Для описания функционирования системы дополним физические состояния до ПМ введением непрерывной компоненты x , фиксирующей «времена вперед».

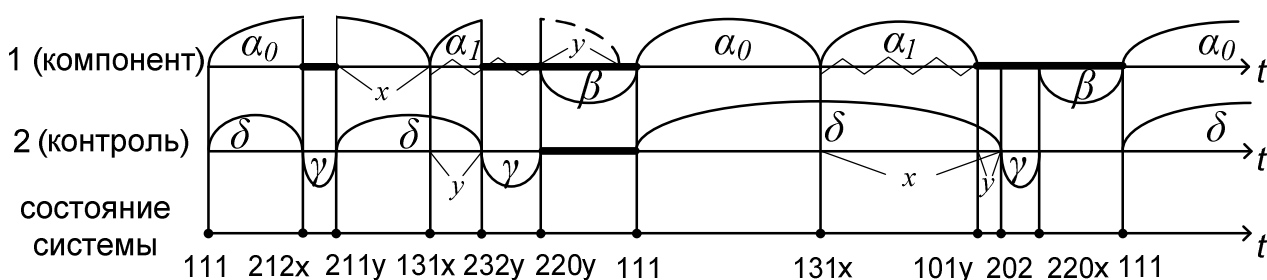


Рисунок 2.3. Временная диаграмма функционирования системы

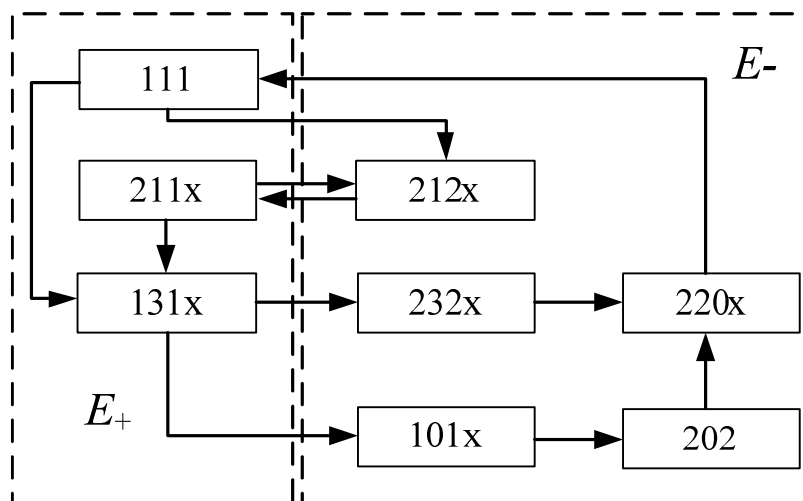


Рисунок 2.4. Граф переходов системы

Система описывается следующим пространством ПМ состояний:

$$E = \{111, 211x, 212x, 131x, 232x, 101x, 202, 220x\},$$

где 111 — система начала работать, контроль включен;

212x — начался КТС, компонент работоспособен и отключен, до перехода в предотказное состояние (выхода параметра в УД) осталось время x;

211x — завершился КТС, компонент работоспособен, до перехода в предотказное состояние осталось время x;

131x — параметр вышел в УД, компонент работоспособен, до начала контроля осталось время x;

232x — начался КТС, компонент работоспособен и отключен, параметр находится в УД, до возникновения СО осталось время x;

101x — наступил СО, компонент функционирует, но не работоспособен, до начала проведения контроля осталось время x;

202 — начался КТС, компонент со СО и отключен на время контроля;

220x — обнаружено предотказное состояние либо СО, контроль отключился, началось ТО системы, до окончания времени нахождения компонента в предотказном состоянии осталось время x; $x=0$ при условии, что компонент в момент начала проведения КТС находился в состоянии СО.

Для описания системы строим ПМП с дискретным ФПС. По временной диаграмме функционирования определяются вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n, n \geq 0\}$:

$$\begin{aligned} p_{111}^{212x} &= \int_0^\infty f_0(x+t)r(t)dt; & p_{111}^{131x} &= \int_0^\infty f_0(t)r(t+x)dt; \\ p_{131x}^{101y} &= f_1(x-y), 0 < y < x; & p_{211x}^{212y} &= r(x-y), 0 < y < x; \\ p_{211x}^{131y} &= r(y+x), y > 0; & p_{131x}^{232y} &= f_1(x+y), y > 0; \\ p_{212x}^{211y} &= P_{101x}^{202} = P_{202}^{220x} = P_{232x}^{220x} = P_{220x}^{111} = 1. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Обозначим через $\rho(111)$ и $\rho(202)$ значение стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ на состояниях 111 и 202 соответственно. Предположим существование стационарных плотностей $\rho(211x)$, $\rho(212x)$, $\rho(131x)$, $\rho(232x)$, $\rho(101x)$ и $\rho(220x)$ для состояний 211х, 212х, 131х, 132х, 101х и 220х соответственно. Составим для них систему интегральных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_0 &= \rho(111) = \rho(220x), \\ \rho(212x) &= \rho(111) \int_0^\infty f_0(x+t)r(t)dt + \int_x^\infty \rho(211y)r(y-x)dy, \\ \rho(131x) &= \rho(111) \int_0^\infty r(x+t)f_0(t)dt + \int_0^\infty \rho(211y)r(x+y)dy, \\ \rho(101x) &= \int_x^\infty \rho(131y)f_1(y-x)dy, & \rho(232x) &= \int_0^\infty \rho(131y)f_1(y+x)dy, \\ \rho(202) &= \int_0^\infty \rho(101x)dx, & \rho(211x) &= \rho(212x), \\ 2\rho_0 + 2\int_0^\infty \rho(211x)dx + \int_0^\infty \rho(131x)dx + 2\rho(202) + \int_0^\infty \rho(232x)dx &= 1. \end{aligned} \right. \quad (2.23)$$

Последнее уравнение в системе (2.23) – условие нормировки.

Методом последовательных приближений можно показать, что система уравнений (2.23) имеет следующее решение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(111) = \rho(220x) = \rho_0, \quad \rho(211x) = \rho_0 \int_x^\infty h_r(t-x) f_0(t) dt, \\ \rho(212x) = \rho_0 \int_x^\infty h_r(t-x) f_0(t) dt, \quad \rho(131x) = \rho_0 \int_0^\infty v_r(t,x) f_0(t) dt, \\ \rho(101x) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_x^\infty f_1(y-x) v_r(t,y) dy, \\ \rho(232x) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty f_1(y+x) v_r(t,y) dy, \\ \rho(202) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty f_1(y) \bar{V}_r(t,y) dy. \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Здесь ρ_0 — находится из условия нормировки; $h_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} r^{*(n)}(t)$ —

плотность функции восстановления $H_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} R^{*(n)}(t)$ процесса, порожденного

СВ δ ; $v_r(t,x) = r(t+x) + \int_0^x r(x+t-s) h_r(s) ds$ — плотность распределения прямого остаточного времени до начала контроля $\bar{V}_r(t,x)$ [29].

Для исходной системы множества работоспособных состояний E_+ и неработоспособных состояний E_- имеют вид:

$$E_+ = \{111, 211x, 131x\}, \quad E_- = \{212x, 101x, 232x, 202, 220\}.$$

Найдем стационарные характеристики исходной системы. Найдем средние времена пребывания в состояниях исходной системы:

$$\begin{aligned} m(111) &= \int_0^\infty \bar{F}_0(t) \bar{R}(t) dt; \quad m(211x) = \int_0^x \bar{R}(t) dt; \quad m(131x) = \int_0^x \bar{F}_1(t) dt; \\ m(212x) &= m(232x) = m(202) = M\gamma; \quad m(101x) = x; \quad m(220x) = M\beta. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Среднюю стационарную наработку на отказ T_+ и среднее стационарное время восстановления T_- определим по формулам (1.7), (1.6).

С учетом формул (2.22), (2.24) и (2.25), найдем выражения, входящие в выражения (1.7), (1.6):

$$\begin{aligned}
\int_{E_+} m(e) \rho(de) &= m(111) \rho(111) + \int_0^\infty m(211x) \rho(211x) dx + \int_0^\infty m(131x) \rho(131x) dx = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_0(t) \bar{R}(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{R}(t) dt \int_x^\infty h_r(y-x) f_0(y) dy + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{F}_1(z) dz \int_0^\infty f_0(t) v_r(t, x) dt = \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_0(t) \bar{R}(t) dt + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty \bar{R}(x) h_r(y) \bar{F}_0(y+x) dy + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_1(x) dx \int_0^\infty f_0(t) \bar{V}_r(t, x) dt = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_0(t) \left[\bar{R}(t) + \int_0^t \bar{R}(x) h_r(t-x) dx \right] dt + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx = \\
&= \rho_0 M \alpha_0 + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx.
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Далее,

$$\begin{aligned}
\int_{E_-} m(e) \rho(de) &= \int_0^\infty m(101x) \rho(101x) dx + \int_0^\infty m(220x) \rho(220x) dx + \\
&+ \int_0^\infty m(232x) \rho(232x) dx + \int_0^\infty m(212x) \rho(212x) dx + m(202) \rho(202) = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty x dx \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty f_1(z) v_r(t, x+z) dz + \rho_0 M \beta + \\
&+ \rho_0 M \gamma \left(\int_0^\infty dx \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty f_1(y+x) v_r(t, y) dy + \int_0^\infty dx \int_x^\infty h_r(t-x) f_0(t) dt + \right. \\
&+ \left. \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty f_1(y) \bar{V}_r(t, y) dy \right) = \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty dx \int_0^\infty f_1(z) \bar{V}_r(t, x+z) dz + \\
&+ \rho_0 M \gamma \int_0^\infty f_0(t) dt \left(\int_0^\infty \bar{F}_1(y) v_r(t, y) dy + H_r(t) + \int_0^\infty f_1(y) \bar{V}_r(t, y) dy \right) = \\
&= \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{V}_r(t, z) dz \int_0^z f_1(z-x) dx + \rho_0 M \gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt = \\
&= \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty F_1(z) \bar{V}_r(t, z) dz + \rho_0 M \gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt.
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Здесь $\hat{H}_r(t) = H_r(t) + 1$.

Тогда,

$$\begin{aligned}
\int_E m(e) \rho(de) &= \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty F_1(z) \bar{V}_r(t, z) dz + \rho_0 M \alpha_0 + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx + \rho_0 M \gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt = \rho_0 M \beta + \\
&+ \rho_0 M \alpha_0 + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{V}_r(t, z) dz + \rho_0 M \gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt = \rho_0 M \beta + \\
&+ \rho_0 M \alpha_0 + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) [M \delta \cdot \hat{H}_1(t) - t] dt + \rho_0 M \gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt = \\
&= \rho_0 \left[M \beta + (M \delta + M \gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \right].
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Далее,

$$\begin{aligned}
\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de) &= \int_0^\infty dy \int_0^\infty \rho(131x) [p(131x, 101y) + p(131x, 232y)] dx + \\
&+ \int_0^\infty \rho(111) P(111, 212x) dx + \int_0^\infty dy \int_0^\infty \rho(211x) p(211x, 212y) dx = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f_0(t) v_r(t, x) dt \left(\int_0^x f_1(x-y) dy + \int_0^\infty f_1(y+x) dy \right) + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f_0(x+t) r(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x r(x-y) dy \int_x^\infty h_r(t-x) f_0(t) dt = \\
&= \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f_0(t) v_r(t, x) dt + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_0(t) r(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_0(t) dt \int_0^t h_r(t-x) r(x) dx = \\
&= \rho_0 + \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_0(t) h_r(t) dt = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt.
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Таким образом, с учетом (2.26) и (2.29) средняя стационарная наработка на отказ T_+ имеет вид:

$$T_+ = \left(M \alpha_0 + \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx \right) / \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt. \tag{2.30}$$

С учетом (2.27) и (2.29) среднее стационарное время восстановления T_- определяется формулой:

$$T_- = \frac{M\beta + \int_0^\infty f_0(t)dt \int_0^\infty F_1(z) \bar{V}_r(t, z) dz + M\gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt}{\int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt}. \quad (2.31)$$

С учетом (2.26), (2.28) и (1.8) стационарный коэффициент готовности будет следующим:

$$K_r = \frac{M\alpha_0 + \int_0^\infty f_0(t)dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt}. \quad (2.32)$$

Отметим вероятностный смысл функционалов в формуле (2.32):

$\int_0^\infty f_0(t)dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx$ — среднее время нахождения системы в предотказном состоянии; $\int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt$ — среднее число проведенных контролей до обнаружения СО либо предотказного состояния.

Найдем экономические характеристики исследуемой системы: среднюю прибыль S в единицу календарного времени и средние затраты C в единицу времени исправного функционирования системы.

Предположим, что g_+ — удельный доход, получаемый за единицу времени пребывания системы в работоспособном состоянии; c_f — удельные затраты на единицу времени функционирования системы; c_{im} (irreducible maintenance) — удельные затраты на единицу времени проведения минимального ТО (устранения причин попадания параметра в границу упреждающего допуска); c_{am} (additional maintenance) — удельные дополнительные затраты на проведения ТО; c_c — удельные затраты на единицу

времени проведения контроля работоспособности системы; c_{pf} — удельные затраты на единицу времени работы с параметрическим отказом по причине выпуска брака.

Дополнительные затраты на проведения ТО определяются степенью ухода параметра от нормы, другими словами чем позже обнаружен уход параметра, тем больше стоимость восстановления системы. Максимальная стоимость ТО будет в случае развития параметрического СО в системе.

Для рассматриваемой системы функции $f_s(e)$ и $f_c(e)$ имеют следующий вид:

$$f_s(e) = \begin{cases} g_+, & e \in E_+, \\ -c_f, & e \in E_f, \\ -c_{im}, & e \in E_{im}, \\ -c_{am}, & e \in E_{am}, \\ -c_c, & e \in E_c, \\ -c_{pf}, & e \in E_{pf}, \end{cases} \quad f_c(e) = \begin{cases} c_f, & e \in E_f, \\ c_{im}, & e \in E_{im}, \\ c_{am}, & e \in E_{am}, \\ c_c, & e \in E_c, \\ c_{pf}, & e \in E_{pf}. \end{cases} \quad (2.33)$$

Здесь $E_f = \{111, 211x, 212x, 131x, 232x, 101x, 202\}$, $E_c = \{212x, 232x, 202\}$; $E_{im} = \{220\}$; $E_{am} = \{131x\}$; $E_{pf} = \{101x\}$.

Отметим, что $E_c \cup E_{pf} \cup E_{im} = E_-$, $E_f = E \setminus (E_c \cup E_{im})$

С учетом специального вида функции $f_s(e)$ величина средней прибыли S в единицу календарного времени определяется выражением (1.13):

$$S = g_+ K_\Gamma - [c_f \pi(E_f) + c_c \pi(E_c) + c_{am} \pi(E_{am}) + c_{im} \pi(E_{im}) + c_{pf} \pi(E_{pf})]. \quad (2.34)$$

Используя формулы (1.2), (2.23), (2.24), (2.27) и (2.28) найдем значения функционалов, входящих в выражение (2.34):

$$\begin{aligned} \int_{E_{am}} m(e) \rho(de) &= \int_0^\infty m(131x) \rho(131x) dx = \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{F}_1(z) dz \int_0^\infty f_0(t) v_r(t, x) dt = \\ &= \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx, \end{aligned}$$

$$\int_{E_{im}} m(e) \rho(de) = \int_0^\infty m(220x) \rho(220x) dx = \rho_0 M \beta,$$

$$\int_{E_{pf}} m(e) \rho(de) = \int_0^\infty m(101x) \rho(101x) dx = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty F_1(z) \bar{V}_r(t, z) dz,$$

$$\int_{E_c} m(e) \rho(de) = \int_{E_-} m(e) \rho(de) - \int_{E_{im}} m(e) \rho(de) - \int_{E_{pf}} m(e) \rho(de) = \rho_0 M \gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt,$$

$$\int_{E_f} m(e) \rho(de) = \int_E m(e) \rho(de) - \int_{E_{im}} m(e) \rho(de) - \int_{E_c} m(e) \rho(de) = \rho_0 M \delta \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt.$$

С учетом полученных функций, найдем согласно (1.12) — (1.13) величины средней прибыли S в единицу календарного времени, средних доходов G от процесса в единицу календарного времени и средних затрат $\tilde{C}$ от процесса в единицу календарного времени (для удобства восприятия объединим минимальные и дополнительные затраты на проведение ТО: $\tilde{C}_m = \tilde{C}_{im} + \tilde{C}_{am}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} G_+ = g_+ \frac{M \alpha_0 + \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx}{M \beta + (M \delta + M \gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt}, \\ \tilde{C}_f = c_f M \delta \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \left/ \left(M \beta + (M \delta + M \gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \right) \right., \\ \tilde{C}_m = \frac{c_{im} M \beta + c_{am} \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx}{M \beta + (M \delta + M \gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt}, \\ \tilde{C}_{pf} = c_{pf} \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty F_1(z) \bar{V}_r(t, z) dz \left/ \left(M \beta + (M \delta + M \gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \right) \right., \\ \tilde{C}_c = c_c M \gamma \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \left/ \left(M \beta + (M \delta + M \gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \right) \right., \end{array} \right. \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned}
S = & \left[(g_+ + c_{pf})M\alpha_0 - \left[(c_{pf} + c_f)M\delta + c_cM\gamma \right] \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt + \right. \\
& + (g_+ + c_{pf} - c_{am}) \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx - \\
& \left. - c_{im}M\beta \right] / \left[M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \right].
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Затраты в единицу времени исправного функционирования системы определяются согласно (1.11) с учетом формул (2.32) и (2.36):

$$\begin{aligned}
C = & \left[\left((c_{pf} + c_f)M\delta + c_cM\gamma \right) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt - c_{pf}M\alpha + \right. \\
& + (c_{am} - c_{pf}) \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx + \\
& \left. + c_{im}M\beta \right] / \left[M\alpha_0 + \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \bar{V}_r(t, x) dx \right].
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Получим формулы для K_r , G , $\tilde{C}$, S и C исследуемой системы с учетом периодического контроля при условии постоянной периодичности контроля $\tau > 0$. Учитывая, что в этом случае $R(t) = 1(t - \tau)$, где $\tau = const$, выражения (2.32), (2.35), (2.36) и (2.37) примут вид:

$$K_r = \frac{M\alpha_0 + \sum_{n=0}^\infty \bar{F}_0(n\tau) \int_0^\tau \bar{F}_1(x) dx - \sum_{n=0}^\infty \int_0^\tau \bar{F}_1(x) \bar{F}_0((n+1)\tau - x) dx}{M\beta + (M\gamma + \tau) \sum_{n=0}^\infty \bar{F}_0(n\tau)}, \tag{2.38}$$

$$\begin{aligned}
S = & \left[-c_{im}M\beta - \left((c_{pf} + c_f)\tau + c_cM\gamma \right) \sum_{n=0}^\infty \bar{F}_0(n\tau) + \right. \\
& + (g_+ + c_{pf} - c_{am}) \left(\sum_{n=0}^\infty \bar{F}_0(n\tau) \int_0^\tau \bar{F}_1(x) dx - \sum_{n=0}^\infty \int_0^\tau \bar{F}_1(x) \bar{F}_0((n+1)\tau - x) dx \right) + \\
& \left. + (g_+ + c_{pf})M\alpha_0 \right] / \left[M\beta + (M\gamma + \tau) \sum_{n=0}^\infty \bar{F}_0(n\tau) \right],
\end{aligned} \tag{2.39}$$

$$\begin{aligned}
C = & \left[c_{im} M \beta + \left((c_{pf} + c_f) \tau + c_c M \gamma \right) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau) - c_{pf} M \alpha_0 + \right. \\
& + \left. (c_{am} - c_{pf}) \left(\sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) dx - \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) \bar{F}_0((n+1)\tau - x) dx \right) \right] / \left[M \alpha_0 + \right. \\
& + \left. \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) dx - \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) \bar{F}_0((n+1)\tau - x) dx \right].
\end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\left\{ \begin{aligned}
G_+ &= g_+ \frac{M \alpha_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) dx - \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) \bar{F}_0((n+1)\tau - x) dx}{M \beta + (M \gamma + \tau) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau)}, \\
\tilde{C}_f &= \frac{c_f \tau \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau)}{M \beta + (M \gamma + \tau) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau)}, \\
\tilde{C}_m &= \frac{c_{im} M \beta + c_{am} \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) dx - c_{am} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) \bar{F}_0((n+1)\tau - x) dx}{M \beta + (M \gamma + \tau) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau)}, \\
\tilde{C}_{pf} &= c_{pf} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) dx - \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^{\tau} \bar{F}_1(x) \bar{F}_0((n+1)\tau - x) dx}{M \beta + (M \gamma + \tau) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau)}, \\
\tilde{C}_c &= \frac{c_c M \gamma \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau)}{M \beta + (M \gamma + \tau) \sum_{n=0}^{\infty} \bar{F}_0(n\tau)},
\end{aligned} \right. \quad (2.41)$$

Полученные формулы позволяют вычислить значения стационарного коэффициента готовности, среднюю прибыль и средние затраты.

Отметим, что если устремить $M \alpha_1 \rightarrow 0$, то получим аналитические выражения для ПМ модели искусственного КТС однокомпонентной системы с внезапными СО, адекватность которой доказана в работе [57].

2.3 ПМ модель проведения естественного периодического КТС системы с постепенными СО методом пробы

Рассмотрим однокомпонентную ПС, функционирующую следующим образом. В начальный момент времени система начала работу, контроль включен. Время исправной работы компонента — СВ α_0 с ФР $F_0(t) = P\{\alpha_0 \leq t\}$ и ПР $f_0(t)$. После завершения времени исправной работы один из контролируемых параметров компонента переходит в УД, т.е. компонент переходит в предотказное состояние. Время нахождения компонента в предотказном состоянии — СВ α_1 с ФР $F_1(t) = P\{\alpha_1 \leq t\}$ и ПР $f_1(t)$. После пребывания в предотказном состоянии, компонент переходит в состояние СО. КТС начинается через случайные (в общем случае) интервалы времени δ с ФР $R(t) = P\{\delta \leq t\}$ и ПР $r(t)$. Отказ обнаруживается, только если он произошел до момента начала контроля. Длительность проведения КТС — СВ γ с ФР $V(t) = P\{\gamma \leq t\}$ и ПР $v(t)$. После завершения контроля начинается отсчет времени до следующего контроля. В случае обнаружения СО или предотказного состояния — начинает ТО. Время ТО системы — СВ β с ФР $G(t) = P\{\beta \leq t\}$ и ПР $g(t)$. На время ТО контроль отключается. После восстановления все свойства системы полностью обновляются.

Временная диаграмма функционирования системы приведена на рисунке 2.5. Граф переходов системы представлен на рисунке 2.6.

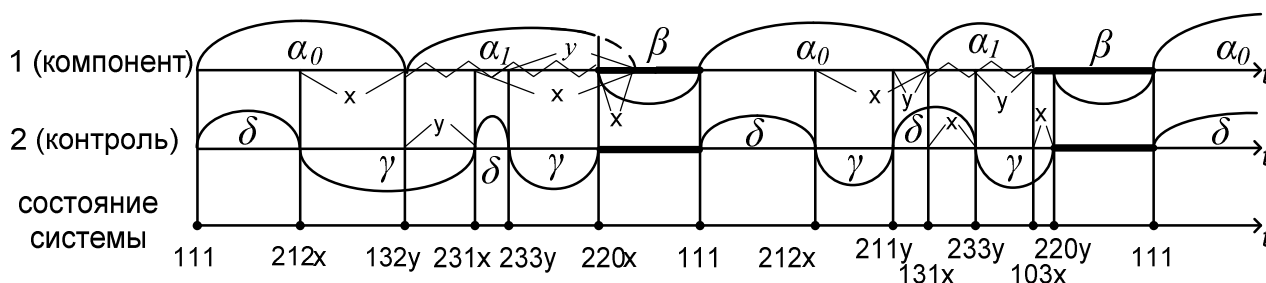


Рисунок 2.5. Временная диаграмма функционирования системы

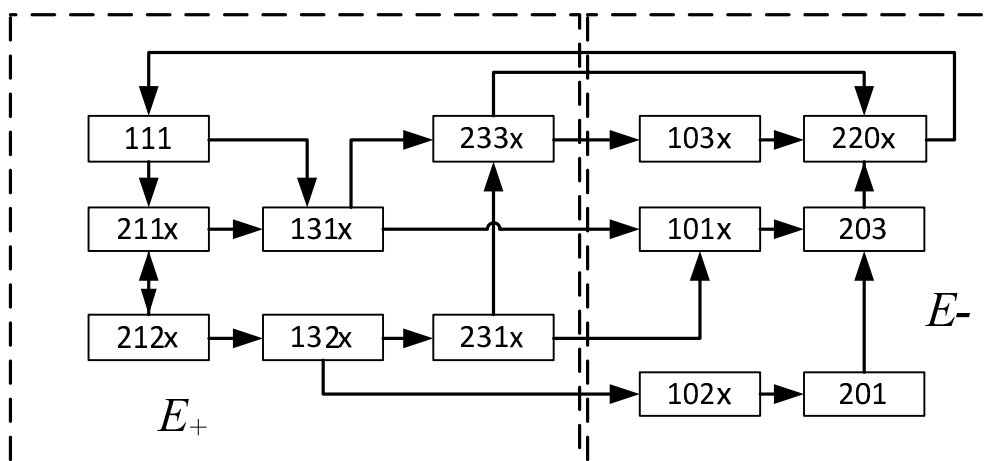


Рисунок 2.6. Граф переходов системы

Система описывается следующим пространством ПМ состояний:

$$E = \left\{ 111, 212x, 211x, 131x, 132x, 231x, 233x, \right. \\ \left. 101x, 102x, 103x, 201, 203, 220x \right\},$$

где 111 — система начала работать, контроль включен;

212x — взята проба, начался КТС, компонент исправен, до наступления предотказного состояния осталось время x;

211x — контроль пробы окончился, исправный компонент признан таковым, до наступления предотказного состояния осталось время x;

131x — компонент перешел в предотказное состояние, компонент не исправен, но работоспособен, до начала контроля осталось время x;

132x — компонент перешел в предотказное состояние во время проведения КТС, до окончания контроля осталось время x, предотказное состояние по результатам данного контроля обнаружено не будет;

231x — компонент находится в предотказном состоянии, завершился контроль пробы исправного компонента, до возникновения СО осталось время x;

233x — начался КТС компонента, находящегося в предотказном состоянии, до наступления СО осталось время x;

101x — наступил СО, компонент функционирует, но не работоспособен, до начала проведения КТС осталось время x;

102х — наступил СО, контроль пробы исправного компонента проводится, до завершения контроля осталось время х (СО в данном случае обнаружен не будет);

103х — наступил СО, контроль пробы компонента в предотказном состоянии проводится, до завершения контроля осталось время х (предотказное состояние будет обнаружено);

201 — компонент в состоянии СО, завершился контроль пробы исправного компонента, отказ не обнаружен;

203 — компонент в состоянии СО, начался КТС компонента;

220х — отказ либо предотказное состояние компонента обнаружены, контроль отключился, началось восстановление системы, до окончания пребывания компонента в предотказном состоянии осталось время х; х=0, если компонент уже находился в состоянии СО на момент окончания КТС.

Определим вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n, n \geq 0\}$ системы:

$$\begin{aligned}
 p_{111}^{212x} &= \int_0^{\infty} f_0(x+t)r(t)dt; & p_{111}^{101x} &= \int_0^{\infty} r(y+t)f_0(t)dt; \\
 p_{212x}^{211y} &= p_{233x}^{220y} = v(x-y), \quad 0 < y < x; & p_{131x}^{101y} &= p_{132x}^{102y} = f_1(x-y), \quad 0 < y < x; \\
 p_{211x}^{212y} &= p_{231x}^{233y} = r(x-y), \quad 0 < y < x; & p_{211x}^{131y} &= p_{231x}^{101y} = r(x+y), \quad y > 0; \\
 p_{212x}^{132y} &= p_{233x}^{103y} = v(x+y), \quad y > 0; & p_{131x}^{233y} &= p_{132x}^{231y} = f_1(x+y), \quad y > 0; \\
 p_{101x}^{203} &= p_{203}^{220x} = p_{220x}^{111} = p_{102x}^{201} = p_{201}^{203} = 1.
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

Обозначим через $\rho(111)$, $\rho(201)$ и $\rho(203)$ значение стационарного распределения ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ на состояниях 111, 201 и 203 и предположим существование стационарных плотностей $\rho(211x)$, $\rho(212x)$, $\rho(131x)$, $\rho(132x)$, $\rho(233x)$, $\rho(231x)$, $\rho(220x)$, $\rho(102x)$, $\rho(101x)$ и $\rho(103x)$ для состояний 211х, 212х, 131х, 132х, 233х, 231х, 220х, 101х, 102х и 103х соответственно. Составим для них систему интегральных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\rho_0 = \rho(111) = \rho(220x), \quad \rho(211x) = \int_x^\infty \rho(212y)v(y-x)dy, \\
\rho(212x) = \rho(111) \int_0^\infty f_0(x+t)r(t)dt + \int_x^\infty \rho(211y)r(y-x)dy, \\
\rho(131x) = \rho(111) \int_0^\infty f_0(t)r(x+t)dt + \int_0^\infty \rho(211y)r(y+x)dy, \\
\rho(132x) = \int_0^\infty \rho(212y)v(y+x)dy, \quad \rho(231x) = \int_0^\infty \rho(132y)f_1(y+x)dy, \\
\rho(233x) = \int_0^\infty \rho(131y)f_1(y+x)dy + \int_x^\infty \rho(231y)r(y-x)dy, \\
\rho(101x) = \int_0^\infty \rho(231y)r(y+x)dy + \int_x^\infty \rho(131y)f_1(y-x)dy, \\
\rho(102x) = \int_x^\infty \rho(132y)f_1(y-x)dy, \quad \rho(103x) = \int_0^\infty \rho(233y)v(y+x)dy, \\
\rho(201) = \int_0^\infty \rho(102x)dx, \quad \rho(203) = \rho(201) + \int_0^\infty \rho(101x)dx, \\
2\rho_0 + \int_0^\infty \rho(211x)dx + \int_0^\infty \rho(212x)dx + \int_0^\infty \rho(131x)dx + \\
+ \int_0^\infty \rho(132x)dx + \int_0^\infty \rho(231x)dx + \int_0^\infty \rho(233x)dx + \int_0^\infty \rho(101x)dx + \\
+ \int_0^\infty \rho(102x)dx + \int_0^\infty \rho(103x)dx + \rho(201) + \rho(203) = 1.
\end{array} \right. \quad (2.43)$$

Последнее уравнение в системе (2.43) — условие нормировки.

Методом последовательных приближений можно показать, что система уравнений (2.43) имеет следующее решение:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\rho(111) = \rho(202) = \rho_0, \\
\rho(211x) = \rho_0 \int_x^\infty h^{(1)}(t-x) f_0(t) dt, \\
\rho(212x) = \rho_0 \int_x^\infty h^{(0)}(t-x) f_0(t) dt, \\
\rho(131x) = \rho_0 \int_0^\infty v^{(1)}(t,x) f_0(t) dt, \\
\rho(132x) = \rho_0 \int_0^\infty v^{(0)}(t,x) f_0(t) dt, \\
\rho(231x) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t,y) f_1(x+y) dy, \\
\rho(233x) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(1)}(t,y) f_1(x+y) dy + \\
\quad + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t,z) dz \int_x^\infty r(y-x) f_1(y+z) dy, \\
\rho(101x) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_x^\infty f_1(y-x) v^{(1)}(t,y) dy + \\
\quad + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t,z) dz \int_0^\infty r(y+x) f_1(y+z) dy, \\
\rho(102x) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_x^\infty f_1(y-x) v^{(0)}(t,y) dy, \\
\rho(103x) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(1)}(t,z) dz \int_0^\infty v(y+x) f_1(y+z) dy + \\
\quad + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t,z) dz \int_0^\infty f_1(y+z) dy \int_0^y v(y+u) r(y-u) du, \\
\rho(201) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t,y) F_1(y) dy, \\
\rho(203) = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty f_1(y) \left[\bar{V}^{(0)}(t,y) + \bar{V}^{(1)}(t,y) \right] dy + \\
\quad + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty f_1(y) dy \int_0^y v^{(0)}(t,z) \bar{R}(y-z) dz.
\end{array} \right. \tag{2.44}$$

Здесь $h^{(0)}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} r * (v * r)^{*(n-1)}(t)$ — плотность функции 0-восстановления

$H^{(0)}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} R * (V * R)^{*(n-1)}(t)$ альтернирующего процесса, порожденного СВ δ

и γ ; $h^{(1)}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (r * v)^{*(n)}(t)$ — плотность функции 1-восстановления

$H^{(1)}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (R * V)^{*(n)}(t)$ этого же альтернирующего процесса;

$v^{(0)}(t, x) = \int_0^t v(x + t - y) h^{(0)}(y) dy$ — плотность распределения остаточного

времени контроля; $v^{(1)}(t, x) = r(t + x) + \int_0^t r(x + t - y) h^{(1)}(y) dy$ — плотность

распределения остаточного времени ожидания контроля [29]; ρ_0 — находится из условия нормировки.

Для исходной системы множества работоспособных состояний E_+ и неработоспособных состояний E_- имеют вид:

$$E_+ = \{111, 212x, 211x, 131x, 132x, 231x, 233x\},$$

$$E_- = \{101x, 102x, 103x, 201, 203, 220x\}.$$

Найдем стационарные характеристики исходной системы. Найдем средние времена пребывания в состояниях исходной системы:

$$\begin{aligned} m(111) &= \int_0^{\infty} \bar{F}_0(t) \bar{R}(t) dt; & m(211x) &= m(231x) = \int_0^x \bar{R}(t) dt; \\ m(212x) &= m(233x) = \int_0^x \bar{V}(t) dt; & m(131x) &= m(132x) = \int_0^x \bar{F}_1(t) dt; \\ m(131x) &= m(132x) = \int_0^x \bar{F}_1(t) dt; & m(101x) &= m(102x) = m(103x) = x; \\ m(201) &= M\delta; & m(203) &= M\gamma; & m(220x) &= M\beta. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Среднюю стационарную наработку на отказ T_+ и среднее стационарное время восстановления T_- найдем по формулам (1.7), (1.6). С учетом формул (2.42), (2.44) и (2.45), найдем выражения, входящие в (1.7), (1.6).

$$\begin{aligned}
\int_{E_+} m(e) \rho(de) &= m(111) \rho(111) + \int_0^\infty m(211x) \rho(211x) dx + \int_0^\infty m(212x) \rho(212x) dx + \\
&+ \int_0^\infty m(131x) \rho(131x) dx + \int_0^\infty m(132x) \rho(132x) dx + \int_0^\infty m(231x) \rho(231x) dx + \\
&+ \int_0^\infty m(233x) \rho(233x) dx = \rho_0 \int_0^\infty \bar{F}_0(t) \bar{R}(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{R}(t) dt \int_x^\infty h^{(1)}(y-x) f_0(y) dy + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{V}(t) dt \int_x^\infty h^{(0)}(y-x) f_0(y) dy + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{F}_1(t) dt \int_0^\infty f_0(y) \left[v^{(0)}(y, x) + \right. \\
&+ v^{(1)}(y, x) \left. \right] dy + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{V}(s) ds \int_0^\infty f_0(t) dt \left[\int_0^\infty v^{(1)}(t, y) f_1(x+y) dy + \right. \\
&+ \left. \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty f_1(z+u+x) r(u) du \right] + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x \bar{R}(s) ds \int_0^\infty f_0(t) dt \times \\
&\times \int_0^\infty v^{(0)}(t, y) f_1(x+y) dy = \rho_0 M \alpha + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{V}(x) dx \times \\
&\times \int_0^\infty v^{(1)}(t, y) \bar{F}_1(x+y) dy + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{F}_1(x) \left[\bar{V}^{(0)}(t, x) + \bar{V}^{(1)}(t, x) \right] dx + \\
&\rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{V}(x) dx \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty \bar{F}_1(z+u+x) r(u) du + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty \bar{R}(x) dx \int_0^\infty v^{(0)}(t, y) \bar{F}_1(x+y) dy.
\end{aligned}$$

После использования операции интегрирования по частям и приведения подобных, данное выражение сводится к следующему:

$$\begin{aligned}
\int_{E_+} m(e) \rho(de) &= \rho_0 M \alpha + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \left\{ \int_0^\infty \bar{F}_1(x) [\bar{V}^{(0)}(y, x) + \bar{V}^{(1)}(y, x)] dx + \right. \\
&+ \bar{V}^{(1)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{V}(x) \bar{F}_1(x) dx - \int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, y) \bar{F}_1(y) dy + \int_0^\infty v(x) dx \int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, y) \bar{F}_1(x + y) dy + \\
&+ \bar{V}^{(0)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{V}(x) dx \int_0^\infty r(u) \bar{F}_1(u + x) du - \int_0^\infty r(u) du \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) \bar{F}_1(z + u) dz + \\
&+ \int_0^\infty v(x) dx \int_0^\infty r(u) du \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) \bar{F}_1(z + u + x) dz + \bar{V}^{(0)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{R}(x) \bar{F}_1(x) dx - \\
&- \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, y) \bar{F}_1(y) dy + \int_0^\infty r(x) dx \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, y) \bar{F}_1(x + y) dy \Big\} = \rho_0 M \alpha + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \times \\
&\times \left\{ \bar{V}^{(1)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{V}(x) \bar{F}_1(x) dx + \int_0^\infty v(x) dx \int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, y) \bar{F}_1(x + y) dy + \right. \\
&+ \bar{V}^{(0)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{V}(x) \bar{F}_1(x) dx - \bar{V}^{(0)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{R}(x) \bar{F}_1(x) dx + \bar{V}^{(0)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{R}(x) \bar{F}_1(x) dx + \\
&+ \bar{V}^{(0)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{R}(x) dx \int_0^\infty v(u) \bar{F}_1(u + x) du + \int_0^\infty v(x) dx \int_0^\infty r(u) du \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) \bar{F}_1(z + u + x) dz \Big\} = \\
&= \rho_0 M \alpha + \rho_0 \int_0^\infty \bar{V}(x) \bar{F}_1(x) dx + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt \int_0^\infty \bar{R}(x) dx \int_0^\infty v(u) \bar{F}_1(u + x) du + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v(x) dx \left[\int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, y) \bar{F}_1(x + y) dy + \int_0^\infty r(u) du \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) \bar{F}_1(z + u + x) dz \right].
\end{aligned}$$

В результате получили, что:

$$\begin{aligned}
\int_{E_+} m(e) \rho(de) &= \rho_0 M \alpha + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt \int_0^\infty v(u) du \int_0^\infty \bar{R}(x) \bar{F}_1(x + u) dx + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty \bar{V}(x) \bar{F}_1(x) dx + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v(x) dx \left[\int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, z) \bar{F}_1(x + z) dz + \right. \\
&+ \left. \int_0^\infty r(u) du \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) \bar{F}_1(x + u + z) dz \right]. \tag{2.46}
\end{aligned}$$

Далее,

$$\begin{aligned}
\int_{E_-} m(e) \rho(de) &= \int_0^\infty m(220x) \rho(220x) dx + m(201) \rho(201) + m(203) \rho(203) + \\
&\int_0^\infty m(101x) \rho(101x) dx + \int_0^\infty m(102x) \rho(102x) dx + \int_0^\infty m(103x) \rho(103x) dx = \\
&= \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \left\{ M \delta \int_0^\infty v^{(0)}(t, y) F_1(y) dy + M \gamma \int_0^\infty f_1(s) ds \times \right. \\
&\times \left[\int_0^s v^{(0)}(t, z) \bar{R}(s-z) dz + \bar{V}^{(0)}(t, s) + \bar{V}^{(1)}(t, s) \right] + \\
&+ \int_0^\infty x dx \left[\int_0^\infty f_1(y) v^{(0)}(t, y+x) dy + \int_0^\infty f_1(y) v^{(1)}(t, y+x) dy + \right. \\
&+ \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty r(x+y) f_1(y+z) dy + \int_0^\infty v^{(1)}(t, y) dy \int_0^\infty v(u+x) f_1(u+y) du + \\
&+ \left. \left. \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty f_1(z+y) dy \int_0^y v(u+x) r(y-u) du \right] \right\} = \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \times \\
&\times \left\{ M \delta \int_0^\infty v^{(0)}(t, y) F_1(y) dy + M \gamma \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty F_1(u+z) r(u) du - \right. \\
&- M \gamma \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) F_1(z) dz + M \gamma \int_0^\infty [v^{(0)}(t, z) + v^{(1)}(t, z)] F_1(z) dz + \\
&+ \int_0^\infty [\bar{V}^{(0)}(t, x) + \bar{V}^{(1)}(t, x)] F_1(y) dx + \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty \bar{R}(x) F_1(x+z) dx - \\
&- \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty \bar{R}(x) F_1(z) dx + \int_0^\infty v^{(1)}(t, y) dy \int_0^\infty \bar{V}(x) (F_1(x+y) - F_1(y)) dx + \\
&+ \left. \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty r(y) dy \int_0^\infty \bar{V}(x) (F_1(z+y+x) - F_1(z+y)) dx \right\}.
\end{aligned}$$

Данное выражение сводится к следующему:

$$\begin{aligned}
\int_{E_-} m(e) \rho(de) &= \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \left\{ \int_0^\infty r(s) ds \int_0^\infty v(x) dx \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) F_1(x+z+s) dz + \right. \\
&+ \int_0^\infty \bar{V}(x) F_1(x) dx + \bar{V}^{(0)}(t, 0) \int_0^\infty \bar{R}(s) ds \int_0^\infty v(x) F_1(x+s) dx + \int_0^\infty v(x) dx \int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, z) F_1(x+z) dz \left. \right\}.
\end{aligned}$$

(2.47)

Используя выражения (2.46) – (2.47), получим:

$$\begin{aligned}
\int_E m(e) \rho(de) &= \rho_0 M \beta + \rho_0 \int_0^\infty \bar{V}(x) dx + \rho_0 M \alpha \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty \bar{R}(x) dx \int_0^\infty f_0(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \left[\int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, z) dz + \right. \\
&\left. + \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) dz \right] = \rho_0 \left[M \beta + M \delta \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}_r(t) dt \right].
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Здесь $\hat{H}_r(t) = H_r(t) + 1$.

Далее,

$$\begin{aligned}
\int_{E_+} P(e, E_-) \rho(de) &= \int_0^\infty \left[P(233x, 220x) + P(233x, 103x) \right] \rho(233x) dx + \\
&+ \int_0^\infty P(131x, 101x) \rho(131x) dx + \int_0^\infty P(231x, 101x) \rho(231x) dx + \\
&+ \int_0^\infty P(132x, 102x) \rho(132x) dx = \int_0^\infty dx \left[\int_0^\infty v(x+u) du + \int_0^x v(x-u) du \right] \times \\
&\times \left(\rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(1)}(t, y) f_1(x+y) dy + \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \times \right. \\
&\times \left. \int_x^\infty r(y-x) f_1(y+z) dy \right) + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x f_1(x-y) dy \int_0^\infty v^{(1)}(t, x) f_0(t) dt + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty r(x+y) dy \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t, y) f_1(x+y) dy + \\
&+ \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^x f_1(x-y) dy \int_0^\infty v^{(0)}(t, x) f_0(t) dt = \rho_0 \int_0^\infty f_0(t) dt \times \\
&\left\{ \int_0^\infty v^{(1)}(t, y) \bar{F}_1(y) dy + \int_0^\infty v^{(0)}(t, z) dz \int_0^\infty r(y) \bar{F}_1(y+z) dy + \right. \\
&+ \int_0^\infty F_1(x) v^{(1)}(t, x) dx + \int_0^\infty \bar{R}(x) dx \int_0^\infty v^{(0)}(t, y) f_1(x+y) dy + \\
&\left. + \int_0^\infty F_1(x) v^{(0)}(t, x) dx \right\} = \rho_0.
\end{aligned} \tag{2.49}$$

Таким образом, с учетом (1.7), (2.46) и (2.49) средняя стационарная наработка на отказ T_+ имеет вид:

$$\begin{aligned}
T_+ = & M\alpha_0 + \int_0^\infty f_0(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt \int_0^\infty v(u) du \int_0^\infty \bar{R}(x) \bar{F}_1(x+u) dx + \\
& \int_0^\infty \bar{V}(x) \bar{F}_1(x) dx + \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v(x) dx \left[\int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, z) \bar{F}_1(x+z) dz + \right. \\
& \left. + \int_0^\infty r(u) du \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) \bar{F}_1(x+u+z) dz \right] = M\alpha_0 + M[pr],
\end{aligned} \tag{2.50}$$

где $M[pr]$ — среднее время нахождения компонента в предотказном состоянии в стационарном режиме.

С учетом (1.6), (2.47) и (2.49), среднее стационарное время восстановления T_- определяется формулой:

$$\begin{aligned}
T_- = & M\beta + \int_0^\infty \bar{V}(x) F_1(x) dx + \int_0^\infty f_0(t) dt \int_0^\infty v(x) dx \times \\
& \times \left[\int_0^\infty \bar{V}^{(1)}(t, z) F_1(x+z) dz + \int_0^\infty r(u) du \int_0^\infty \bar{V}^{(0)}(t, z) F_1(x+u+z) dz \right] + \\
& + \int_0^\infty f_0(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt \int_0^\infty v(u) du \int_0^\infty \bar{R}(x) F_1(x+u) dx = M\beta + M[pf],
\end{aligned} \tag{2.51}$$

где $M[pf]$ — среднее время нахождения компонента в состоянии параметрического СО в стационарном режиме.

С учетом (1.8), (2.50) и (2.51) стационарный коэффициент готовности будет следующим:

$$K_T = \frac{M\alpha_0 + M[pr]}{M\beta + [M\delta + M\gamma] \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f_0(t) dt}. \tag{2.52}$$

Найдем экономические характеристики исследуемой системы: среднюю прибыль S в единицу календарного времени и средние затраты C в единицу времени исправного функционирования системы.

Предположим, что g_+ — удельный доход, получаемый за единицу времени пребывания системы в работоспособном состоянии; c_f — удельные затраты на единицу времени функционирования системы; c_{im} — удельные затраты на единицу времени проведения минимального ТО (устранения причин попадания параметра в границу упреждающего допуска); c_{am} — удельные дополнительные затраты на проведения ТО; c_c — удельные затраты на единицу времени проведения контроля работоспособности системы; c_{pf} — удельные затраты на единицу времени работы с параметрическим отказом по причине выпуска брака.

Дополнительные затраты на проведения ТО определяются степенью ухода параметра от нормы, другими словами чем позже обнаружен уход параметра, тем выше стоимость восстановления системы. Максимальная стоимость ТО будет в случае наступления СО в системе.

Для рассматриваемой системы функции $f_s(e)$ и $f_c(e)$ следующие:

$$f_s(e) = \begin{cases} g_+, & e \in E_+, \\ -c_f, & e \in E_f, \\ -c_{im}, & e \in E_{im}, \\ -c_{am}, & e \in E_{am}, \\ -c_c, & e \in E_c, \\ -c_{pf}, & e \in E_{pf}, \end{cases} \quad f_c(e) = \begin{cases} c_f, & e \in E_f, \\ c_{im}, & e \in E_{im}, \\ c_{am}, & e \in E_{am}, \\ c_c, & e \in E_c, \\ c_{pf}, & e \in E_{pf}. \end{cases} \quad (2.53)$$

Здесь $E_f = E \setminus E_{im}$; $E_{im} = \{220\}$; $E_c = \{212x, 233x, 132x, 102x, 103x, 203\}$; $E_{am} = \{131x, 132x, 231x, 233x\}$; $E_{pf} = \{101x, 102x, 103x, 201, 203\}$. Отметим, что $E_{pf} \cup E_{im} = E_-$.

С учетом специального вида функции $f_s(e)$ величина средней прибыли S в единицу календарного времени определяется выражением (1.13):

$$S = g_+ K_T - [c_f \pi(E_f) + c_c \pi(E_c) + c_{am} \pi(E_{am}) + c_{im} \pi(E_{im}) + c_{pf} \pi(E_{pf})]. \quad (2.54)$$

Используя формулы (1.3), (2.46) — (2.49), найдем значения функционалов, входящих в выражение (2.54):

$$\begin{aligned}
\int_{E_{am}} m(e) \rho(de) &= \int_{E_+} m(e) \rho(de) - \rho_0 M \alpha_0 = \rho_0 M [pr], \\
\int_{E_{im}} m(e) \rho(de) &= \int_0^\infty m(220x) \rho(220x) dx = \rho_0 M \beta, \\
\int_{E_{pf}} m(e) \rho(de) &= \int_{E_-} m(e) \rho(de) - \int_{E_{im}} m(e) \rho(de) = \rho_0 M [pf], \\
\int_{E_c} m(e) \rho(de) &= \rho_0 M \gamma \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f_0(t) dt, \\
\int_{E_f} m(e) \rho(de) &= \int_E m(e) \rho(de) - \int_{E_{im}} m(e) \rho(de) = (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt.
\end{aligned}$$

С учетом полученных функций, найдем экономические параметры системы согласно (1.12), (1.13):

$$\left\{ \begin{aligned} G_+ &= c_+ \frac{M\alpha_0 + M[pr]}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt}, \\ \tilde{C}_f &= \frac{c_f (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt}, \\ \tilde{C}_m &= \frac{c_{im} M\beta + c_{am} M[pr]}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt}, \\ \tilde{C}_{pf} &= \frac{c_{pf} M[pr]}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt}, \\ \tilde{C}_c &= \frac{c_c M\gamma \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f_0(t) dt}{M\beta + (M\delta + M\gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt}, \end{aligned} \right. \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned}
S = & \left[g_+ M \alpha_0 - c_{im} M \beta + (g_+ - c_{am}) M [pr] - \right. \\
& - \left(c_f M \delta + (c_c + c_f) M \gamma \right) \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f_0(t) dt - \\
& \left. - c_{pf} M [pf] \right] / \left[M \beta + (M \delta + M \gamma) \int_0^\infty f_0(t) \hat{H}^{(0)}(t) dt \right].
\end{aligned} \tag{2.56}$$

Затраты в единицу времени исправного функционирования системы определяются согласно (1.11) с учетом формул (2.52) и (2.56):

$$\begin{aligned}
C = & \left[c_{am} M [pr] + (c_f M \delta + (c_c + c_f) M \gamma) \int_0^\infty \hat{H}^{(0)}(t) f_0(t) dt + \right. \\
& \left. + c_{im} M \beta + c_{pf} M [pf] \right] / (M \alpha_0 + M [pr]).
\end{aligned} \tag{2.57}$$

Получим формулы для K_Γ , G , $\tilde{C}$, S и C исследуемой системы с учетом периодического контроля при условии неслучайной периодичности контроля $\tau > 0$ и времени проведения контроля $h > 0$. Учитывая, что в этом случае $R(t) = 1(t - \tau)$, $V(t) = 1(t - h)$, где $\tau = const$ и $h = const$, выражения (2.52), (2.55) — (2.57) примут вид:

$$K_\Gamma = \frac{M \alpha_0 + M [pr](\tau, h)}{M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^\infty \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}, \tag{2.58}$$

$$\begin{aligned}
S = & \left[g_+ M \alpha_0 - c_{pf} M [pf](\tau, h) + (g_+ - c_{am}) M [pr](\tau, h) - \right. \\
& - (c_c h + c_f (h + \tau)) \left(1 + \sum_{n=1}^\infty \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right) - \\
& \left. - c_{im} M \beta \right] / \left[M \beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^\infty \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right) \right],
\end{aligned} \tag{2.59}$$

$$\begin{aligned}
C = & \left[c_{am} M [pr](\tau, h) + (c_c h + c_f (h + \tau)) \left(1 + \sum_{n=1}^\infty \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right) + \right. \\
& \left. + c_{im} M \beta + c_{pf} M [pf](\tau, h) \right] / [M \alpha_0 + M [pr](\tau, h)],
\end{aligned} \tag{2.60}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_+ = c_+ \frac{M\alpha_0 + M[pr](\tau, h)}{M\beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_f = \frac{c_f(\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}{M\beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_m = \frac{c_{im}M\beta + c_{am}M[pr](\tau, h)}{M\beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_{pf} = \frac{c_{pf}M[pf](\tau, h)}{M\beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}, \\ \tilde{C}_c = \frac{c_ch \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}{M\beta + (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}_0(n(\tau + h) - h) \right)}. \end{array} \right. \quad (2.61)$$

Здесь

$$\begin{aligned} M[pr](\tau, h) = & \int_0^h \bar{F}_1(x) dx + \int_0^\tau \bar{F}_1(x+h) F_0(\tau-x) dx + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\tau+h} \bar{F}_1(x+h) \left[F_0(n(\tau+h) + \tau-x) - F_0(n(\tau+h) - h) \right] dx, \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} M[pf](\tau, h) = & \int_0^h F_1(x) dx + \int_0^\tau F_1(x+h) F_0(\tau-x) dx + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\tau+h} F_1(x+h) \left[F_0(n(\tau+h) + \tau-x) - F_0(n(\tau+h) - h) \right] dx. \end{aligned} \quad (2.63)$$

Полученные формулы позволяют вычислить значения стационарного коэффициента готовности, среднюю прибыль и средние затраты. Также отметим, что при $M\alpha_1 \rightarrow 0$, получаем характеристики (2.18) — (2.21) для рассмотренной в параграфе 2.1 системы с внезапными СО. При условии же

проведения мгновенного контроля ($M\gamma \rightarrow 0$), получаем характеристики (2.38) — (2.40) системы, описанной в параграфе 2.2.

2.4 Верификация построенных аналитических моделей КТС однокомпонентных ПС

В литературе [58] представляется трехэтапный подход к проверке адекватности математической модели. На первом этапе проверяется насколько модель выглядит адекватной с точки зрения специалистов, которые с ней будут работать. На втором этапе осуществляется графическое представление данных, проверка гипотез о распределениях, анализ чувствительности и др. Третий этап – статистические сравнения между откликами реальной системы и модели. Методика применения статистических технологий зависит от доступности данных по реальной системе.

Другой вариант классификации процедур проверки адекватности предусматривает три группы тестов [35]: концептуальные, операционные и основанные на выходных данных. Концептуальные тесты проводятся на этапе построения концептуальной модели и включают проверку: постановки задачи моделирования, входных данных, структурных допущений, логическую валидацию. Операционные тесты (тесты на функционирование) анализируют адекватность поведения модели, включают тесты на непрерывность, анализ чувствительности, анализ вырождения, анализ анимации. Тесты, основанные на выходах, могут быть применены при наличии реальных выходных данных.

В ПС со СО зачастую невозможно экспериментально оценить параметры надежности, так как последствие наличия СО в системе не отражается явно на продукции. Поэтому проверить адекватность составленных аналитических моделей по реальным экспериментальным данным не представляется возможным. В этом случае обычно ограничиваются проверкой по первым двум этапам/тестам, т.е. верификацией аналитической модели [59]. В данной работе

верификация аналитических моделей будет проводиться с помощью имитационного моделирования.

Имитационное моделирование широко используется при анализе, проектировании и оптимизации сложных систем [60, 61, 62, 63, 64]. В настоящее время существует довольно много программных продуктов, позволяющих проводить имитацию реальных процессов. К таким пакетам относятся: Pilgrim, GPSS, Simplex, MatLab и ряд других [34, 36, 64].

Для создания имитационных моделей (ИМ) в рамках данной работы использовался пакет MATLAB [37] [65] [66] [67] [68], содержащий в своем составе инструмент визуального моделирования Simulink, т.к. данный продукт является универсальным инструментом для решения широкого спектра научных и прикладных задач.

Пакет Simulink позволяет осуществлять имитационное моделирование сложных динамических и дискретных систем. Ввод параметров систем производится в интерактивном режиме, путем графической сборки схемы соединений элементарных блоков, в результате чего получается модель исследуемой системы. Блоки, включаемые в создаваемую модель, могут быть связаны друг с другом как по информации, так и по управлению. Тип связи зависит от типа блока и логики работы модели. В Simulink большой набор генераторов случайных чисел. Если же и этих средств оказывается недостаточно, в модель могут быть включены и другие инструменты системы MatLab, в частности, набор инструментов Statistics Toolbox, в который входит более 20 генераторов случайных чисел.

Для моделирования систем с дискретными состояниями используется библиотека Simulink — SimEvents. Она позволяет создавать имитационные модели прохождения объекта через сети и очереди, обеспечивает моделирование систем зависящих не от времени, а от дискретных состояний. Позволяет анализировать такие характеристики производительности модели как интенсивность потока, потеря пакетов и т.п. Библиотеки готовых блоков,

таких как очереди, серверы и переключатели позволяют изобразить систему в виде интерактивной блок-схемы.

Для верификации аналитических моделей необходимо построить ИМ системы, ПМ модель которой описана в параграфе 2.3. Имитационное моделирование ПМ моделей, описанных в параграфах 2.1 и 2.2 не требуется, так как данные модели являются частным случаем выбранной ПМ модели при некоторых допущениях.

2.4.1 Имитационная модель календарного контроля наличия постепенных скрытых отказов производственной системы

Рассмотрим однокомпонентную ПС с наличием СО и с проведением календарного КТС. Функционирование данной системы в общем виде описано в параграфе 2.3. Напомним, что время исправной работы системы — СВ α_0 . После завершения времени исправной работы система переходит в предотказное состояние. Время нахождения системы в предотказном состоянии — СВ α_1 . После пребывания в предотказном состоянии система переходит в состояние СО. Контроль начинается через случайные (в общем случае) интервалы времени δ . Отказ обнаруживается, только если он произошел до момента начала контроля. Длительность проведения контроля СВ γ . После завершения контроля начинается отсчет времени до следующего контроля. В случае обнаружения отказа система начинает восстановление. Время восстановления системы СВ β . На время восстановления контроль отключается. После восстановления все свойства системы полностью обновляются.

ИМ данной системы состоит из двух сегментов: сегмент 1 описывает процесс работы и восстановления системы; сегмент 2 — процесс контроля наличия отказов в системе.

Рассмотрим первый сегмент (рисунок 2.7). В блоке «switches on» при запуске моделирования генерируется событие (транзакт), которое в

дальнейшем определяет состояние системы. В начальный момент времени, транзакт переходит в блок «normal operation» (работа системы до появления параметрического отказа) в котором находится случайное время. Случайное время определяется блоком «operation time» (СВ α_0), в котором генерируются случайные значения согласно выбранному виду и параметрам закона распределения СВ.

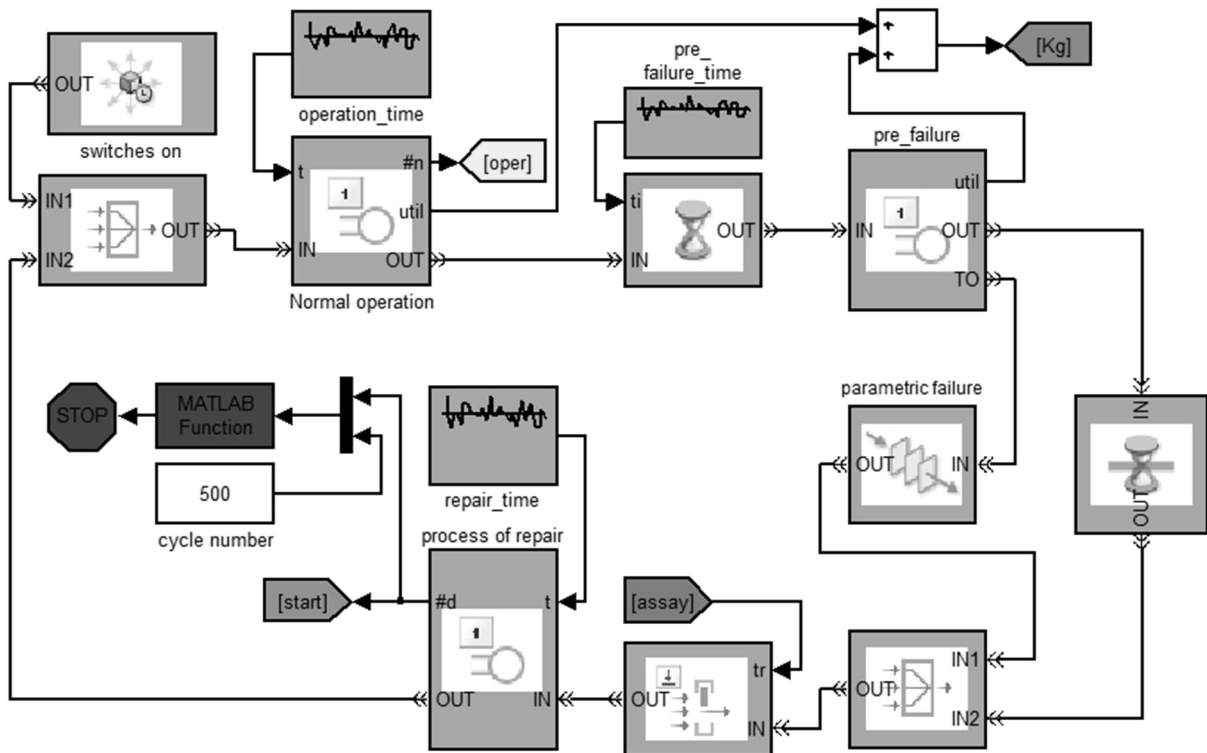


Рисунок 2.7. Блок-схема сегмента 1, описывающего исправное функционирование, ТО системы, а также нахождение системы в предотказном состоянии и состоянии СО

После завершения обработки транзакта в сервере «normal operation», он переходит в сервер «pre_failure». В данном сервере транзакт находится случайное время, соответствующее времени нахождения системы в предотказном состоянии (СВ α_1), либо время до возникновения события «Assay». Событие «assay» генерируется в момент получения результата контроля пробы ОК. В случае если за время пребывания системы в

предотказном состоянии не был проведен контроль, транзакт переходит в очередь «parametric failure». Нахождение транзакта в данной очереди соответствует пребыванию системы в состоянии скрытого параметрического отказа. Выход из данного состояния происходит при генерации события «Assay». После обнаружения предотказного состояния либо отказа транзакт перемещается в блок обработки «process of repair», где пребывает случайное время восстановления системы. Данное время задается блоком «repair time» ($CB \beta$). По завершению восстановления системы (обработки транзакта в данном блоке) генерируется событие «start» и транзакт поступает на вход блока «normal operation».

Второй сегмент (рисунок 2.8) описывает процесс контроля системы. В начале моделирования в блоке «switches on of control» генерируется транзакт, положение которого определяет состояние процесса контроля. Транзакт поступает в блок «control waiting» и пребывает в нем случайное время «waiting control time» ($CB \delta$). Пребывание в данном блоке соответствует времени ожидания проведения следующего контроля состояния системы. После окончания пребывания в блоке «control waiting» возможно два пути следования транзакта в зависимости от состояния системы.

Первый путь. Система на момент взятия пробы (момент начала контроля) находится в исправном состоянии, т.е. нет ни отказа системы, ни нахождения в предотказном состоянии (флаг «Oper» находится в состоянии «1»), в результате будет проводиться контроль пробы исправной системы. Транзакт переходит в блок «control of system without failure». По завершению контроля транзакт поступает на вход блока «control waiting».

Второй путь. Система на момент взятия пробы находится в предотказном состоянии, либо в состоянии скрытого отказа. В этом случае флаг «Oper» находится в состоянии «0». Начнется контроль пробы неисправной системы. Транзакт переходит в блок «control of system with failure». По завершению контроля генерируется событие «Assay», контроль отключается до появления

события окончания восстановления системы «start». После данного события транзакт поступает на вход блока «control waiting».

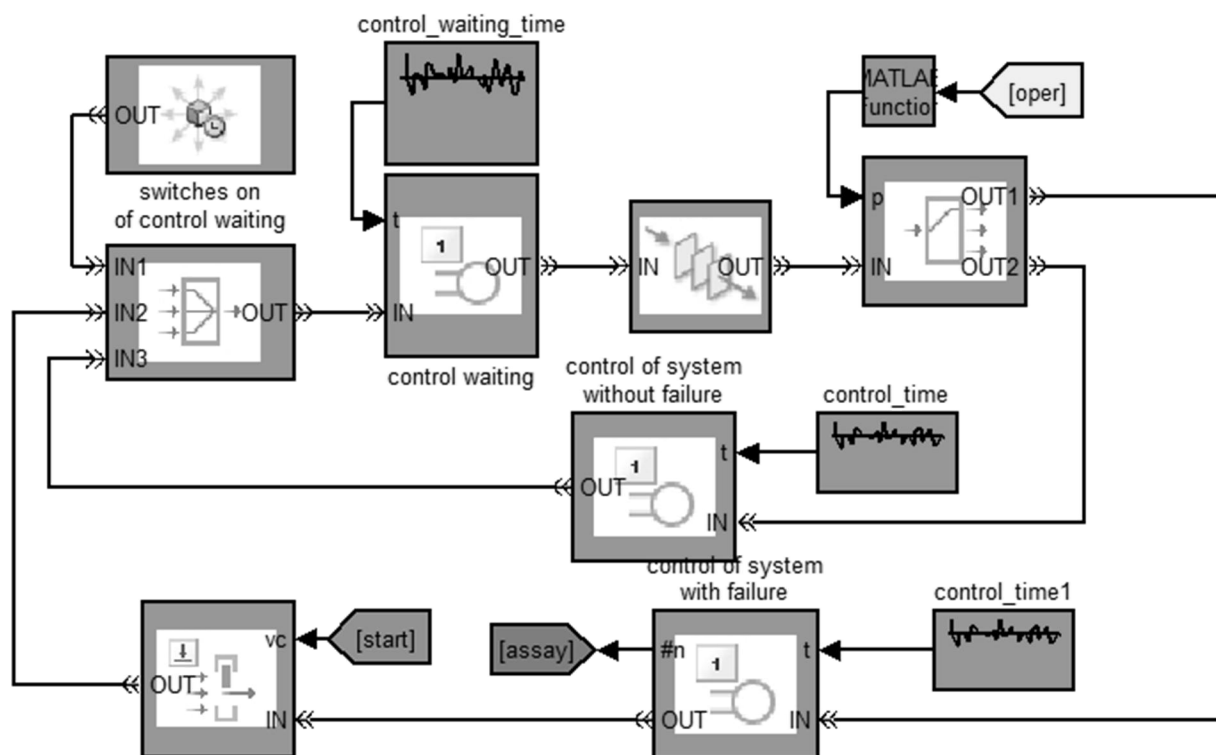


Рисунок 2.8. Блок-схема сегмента 2, описывающего процесс контроля технического состояния системы со скрытыми отказами

Время нахождения в блоках «control of system without failure» и «control of system with failure» является СВ γ и задается посредством генератора «control time». Моделирование заканчивается после достижения заданного пользователем количества циклов восстановления системы. Данный параметр задается в блоке «cycle number». По завершению расчета определяется коэффициент готовности системы по степени загрузки блоков «normal operation» и «pre_failure».

2.4.2 Определение требуемого количества циклов для выхода на стационарный режим работы имитационной модели

Как было сказано выше, время моделирование определяется пользователем посредством задания количества циклов восстановления

системы. Для получения характеристики надежности системы (стационарный коэффициент готовности системы) необходимо обеспечить выход ИМ на стационарный режим. Для этого было проведено предварительное моделирование работы системы с параметрами, сведенными в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Параметры ИМ

Случайная величина	Закон распределения	МО, ч	СКО, ч
Время исправного функционирования α_0	Усеченный (слева) нормальный	72	21,9
Время нахождения системы в предотказном состоянии α_1	Усеченный (слева) нормальный	35	15
Время восстановления системы (проведения ТО) β	Постоянная величина	11	-
Время ожидания контроля δ	Постоянная величина	20	-
Время проведения контроля γ	Постоянная величина	7	-

Моделирование проводилось до достижения 2000 циклов восстановлений системы. В результате моделирования получена зависимость отношения времени пребывания системы в исправном состоянии и предотказном состоянии к общему времени моделирования от количества циклов. Данное отношение времен соответствует коэффициенту готовности системы. После этого проведено усреднение коэффициента готовности скользящим окном шириной 100 циклов. В рамках окна рассчитывается среднее значение коэффициента, СКО и максимальный разброс относительных значений. Рассчитанные значения присваиваются последнему (сотому) циклу. На рисунке 2.9 приводятся значения рассчитанного в ИМ коэффициента готовности и усредненного по 100 циклам. На рисунке 2.10 приводятся значения рассчитанного в ИМ коэффициента готовности и усредненного по 100 циклам. Поведение среднего по окну значения, СКО и максимального разброса

позволяет выбрать минимально допустимое количество циклов при заданной точности соответствия результата стационарному режиму.

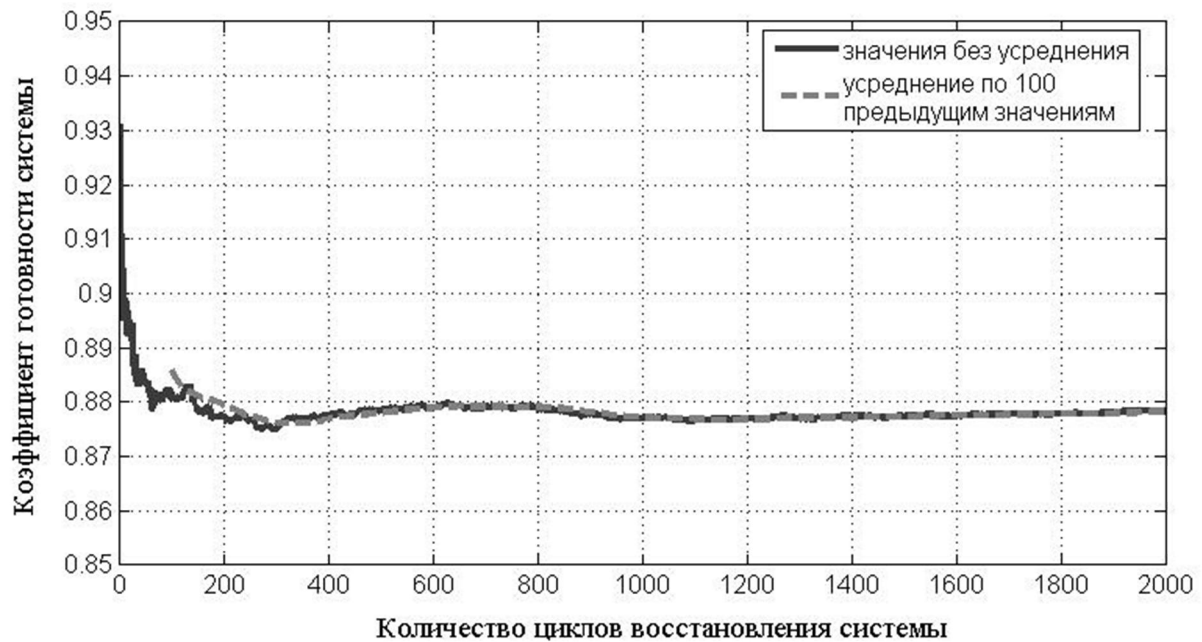


Рисунок 2.9. Зависимость коэффициента готовности от количества циклов восстановления системы

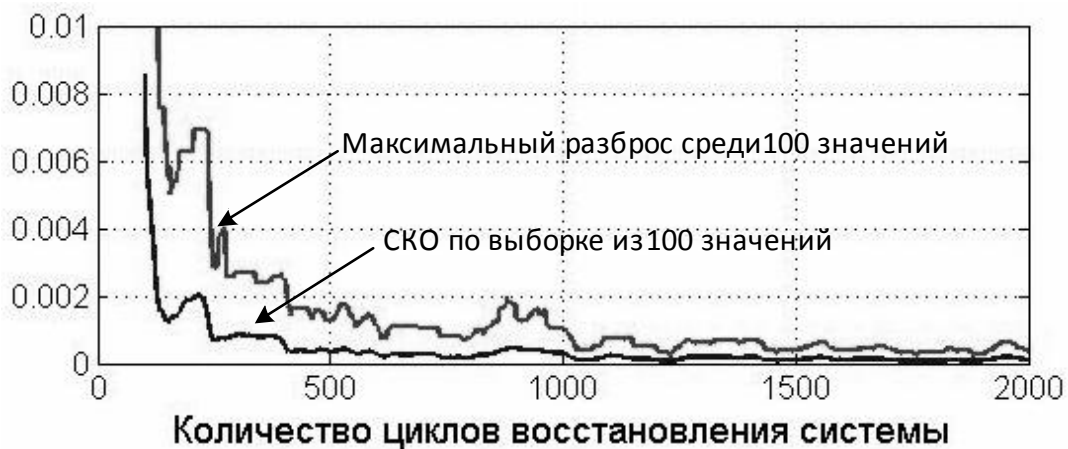


Рисунок 2.10. Зависимость СКО и максимального разброса значений K_r , усредненного по 100 значениям, от количества циклов.

По графикам видно, что проведение моделирования по 250 циклам позволяет определить стационарный коэффициент готовности системы с абсолютной погрешностью не более 0,006 ($3 \cdot \text{СКО}$), т.е. с относительной

погрешностью не более 0,7%. Моделирование по 500 циклам дает абсолютную погрешность 0,0017 (3*СКО), относительную погрешность 0,2%.

Основываясь на вышесказанном имитационное моделирование будет проводиться по 500 циклам с усреднением значения коэффициента готовности по последним 100 значениям. Это позволит говорить, что полученный средний коэффициент готовности является стационарным с точностью не менее 99,8%.

2.4.3 Верификация полумарковских моделей с помощью имитационного моделирования

Для верификации ПМ модели, описанной в параграфе, будет проводиться сравнение результатов расчета аналитических моделей с результатами имитационного моделирования. Сравнение будет проводиться по зависимости стационарного коэффициента готовности системы от периодичности проведения КТС. Аналитически стационарный коэффициент готовности рассчитывается с помощью выражений (2.58) и (2.62). Критерием оценивания будет величина относительной погрешности отклонений результатов аналитического расчета от имитационного моделирования.

Значения параметров, при которых проводится моделирование (аналитическое и имитационное), сведены в таблицу 2.2. Значение времени ожидания контроля τ изменяется в диапазоне 10:10:100 ч.

Для каждого значения периодичности контроля τ_i рассчитывается аналитическое $K_G^{an}(\tau_i)$ и имитационное $K_G^{im}(\tau_i)$ значения стационарного коэффициента готовности. Для полученных значений определяется величина относительной погрешности: $\Delta_i = (K_G^{im}(\tau_i) - K_G^{an}(\tau_i)) / K_G^{im}(\tau_i)$.

Рассчитанные значения стационарных коэффициентов готовности и относительной погрешности для трех наборов начальных данных сведены в таблице 2.3.

Таблица 2.2. Значения параметров системы, используемые при моделировании

Закон распределения СВ α_0 и α_1	Временные параметры, ч						
	$M[\alpha_0]$	$\sigma[\alpha_0]$	$M[\alpha_1]$	$\sigma[\alpha_1]$	$M[\beta]$	Постоянные величины	
						$M[\delta]$	$M[\gamma]$
Усеченный (слева) нормальный	72	21,9	35	15	11	τ_i	7
Гамма	74,5	24,4	42,9	14,7			
Экспоненциальный	75	75	15	15			

Таблица 2.3. Сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования

τ_i , ч	Группа начальных параметров								
	1			2			3		
	$K_G^{an}(\tau_i)$	$K_G^{im}(\tau_i)$	$ \Delta_i $, %	$K_G^{an}(\tau_i)$	$K_G^{im}(\tau_i)$	$ \Delta_i $, %	$K_G^{an}(\tau_i)$	$K_G^{im}(\tau_i)$	$ \Delta_i $, %
10	0,881	0,883	0,2	0,889	0,888	0,1	0,832	0,835	0,3
20	0,878	0,879	0,0	0,888	0,888	0,0	0,805	0,808	0,4
30	0,869	0,870	0,1	0,881	0,880	0,1	0,776	0,779	0,5
40	0,854	0,855	0,1	0,868	0,866	0,3	0,745	0,753	1,0
50	0,833	0,834	0,2	0,849	0,847	0,3	0,715	0,717	0,4
60	0,801	0,815	1,8	0,829	0,827	0,2	0,685	0,686	0,2
70	0,776	0,781	0,6	0,814	0,822	1,0	0,655	0,657	0,2
80	0,770	0,767	0,5	0,805	0,808	0,3	0,627	0,630	0,5
90	0,778	0,773	0,7	0,801	0,802	0,1	0,601	0,602	0,3
100	0,784	0,777	0,8	0,795	0,794	0,2	0,575	0,580	0,9

По приведенным данным можно сделать вывод, что величина относительной погрешности для всех трех случаев не превышает 1,8%, что соответствуют хорошему совпадению результатов аналитического и имитационного моделирования.

2.5 Выводы

1. Решены задачи математического описания функционирования однокомпонентных ПС с ТК внезапных и постепенных СО. Их существенной особенностью является то, что случайные величины, характеризующие параметры надежности ТК, имеют функции распределения общего вида.

2. Построены математические модели для однокомпонентной ПС при различных видах отказов по времени развития (внезапные, постепенные), а также для различных стратегий проведения календарного КТС: естественного и искусственного контроля. Для рассмотренных стратегий проведения КТС получены аналитические выражения для стационарных параметров надежности и эффективности систем: коэффициента готовности, удельной прибыли в единицу календарного времени, удельных затрат в единицу времени работоспособного состояния.

3. Построена ИМ КТС восстанавливаемой однокомпонентной ПС с возможностью возникновения постепенных СО. Для построенной ИМ определено количество циклов, необходимое для выхода на стационарный режим.

4. Проведено сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования ПС, описанной в параграфе 2.3, с различными наборами параметров. Сравнение аналитического и имитационного моделирования показывает, что расхождение результатов не превышает 1,8 %. Полученные значения относительных погрешностей не превышают допустимых и соответствуют хорошему совпадению результатов аналитического и имитационного моделирования в исследованной области стационарных характеристик ПС, подтверждая правильность постановки задачи при построении ПМ моделей.

Полученные аналитические выражения обладают универсальностью и могут быть использованы для расчета оптимальной периодичности КТС.

РАЗДЕЛ 3. ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПОКОМПОНЕНТНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ С НАЛИЧИЕМ СКРЫТЫХ ОТКАЗОВ

В параграфе 3.1 строится ПМ модель n -компонентной системы на основе ПМП $\xi^{(i)}(t)$ компонентов с общим ФПС, дополненных до ПМП заданием «времени вперед». Для построения модели используется метод суперпозиции. Показано, что при использовании описания функционирования компонентов с помощью ПМП с дополнением «временем вперед» (данное дополнение используется при построении моделей контроля параметрических скрытых отказов в однокомпонентных системах в разделе 2), применение метода суперпозиции не требует введения дополнительных компонент, что упрощает построение модели.

В параграфе 3.2 приводится расчет показателей надежности и эффективности многокомпонентной системы со СО и покомпонентным КТС, исходя из стационарных параметров ПМ моделей компонентов.

В параграфе 3.3 рассчитываются показатели надежности и эффективности рассматриваемой установки пайки волной припоя «SW 330-SF» Essemtec. Данные характеристики установки будут использоваться при оптимизации процесса технического контроля производственной установки.

Большинство ПС являются многокомпонентными. Зачастую системы состоят из независимо функционирующих компонентов. Поэтому особый интерес представляет описание характеристик (надежности, эффективности) многокомпонентных систем на основе характеристик отдельных компонентов.

В разделе 2 и [49, 50, 69] процессы контроля, технического обслуживания и диагностики компонента описываются с помощью ПМП $\xi(t)$ с общим ФПС: $E = \{j\bar{d}\bar{x}\}$, где j — номер узла, изменившего свое физическое состояние последним; $\bar{d}$ — вектор, компоненты которого указывают на физическое

состояние узла; $\bar{x}$ — вектор, компоненты которого дополняют ФПС, описывающее функционирование компонента, до полумарковского.

При построении ПМП компонентов возникает необходимость производить дополнение фазового пространства, чтобы обеспечить свойство марковости рассматриваемого процесса. Возможно два варианта дополнения фазового пространства до полумарковского:

с использованием «времени назад» — компоненты вектора $\bar{x}$ фиксируют времена, прошедшие с момента последнего изменения узлов компонента в прошлом до ближайшего изменения состояния компонента системы;

с использованием «времени вперед» — компоненты вектора $\bar{x}$ фиксируют времена с момента последнего изменения состояния компонента системы до ближайшего изменения узлов компонента в будущем.

При описании каждого компонента системы ПМП $\xi(t)$ с общим ФПС, система в целом также может быть описана с использованием ПМП и метода суперпозиции.

В [30] рассмотрено и дано определение суперпозиции конечного числа независимых процессов Марковского восстановления (ПМВ), каждый из которых может находиться в дискретном множестве состояний. В этом случае непрерывные компоненты не вводятся, что можно интерпретировать как частный случай с нулевыми непрерывными компонентами.

В [52] приведена теория по нахождению стационарных характеристик многокомпонентных систем, состоящих из конечного числа независимых компонентов с использованием метода суперпозиции. В данном источнике описывается суперпозиция ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с общим фазовым пространством состояний, дополненных до ПМП по первому варианту («время назад»). ФПС процесса суперпозиции расширяется до полумарковского введением дополнительного вектора непрерывных компонент, фиксирующих времена до следующего изменения компонент системы, что усложняет модель системы.

3.1 Использование метода суперпозиции ПМП для описания функционирования многокомпонентных систем

Построим ПМ модель ПС состоящей из N независимых компонентов, функционирование каждого из которых описывается ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с компонентами, фиксирующими время до ближайшего изменения («время вперед»).

Как уже отмечалось, ФПС ПМП может быть представлено в следующем виде: $E^{(i)} = \{j\overline{d_i}\overline{x^{(i)}}\}$, где $\overline{d_i} = \{d_i, d_i', d_i'', \dots\}$ — компоненты вектора, указывающие на физическое состояние компонентов системы, $j \in \overline{1, k_i}$ — номер элемента узла, изменившего свое физическое состояние последним, k_i — число узлов в i -м компоненте системы. Компоненты вектора $\overline{x^{(i)}} = \{x_1^{(i)}, \dots, x_{j-1}^{(i)}, 0, x_{j+1}^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}\}$ фиксируют время с момента последнего изменения системы (j -го узла компонента) до ближайшего изменения состояния остальных узлов компонента системы. Узлы компонента могут быть как зависимыми, так и независимыми. При рассмотрении компонента с зависимыми узлами, кроме того, что $x_j^{(i)} = 0$, некоторые из оставшихся компонент вектора $\overline{x^{(i)}}$ могут обращаться в ноль (восстановление системы после обнаружения отказа) либо сохранять свое значение на некотором промежутке времени (остановка элемента на время проведения контроля). Все подобные изменения учтены на этапе описания компонентов системы, поэтому достаточно будет рассмотреть вектор $\overline{x^{(i)}}$ в общем виде.

Временная диаграмма функционирования i -го компонента системы в общем случае приведена на рисунке 3.1. На данной диаграмме показана работа зависимых узлов компонента: при изменении состояния j -го узла — изменяется состояние m -го узла.

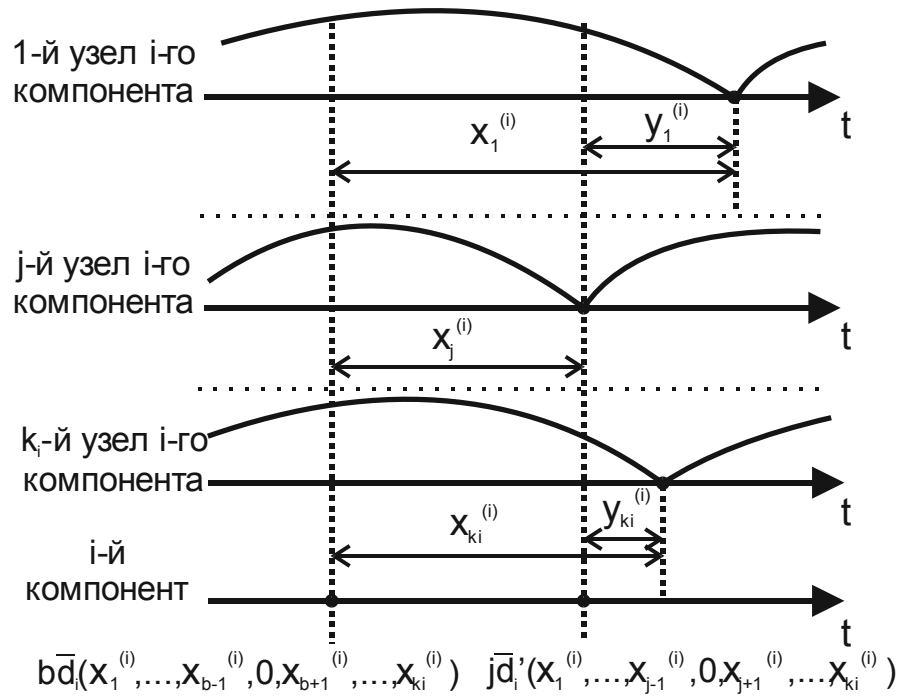


Рисунок 3.1. Временная диаграмма функционирования i -го компонента системы

Считаем, что определены следующие параметры ПМП i -го компонента системы, состоящего из k_i узлов:

- ФПС — $E^{(i)} = \{j\overline{d_i x^{(i)}}\}$, разбитое на подпространство рабочих $E_+^{(i)}$ и отказовых $E_-^{(i)}$ состояний;
- времена пребывания ПМП $\xi^{(i)}(t)$ в состояниях — $\theta_{j\overline{d_i x^{(i)}}}^{(i)}$;
- плотности вероятностей (вероятности) переходов ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$:
 $\psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$;
- стационарные распределения состояний ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$:
 $\rho^{(i)}[j\overline{d_i x^{(i)}}] = \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_{j-1}^{(i)}, 0, x_{j+1}^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$;
- среднее стационарное время восстановления $T_-^{(i)}$ и среднее стационарное время наработки на отказ $T_+^{(i)}$ компонента.

Приведем формальное определение суперпозиции ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с общим ФПС $E^{(i)}$.

Определение. Суперпозицией ПМП $\xi^{(i)}(t)$ с общим ФПС $E^{(i)}$ называется N -компонентный процесс $\xi(t)$ с компонентами $\xi(t) = \{\xi^{(1)}(t), \xi^{(2)}(t), \dots, \xi^{(N)}(t)\}$.

Заметим, что построенный таким образом процесс $\xi(t)$ является полумарковским. Действительно, он не меняет своего значения между двумя соседними скачками процессов $\xi^{(i)}(t)$, $i = \overline{1, N}$, т.е. является процессом с кусочно-постоянными траекториями, к тому же он уже обладает марковским свойством.

Общее ФПС для ПМП $\xi(t)$ может быть представлено в следующем виде: $E = \{i\overline{d}z, i = \overline{1, N}\}$. Компоненты вектора $\overline{d} = \overline{d}_1 \times \overline{d}_2 \times \dots \times \overline{d}_n$ указывают на физическое состояние узлов в компонентах; i — номер компонента, изменившего свое физическое состояние последним.

Компоненты вектора $\overline{z} = \{z_1, \dots, z_{i-1}, 0, z_{i+1}, \dots, z_N\}$, где $z_m = \bigwedge_{j \in \overline{1, k_i}} x_j^{(m)}$ фиксируют времена с момента последнего изменения системы до ближайшего изменения состояния m -х компонентов ($m \neq i$).

Множество значений вектора $\overline{z}$, при котором ПС работоспособна, обозначается через E_+ , а множество значений, при котором ПС неработоспособна, — через E_- ($E = E_+ \cup E_-$, $E_+ \cap E_- = \emptyset$).

Следует отметить, что построение суперпозиции для ПМП $\xi^{(i)}(t)$, фазовое пространство которых было дополнено компонентой «время вперед», не нуждается во введении дополнительных непрерывных компонент, т.к. введенные ранее компоненты i -го ПМП $\xi^{(i)}(t)$ ($x_1^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}$) однозначно определяют ФПС ПМП суперпозиции.

На рисунке 3.2 приведена диаграмма функционирования системы в целом. Рассмотрено два возможных перехода в системе: последнее изменение системы было в одном компоненте (b -м), а последующее происходит в другом

компоненте системы (i -м); последнее и последующее изменения происходят в одном и том же компоненте системы.

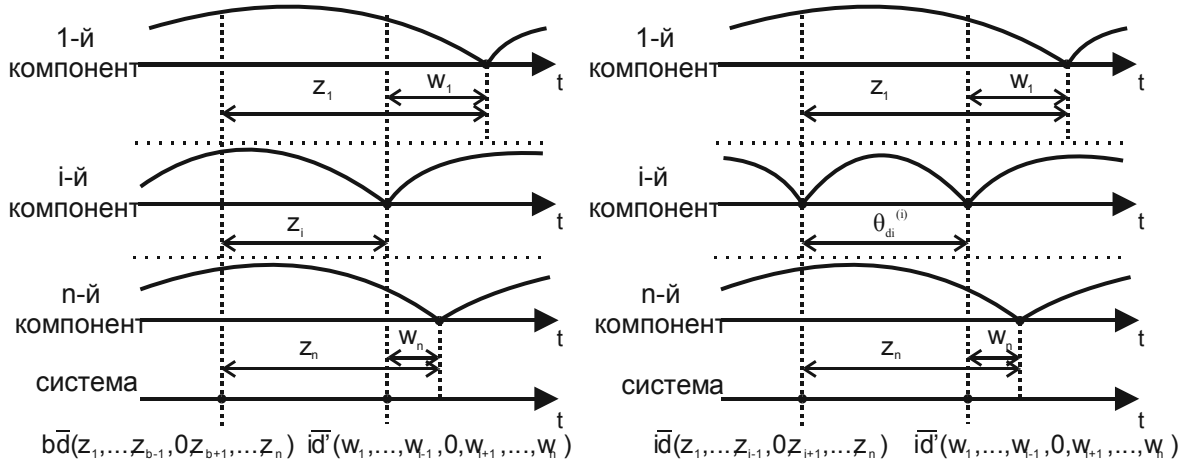


Рисунок 3.2. Функционирование системы, состоящей из N независимых компонентов

Для задания ПМ ядра суперпозиции воспользуемся очевидной формулой для времени пребывания в состояниях на n -м шаге ($\wedge$ — знак минимума):

$$\theta_{i\bar{d}z} = \theta_{d^{(i)}}^{(i)} \wedge z^{(i)}, \quad (3.1)$$

$$z^{(i)} = \bigwedge_{\substack{j \in \overline{1, N} \\ j \neq i}} z_j \quad (3.2)$$

Опишем плотности вероятностей переходов ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ суперпозиции. Пусть $E_{d_i}^{(i)}$ — совокупность состояний i -го компонента, из которых возможен переход в состояние $\bar{d}_i'$.

Из состояния $i\bar{d}z$, переходы бывают следующих типов:

1) в совокупность состояний $i\bar{d}'w$ (переход в состояние $\bar{m}_i$ i -го компонента) с плотностью распределения вероятности перехода $p_{i\bar{d}z}^{i\bar{d}'w} = \psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$, где $\bar{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)$, $w_i = \bigwedge_k y_k^{(i)}$, $i \in \overline{1, N}$, $\bar{d}_i' = \bar{m}_i$, $t = x_m^{(i)}$, $y_m^{(i)} = 0$, $x_k^{(i)} = y_k^{(i)} + t$, $\forall k \neq m$; $\bar{d}_j' = \bar{d}_j$, $x_k^{(j)} = y_k^{(j)} + t$, $\forall j \neq i$, $k \in kj$.

2) в совокупность состояний $j\overline{d'}\overline{w}$ (переход в состояние $\overline{m_j}$ j -го компонента системы) с плотностью распределения вероятности перехода $p_{i\overline{d}z}^{j\overline{d'}\overline{w}} = \psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$, где $\overline{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)$, $w_i = \bigwedge_k y_k^{(i)}$, $i \in \overline{1, N}$, $s_j = z_j$, $\overline{d_j'} = \overline{m_j}$, $y_m^{(j)} = 0$, $x_k^{(j)} = y_k^{(j)} + s_j$, $\forall k \neq m$; $\overline{d_i'} = \overline{d_i}$, $x_k^{(i)} = y_k^{(i)} + s_j$, $\forall i \neq j$, $k \in kj$.

Предположим, существование стационарных плотностей распределения ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ $\rho[i\overline{d}z]$ для состояний $i\overline{d}z$, $i \in \overline{1, n}$. Составим для них систему интегральных уравнений с учетом полученных плотностей распределения вероятности переходов из одного состояния в другое:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho[i\overline{d'}\overline{w}] = \sum_{\overline{d_i} \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\int_0^\infty \rho[i\overline{d}z] \psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_k^{(i)}) dt + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_0^\infty \rho[j\overline{d}z] \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_k^{(j)}) ds_j \right), \quad \overline{d'} \in E, \\ \sum_i \sum_{\overline{d} \in E} \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \rho[i\overline{d}z] d\overline{z} = 1, \quad i \in \overline{1, n}. \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Лемма 4.1. Решение системы (3.3) для суперпозиции N независимых ПМП $\xi^{(i)}(t)$ являются функции вида:

$$\rho[i\overline{d}z] = \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)}) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \left[\rho_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_k^{(j)}) \times \right. \\ \left. \times \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_k^{(j)}) \right] ds_j, \quad (3.4)$$

где $\rho^{(i)}[j\overline{d_i}x^{(i)}]$ — стационарные распределения состояний ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$, $\psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$ — плотности вероятностей (вероятности) переходов ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$, ρ_0 — находится из условия нормировки, последнее уравнение в системе (3.3).

Доказательство. Покажем, что выражения (3.4), являются решением системы уравнений (3.3), для этого рассмотрим решение первых n уравнений системы (3.3) в общем виде:

$$\begin{aligned} \rho[i\bar{d}'\bar{w}] &= \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\int_0^\infty \rho[i\bar{d}'\bar{z}] \psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) dt + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho[j\bar{d}'\bar{z}] \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \right) = \\ &= \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left[\int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) dt \times \right. \\ &\quad \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) ds_j + \\ &\quad \left. + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \left(\int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_j}^{(j)}(x_1^{(j)}, \dots, x_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \prod_{\substack{h=1 \\ h \neq j}}^N \int_0^\infty \rho_{d_h}^{(h)}(s_h + x_1^{(h)}, \dots, s_h + x_{k_h}^{(h)}) \psi_{d_h}^{(h)}(s_h + x_1^{(h)}, \dots, s_h + x_{k_h}^{(h)}) ds_h \right) \right]. \end{aligned}$$

Проведем замену переменных $t = s_i$, тогда:

$$\begin{aligned} \rho[i\bar{d}'\bar{w}] &= \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\sum_{i=1}^N \int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \times \right. \\ &\quad \left. \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + x_1^{(j)}, \dots, s_j + x_{k_j}^{(j)}) ds_j \right) = \\ &= \sum_{d_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\sum_{i=1}^N \int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \times \right. \\ &\quad \left. \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_0^\infty \rho_{d_j}^{(j)}(s_i + s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_i + s_j + y_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_i + s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_i + s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \right). \end{aligned}$$

Для функций $\rho^{(i)}[j\bar{d}_i\overline{x^{(i)}}]$ и $\psi_{d_i}^{(i)}(x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$ выполняется следующее

тождество:

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(t + s_i + y_1^{(i)}, \dots, t + s_i + y_k^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(t + s_i + y_1^{(i)}, \dots, t + s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i = \\ & = \int_t^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_k^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i. \end{aligned}$$

С учетом этого равенства, продолжим преобразование:

$$\begin{aligned} \rho[i\bar{d}'\bar{w}] &= \sum_{\substack{\bar{d}_i \in E_{d_i}^{(i)} \\ i=1}}^n \left(\sum_{i=1}^n \int_0^\infty \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \times \right. \\ & \left. \times \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_{s_i}^\infty \rho_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) ds_j \right). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Лемма 4.2. Пусть $\varphi_i(t)$, $i \in \overline{1, N}$ — непрерывные функции, определенные в диапазоне $[0, +\infty)$ и интегралы $\int_0^\infty \varphi_i(t) dt$ являются сходящимися. Тогда справедливо следующее утверждение:

$$\sum_{i=1}^n \int_0^\infty \phi_i(z) dz \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_z^\infty \phi_j(s_j) ds_j = \prod_{i=1}^n \int_0^\infty \phi_i(s_i) ds_i. \quad (3.6)$$

Доказательство леммы 4.2 приводится в [70].

С учетом (3.6) выражение (3.5) примет следующий вид:

$$\rho[i\bar{d}'\bar{w}] = \rho_0 \sum_{\bar{d}_i \in E_{d_i}^{(i)}} \left(\prod_{i=1}^n \int_0^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)}) ds_i \right).$$

Напомним, что $\rho_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)})$ — стационарные распределения состояний, а $\psi_{d_i}^{(i)}(s_i + y_1^{(i)}, \dots, s_i + y_{k_i}^{(i)})$ — вероятности переходов ВЦМ $\{\xi_{k_i}^{(i)}, k_i \geq 0\}$.

Очевидно, что:

$$\sum_{\overline{d_i} \in E_{d_i}^{(i)}} \int_0^\infty \rho_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) \psi_{d_i}^{(i)}(t + y_1^{(i)}, \dots, t + y_{k_i}^{(i)}) dt = \rho_{d_i}^{(i)}(y_1^{(i)}, \dots, y_{k_i}^{(i)}). \quad (3.7)$$

С учетом выражения (3.7) уравнение (3.5) примет вид:

$$\rho[\overline{id'w}] = \rho_0 \rho_{d_i}^{(i)}(y_1^{(i)}, \dots, y_{k_i}^{(i)}) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \int_0^\infty \left(\rho_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) \times \right. \\ \left. \times \psi_{d_j}^{(j)}(s_j + y_1^{(j)}, \dots, s_j + y_{k_j}^{(j)}) \right) ds_j.$$

Т.о. **лемма 4.1** доказана.

Найдем стационарные характеристики многокомпонентной системы.

Средние времена пребывания в состояниях исходной системы $m[\overline{idz}]$ однозначно определяются на основании выражений (3.1) и (3.2).

Найденные выше плотность стационарного распределения ПМВ $\rho[\overline{idz}]$ и среднее время пребывания в состояниях $m[\overline{idz}]$ позволяют определить стационарные характеристики K_Γ , S , C многокомпонентной системы, из параметров ПМ моделей каждого компонента по формулам (1.7) — (1.10).

С другой стороны коэффициент готовности K_Γ системы не зависит от метода дополнения ФПС до полумарковского. Поэтому для вычисления стационарного коэффициента готовности K_Γ используем формулу, полученную в [52]:

$$K_\Gamma = \sum_{d \in E_+} \prod_{i=1}^N T_{d_i}^{(i)} \left\{ \prod_{i=1}^N (T_+^{(i)} + T_-^{(i)}) \right\}^{-1}, \quad (3.8)$$

$$\text{где } T_{d_i}^{(i)} = \begin{cases} T_+^{(i)}, & \text{если } d_i \in E_+^{(i)}, \\ T_-^{(i)}, & \text{если } d_i \in E_-^{(i)}. \end{cases}$$

3.2 Стационарные характеристики многокомпонентной ПС со СО и покомпонентным КТС

Рассмотрим более подробно стационарные характеристики надежности и эффективности многокомпонентной ПС со СО и покомпонентным КТС. Компоненты данной системы в зависимости от структуры могут быть описаны ПМ моделями, представленными в разделе 2 либо в литературе [71, 72, 73, 74].

Положим, что известны: N — число компонентов системы и ее структура; g_+ — удельный доход, получаемый за единицу времени функционирования системы; c_{pf} — удельные затраты на единицу времени по причине работы системы в СО (выпуск брака); $K_r^{(i)}$ — стационарный коэффициент готовности i -го компонента; $\tilde{C}_m^{(i)}$ — средние затраты на проведение ТО i -го компонента в единицу календарного времени; $\tilde{C}_c^{(i)}$ — средние затраты на проведение КТС i -го компонента в единицу календарного времени, $\tilde{C}_f^{(i)}$ — средние затраты на обеспечение функционирования i -го компонента в единицу календарного времени.

Структура N -компонентной системы однозначно определяет множество работоспособных состояний $E_+ \subset E$, т.е. множество состояний, когда компоненты хотя бы одного из критических путей находятся в работоспособном состоянии. С учетом этого, по формуле (3.8) можно определить стационарный коэффициент готовности системы (K_r). Выразим K_r через стационарные коэффициенты готовности компонентов ($K_r^{(i)}$). Для этого преобразуем выражение (3.8) с учетом формулы (1.8):

$$K_r = \sum_{d \in E_+} \prod_{i=1}^N \frac{T_{d_i}^{(i)}}{T_+^{(i)} + T_-^{(i)}} = \sum_{d \in E_+} \prod_{i=1}^N K_{d_i}^{(i)}, \quad (3.9)$$

$$\text{где } K_{d_i}^{(i)} = \begin{cases} K_r^{(i)}, & \text{если } d_i \in E_+^{(i)}, \\ 1 - K_r^{(i)}, & \text{если } d_i \in E_-^{(i)}. \end{cases}$$

Отметим также, что если возможно выделить во множестве состояний компонента $E^{(i)}$, $i \in \overline{1, N}$ подмножество $E_\eta^{(i)}$, то выражение (3.9) справедливо для доли времени $\pi(E_\eta)$ пребывания в фиксированном подмножестве состояний системы E_η :

$$\pi(E_\eta) = \sum_{d \in E_\eta} \prod_{i=1}^N \pi_{d_i}(E_\eta^{(i)}), \quad (3.10)$$

$$\text{где } \pi_{d_i}(E_\eta^{(i)}) = \begin{cases} \pi(E_\eta^{(i)}), & \text{если } d_i \in E_\eta^{(i)}, \\ 1 - \pi(E_\eta^{(i)}), & \text{если } d_i \notin E_\eta^{(i)}. \end{cases}$$

Величина средней прибыли S в единицу календарного времени для системы определяется по выражению (1.13). Распишем средние доходы и затраты в единицу календарного времени, возникающие при эксплуатации и обслуживании многокомпонентной ПС со СО и покомпонентным КТС:

$$S = G_+ - [\tilde{C}_f + \tilde{C}_c + \tilde{C}_{pf} + \tilde{C}_m], \quad (3.11)$$

где G_+ — средний доход от функционирования системы в единицу календарного времени; $\tilde{C}_c$ — средние затраты на обеспечение функционирования системы в единицу календарного времени; $\tilde{C}_c$ — средние затраты на проведение КТС компонентов системы в единицу календарного времени; $\tilde{C}_{pf}$ — средние затраты из-за выпуска дефектной продукции (система в СО) в единицу календарного времени; $\tilde{C}_m$ — средние затраты на проведение ТО компонентов системы в единицу календарного времени.

G_+ определяется как произведение удельного дохода g_+ , получаемого за единицу времени нахождения системы в работоспособном состоянии, и доли времени пребывания системы в работоспособном состоянии:

$$G_+ = g_+ K_\Gamma \quad (3.12)$$

Так как компоненты системы являются независимыми с точки зрения функционирования, $\tilde{C}_f$, $\tilde{C}_c$, и $\tilde{C}_m$ определяются как суммы средних затрат на обеспечение функционирования ($\tilde{C}_f^{(i)}$), проведение КТС ($\tilde{C}_c^{(i)}$) и на проведение ТО ($\tilde{C}_m^{(i)}$) i -х компонентов в единицу календарного времени, соответственно:

$$\tilde{C}_f = \sum_{i=1}^N \tilde{C}_f^{(i)}, \quad \tilde{C}_c = \sum_{i=1}^N \tilde{C}_c^{(i)}, \quad \tilde{C}_m = \sum_{i=1}^N \tilde{C}_m^{(i)}. \quad (3.13)$$

Средние затраты системы из-за выпуска дефектной продукции $\tilde{C}_{pf}$ определяются как произведение удельных затрат (c_{pf}) за единицу времени по причине работы ПС со СО, и доли времени пребывания ПС в состоянии СО.

В общем случае каждый компонент системы, как и сама система, может функционировать либо в работоспособном состоянии, либо в состоянии СО:

$$E_f = E_+ \cup E_{pf}. \quad (3.14)$$

Доля времени пребывания системы во множестве E_{pf} с учетом (3.10) и (3.14) определяется формулой:

$$\pi(E_{pf}) = \pi(E_f) - \pi(E_+) = \sum_{d \in E_f} \prod_{i=1}^N \pi_{d_i}(E_f^{(i)}) - K_\Gamma,$$

$$\text{где } \pi_{d_i}(E_f^{(i)}) = \begin{cases} \pi(E_f^{(i)}), & \text{если } d_i \in E_f^{(i)}, \\ 1 - \pi(E_f^{(i)}), & \text{если } d_i \notin E_f^{(i)}. \end{cases}$$

Тогда величина средних затрат системы из-за выпуска дефектной продукции $\tilde{C}_{pf}$ в единицу календарного времени определяется формулой:

$$\tilde{C}_{pf} = c_{pf} \left(\sum_{d \in E_f} \prod_{i=1}^N \pi_{d_i}(E_f^{(i)}) - K_\Gamma \right). \quad (3.15)$$

Величину средних затрат C в единицу времени исправного функционирования ПС найдем, используя (1.11):

$$C = g_+ - \frac{S}{K_r}.$$

Полученные результаты позволяют определять стационарные характеристики ПМ модели многокомпонентной ПС исходя из ее структуры и параметров ПМ моделей каждого компонента системы, что в свою очередь позволяет упростить построение ПМ моделей многокомпонентных ПС.

3.3 ПМ модель покомпонентного контроля установки пайки двойной волной припоя «SW 330-SF» Essemtec

В параграфе 1.1 было приведено описание процесса работы и обслуживания установки пайки двойной волной припоя. В данном параграфе представлена ПМ модель контроля параметров установки.

Установка пайки волной припоя является системой, состоящей из трех независимых компонентов. Каждый из компонентов в свою очередь представляет собой однокомпонентную систему с ТК наличия СО.

3.3.1 Контроль плотности флюса в блоке флюсователя

В установке пайки волной припоя используется блок пенного флюсования Ersa ETS-250 [20]. Нанесение флюса способом пенного флюсования [75] подразумевает, что флюс вспенивается воздухом, нагнетаемым через капиллярный фильтр. При нанесении флюса пеной обеспечивает тонкий и равномерный слой флюса. Тонкая пленка флюса (3...4 мкм) достаточна для качественного флюсования и успевает высохнуть в зоне предварительного нагрева.

Достоинства этого способа нанесения флюса — низкая стоимость оборудования и простота настройки процесса флюсования.

К недостаткам этого метода можно отнести постоянный контакт флюса с воздухом (испарение растворителя, абсорбция влаги) и контакт флюса с поверхностью печатной платы (растворение во флюсе окислов и других

загрязнений, смываемых с поверхности платы). Это приводит к изменению состава и плотности флюса и, как следствие, к ухудшению пайки.

Рекомендуется [76], [20] проводить регулярный контроль и коррекцию плотности флюса, используемого в блоке флюсования, для обеспечения устойчивого качества пайки. При этом рекомендации производителей оборудования и специалистов по поводу частоты проведения контроля варьируется в диапазоне от двух до восьми раз за смену.

Процесс контроля плотности флюса в блоке флюсования (компонент №1) описывается ПМ моделью, разработанной в параграфе 2.2. Стационарный коэффициент готовности определяется формулой (2.38), средние доходы и затраты системы в единицу календарного времени — системой (2.41).

3.3.2 *Контроль качества припоя в блоке пайки*

В процессе пайки волной припоя печатных узлов состав припоя постоянно меняется, припой насыщается примесями. Исследования [77, 78] показывают, что количество примесей содержащихся в припоях оказывает существенное влияние на качество пайки. Дефекты пайки, вызванные примесями, могут проявляться как в процессе производства печатных узлов, так и в процессе эксплуатации изделия. Для достижения высоких результатов пайки необходима организация эффективного контроля примесей в припое. Контроль примесей осуществляется путем анализа химического состава пробы припоя.

Основываясь на методе контроля и на типе отказов в системе для моделирования процесса контроля качества припоя в блоке пайки (компонент №3) выбрана ПМ модель, разработанная в параграфе 2.3. Стационарный коэффициент готовности определяется формулой (2.58), средние доходы и затраты системы в единицу календарного времени — системой (2.61).

Следует отметить, что раннее обнаружение предотказного состояния системы позволяет предупредить проведение полного ТО с заменой (сливом)

части припоя, а ограничиться изменением типа используемого припоя для нормализации концентрации меди в припое.

3.3.3 Контроль температурных параметров установки пайки волной припоя

Контроль параметров конвекционного блока предварительного нагрева требует использования температурных датчиков. В большинстве установок пайки волной припоя имеются интегрированные датчики в зонах предварительного нагрева, которые позволяют определить вышла ли установка в заданный режим работы. Однако, интегрированные датчики не позволяют контролировать фактическую температуру нагрева паяемых элементов, а именно эта температура является одним из параметров, определяющим качество пайки. Установка температурных датчиков непосредственно на плате позволяет контролировать фактическую температуру нагрева как платы, так и термочувствительных элементов, находящихся на ней. Кроме того, использование температурных зондов позволяет определить ряд параметров установки пайки волной не связанных с блоком предварительного нагрева.

Способ получения термопрофиля и методика определения скорости конвейера и температурных параметров установки по полученному профилю описаны в приложении Б.

Проведение контроля температурных параметров установки пайки волной припоя при помощи температурного зонда позволяет отследить скрытые отказы следующих функциональных блоков установки: нагревательных элементов первого и второго блоков конвекционной печи, нагревательных элементов ванны припоя, блоков измерения температуры в конвекционной печи и в ванне припоя, привода конвейера, датчика скорости конвейера.

Ввиду большого количества источников и, как следствие, невозможности отслеживать влияние каждого из них на параметры установки, данный контроль следует отнести к контролю наличия внезапных скрытых отказов.

Контроль проводится методом взятия пробы. Как отмечалось ранее, контроль проводится без остановки оборудования.

Для описания процесса контроля параметров блока преднагрева и температуры пайки (компонент №2) далее будет использоваться ПМ модель, разработанная в параграфе 2.1. Стационарный коэффициент готовности контролируемых блоков определяется формулой (2.18), средние доходы и затраты в единицу календарного времени — системой (2.19).

3.3.4 *Параметры ПМ модели покомпонентного контроля установки пайки волной припоя «SW 330-SF» Essemtec*

Структура рассматриваемой трехкомпонентной системы является последовательной, т.к. возникновение СО либо отключение любого из блоков установки приводит к СО либо прекращению функционирования всей установки соответственно. Отметим, что в случае прекращения функционирования всей установки, блоки, ТО которых не проводится, продолжают функционировать.

Согласно (3.9) стационарный коэффициент готовности системы определяется выражением:

$$K_r(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \prod_{i=1}^3 K_r^{(i)}(\tau_i), \quad (3.16)$$

Здесь коэффициенты готовности компонентов определяются выражениями (2.18), (2.38) и (2.58).

Согласно (3.11) — (3.13), (3.15) средняя прибыль в единицу календарного времени определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
& S(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = (g_+ + c_{pf}) K_\Gamma(\tau_1, \tau_2, \tau_3) - c_{pf} \prod_{i=1}^3 \frac{\tilde{C}_f^{(i)}(\tau_i)}{c_f^{(i)}} - \\
& \quad - \sum_{i=1}^3 [\tilde{C}_f^{(i)}(\tau_i) + \tilde{C}_c^{(i)}(\tau_i) + \tilde{C}_m^{(i)}(\tau_i)], \\
& C(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = c_{pf} \left(\prod_{i=1}^3 \frac{\tilde{C}_f^{(i)}(\tau_i)}{c_f^{(i)} K_\Gamma(\tau_1, \tau_2, \tau_3)} - 1 \right) + \\
& \quad + \frac{\sum_{i=1}^3 [\tilde{C}_f^{(i)}(\tau_i) + \tilde{C}_c^{(i)}(\tau_i) + \tilde{C}_m^{(i)}(\tau_i)]}{K_\Gamma(\tau_1, \tau_2, \tau_3)}.
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Средние затраты $\tilde{C}_f^{(i)}(\tau_i)$, $\tilde{C}_c^{(i)}(\tau_i)$ и $\tilde{C}_m^{(i)}(\tau_i)$ определяются по формуле (2.41) для $i = 1$, по формуле (2.19) для $i = 2$ и по формуле (2.61) для $i = 3$.

Формулы (3.16), (3.17) задают функциональную зависимость стационарных надежностных и экономических характеристик исследуемой установки пайки волной припоя «SW 330-SF» Essemtec от трех входных параметров (периодичность каждого из КТС). Это в свою очередь позволяет использовать данные формулы в качестве критериев эффективности системы при оптимизации.

3.4 Выводы

1. Решена задача математического описания функционирования многокомпонентной ПС. Полученные аналитические выражения для многокомпонентных систем с независимыми компонентами являются универсальными и могут быть использованы для расчета экономических характеристик и характеристик надежности многокомпонентных ПС.

2. Показана применимость метода суперпозиции ПМП в случае, если компоненты системы описываются ПМП, полученных в результате дополнения компонентами, фиксирующими «время вперед».

3. Получены стационарные надежностные и экономические характеристики многокомпонентной системы со СО и покомпонентным КТС

для системы с произвольной структурой и для рассматриваемой установки. Полученные выражения позволяют оценить эффективность работы системы и могут использоваться в качестве критерия оптимизации.

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В параграфе 4.1 приводится описание основных принципов построения АСПР и проводится разработка структуры АСПР, необходимой для решения поставленной задачи оптимизации периодичности ТКС ПС со СО. В итоге приводится конечная АСПР, имеющая модульную структуру. В системе выделяются следующие основные модули: обработки и хранения данных, ввода данных, системы поддержки принятия решения (СППР) по выбору закона распределения СВ и/или его параметров, СППР по выбору оптимального процесса управления.

В параграфе 4.2 приводится описание СППР по выбору закона распределения СВ и/или его параметров. Приводятся примеры использования данного модуля.

В параграфе 4.3 приводится описание СППР по выбору оптимального процесса управления. Ставится задача многокритериальной и скалярной оптимизации. Приводятся описания алгоритмов многокритериальной оптимизации.

Выбор стратегии и периодичности контроля, а также метода проведения ТО относится к решениям, имеющим серьёзное долгосрочное воздействие. Поэтому стратегические решения подобного рода заслуживают тщательного анализа, в том числе математического моделирования, а также, что наиболее важно в условиях постоянно изменяющихся факторов (качество комплектующих, стоимость модулей и материалов, размеры ожидаемой прибыли) требуют создания автоматизированной системы принятия решений (АСПР).

4.1 Структура автоматизированной системы принятия решений при оптимизации периодичности КТС

Автоматизированная система принятия решений (АСПР) при управлении процессом ТО (УПП ТО) – это многоуровневая система, предназначенная для организации и управления процессом ТО ПС, которая основана на оценке состояния объекта управления в процессе эксплуатации (проведения КТС). АСПР должна учитывать отказные производственные ситуации, а также материальные и финансовые затраты.

Следует отметить, что процесс ТО включает в себя:

- процесс КТС ПС либо ее компонентов;
- непосредственно процесс проведения ТО.

В общем случае АСПР имеет структуру, приведенную на рисунке 4.1.

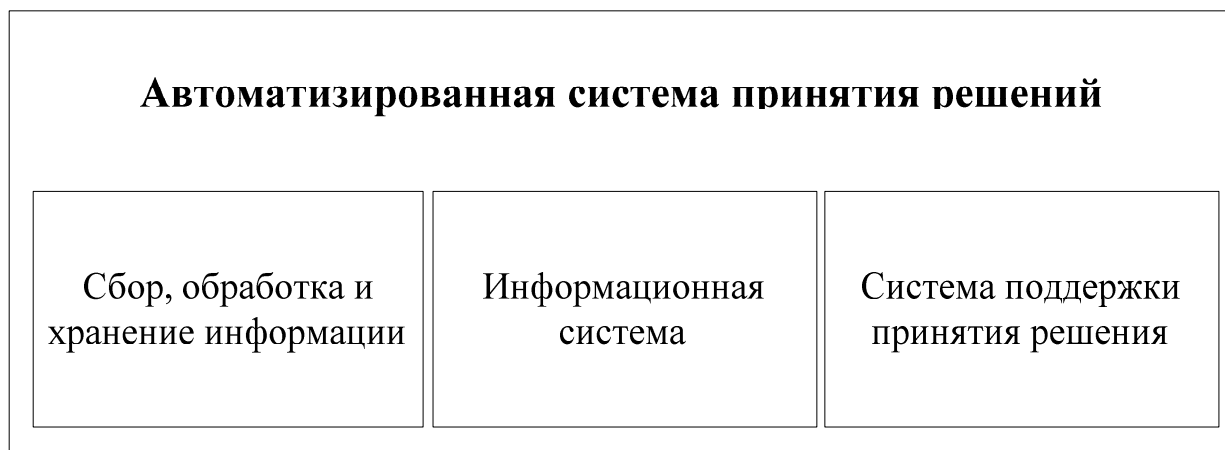


Рисунок 4.1. Структура АСПР

Наиболее объемным и трудоемким, с точки зрения организации, блоком является блок сбора, обработки и хранения информации. Данный блок напрямую не связан с процессом принятия решения, однако обеспечивает наличие необходимой базы, на основе которой будут приниматься те или иные решения. Второй блок — информационная система, функция которой сделать подготавливаемую информацию обозримой и пригодной для обработки. Третий блок — система поддержки принятия решений (СППР). Данный блок работает уже непосредственно с решениями и позволяет провести выбор конкретного

решения на основе заложенного алгоритма либо в процессе взаимодействия с лицом, принимающим решение (ЛПР).

«Принятие решений» является специфической функцией АСПР, которая отличает ее от автоматизированных компьютерных (информационных) систем. Эта функция предназначена для нахождения области оптимальных решений при многокритериальной оптимизации либо для выбора оптимального решения проблемной ситуации, связанной с появлением нарушения нормальной работы оборудования. Для осуществления этой функции АСПР включает в себя комплекс моделей расчета и принятия решений, а также систему создания и ведения базы данных, которая обеспечивает их информацией.

Общая концепция построения АСПР базируется на иерархическом принципе, который предусматривает распределение функций управления между взаимосвязанными структурными уровнями: информационным, стратегическим, тактическим и исполнительным. Иерархическая структура АСПР УПП ТО ПС приведена на рисунке 4.2.

Иерархическая организация АСПР обеспечивает сбор данных об объекте управления на информационном уровне, выбор функций распределения и методики проведения контроля на стратегическом уровне, формирование критериев качества функционирования ПС и их количественные оценки на тактическом уровне, а также управление процессом ТО ПС в процессе функционирования ПС на исполнительном уровне. При этом человек-оператор является связующим звеном системы, который контролирует ее функционирование.

На вход системы поступает информация от ЛПР и из базы данных. На выходе такой системы можно получать следующие сведения: оптимальную периодичность контроля для выбранного режима, оптимальную тактику проведения ТО, значения технических и экономических показателей качества функционирования ПС для выбранного режима.

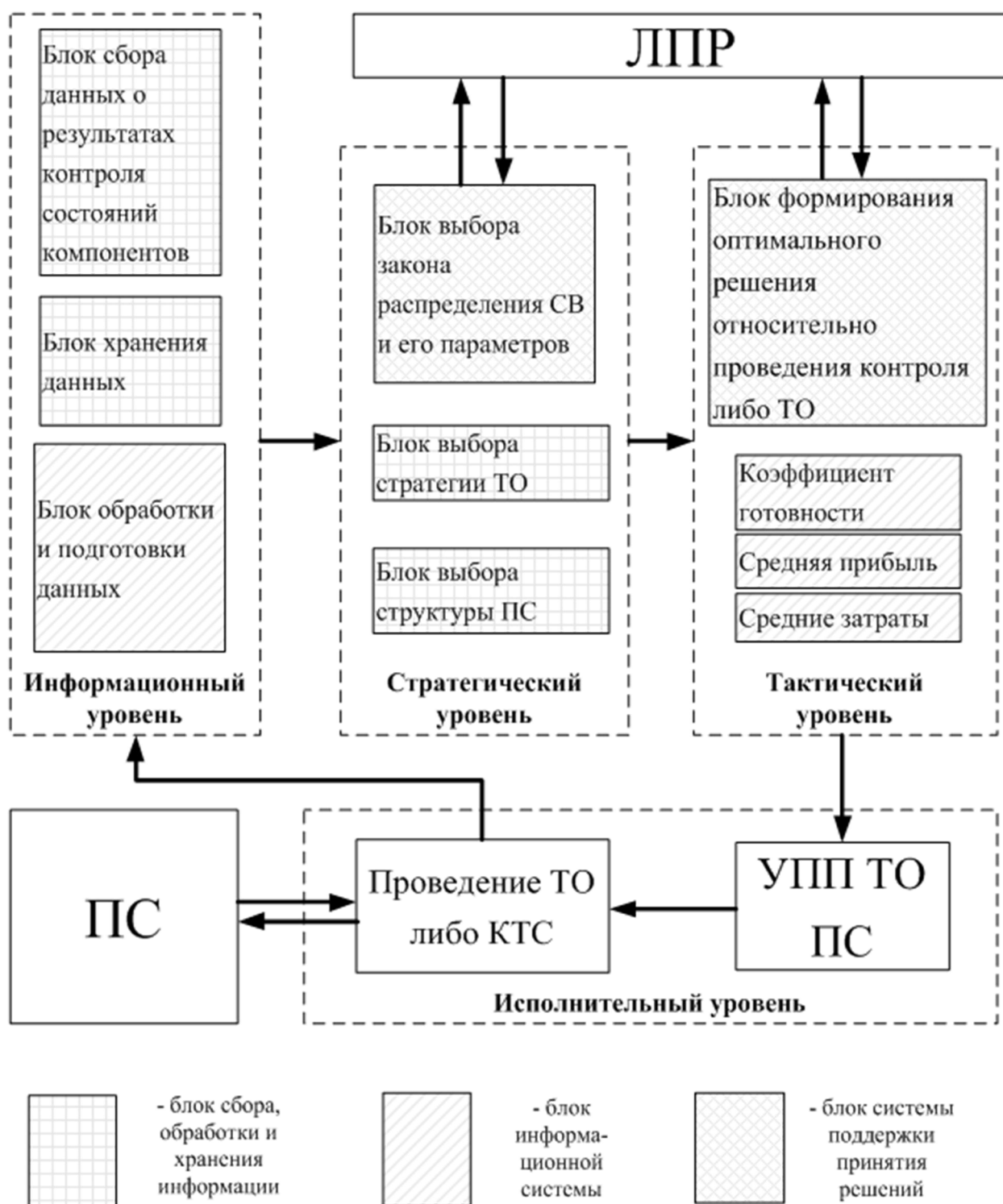


Рисунок 4.2. Иерархическая структура АСПР при управлении системой ТО ПС.

Структура АСПР разработана с учетом современных требований к системам подобного рода и анализа существующих типовых структур. Ее

особенностью является разделение на взаимонезависимые и взаимодействующие части.

АСПР реализуется в виде программной системы, структурная схема которой представлена на рисунке 4.3. Она содержит пять основных модулей и включает в себя большое количество алгоритмов, объединенных в вычислительные модели, которые позволяют решать различные технические задачи.

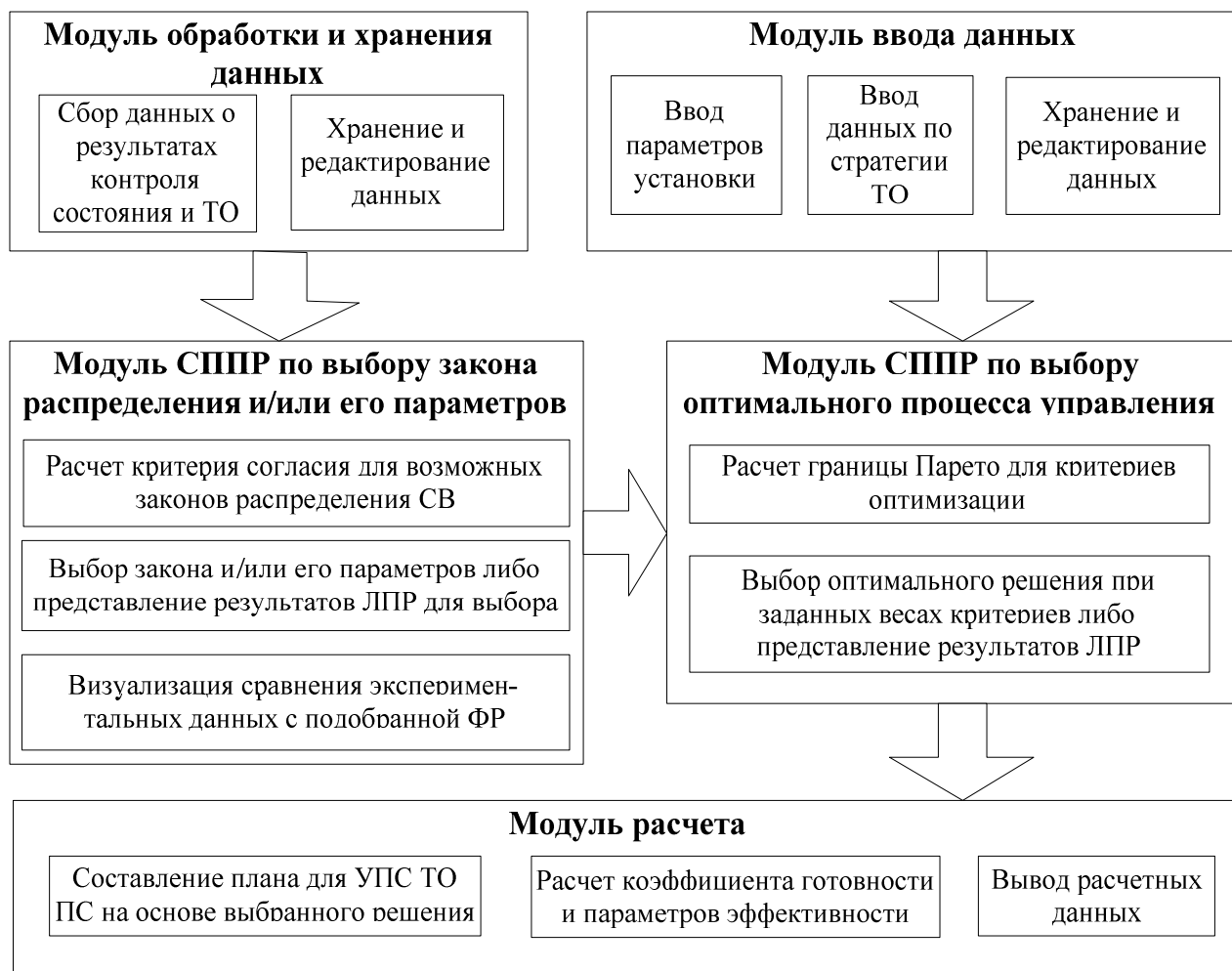


Рисунок 4.3. Структурная схема АСПР УПП ТО ТК

Пример работы модуля обработки и хранения данных представлен в приложении Б.. Модули СППР, как наиболее сложные в организации будут рассмотрены более подробно.

4.2 Модуль системы поддержки принятия решения по выбору закона распределения случайной величины и/или его параметров

Модуль СППР позволяет определить закона распределения СВ и/или его параметры по результатам контроля наличия СО.

На вход блока СППР по выбору закона распределения подается вектор экспериментальных значений СВ. Перед непосредственной обработкой вектор сортируется и фильтруется (удаляются инородные объекты, например символы). Оценка соответствия распределения СВ аналитическому закону проводится по критерию согласия Пирсона (критерий χ^2) [79].

В качестве аналитических функций времен наработки на отказ в модуле по умолчанию используются следующие законы [29]: экспоненциальное распределение; распределение Вейбула-Гнеденко; гамма-распределение; нормальное распределение; логнормальное распределение; равномерное распределение. Данный список может быть дополнен функциями пользователя.

Для каждой теоретической функции распределения F_i проводится оценка согласия с эмпирической по критерию Пирсона [80]. Следует помнить, что в данном случае проводится оценка сложной гипотезы [81], т.к. параметры теоретических распределений оцениваются по самой выборке. Для оценки параметров распределений используется метод максимального правдоподобия. Затем проверяется гипотеза H_0 о том, что эмпирическая функция распределения согласуется с теоретическим распределением F_i . Уровень значимости устанавливается ЛПР (по умолчанию $\alpha=0,05$). В случае, если гипотеза H_0 подтверждается, производится расчет вероятности p_i того, что СВ, распределенная по закону Пирсона, превысит значение меры расхождения, определенную с учетом числа степеней свободы.

После расчета производится автоматический выбор теоретического распределения с максимальной вероятностью p_i , либо результаты предоставляются ЛПР для принятия им решения.

4.2.1 Определение параметров блока флюсования

Внутренней технической документацией предприятия определено, что уровень плотности флюса 810 г/см^3 является критическим. Величина диагностического допуска выбрана 5 г/см^3 . Время достижения уровня плотности флюса 805 г/см^3 от начального уровня 794 г/см^3 является временем выхода блока в предотказное состояние α_0 , а время достижения уровня 810 г/см^3 от начального уровня 805 г/см^3 — время нахождения блока в предотказном состоянии α_1 . Обозначение времен выполнено согласно описанию ПМ модели в параграфе 2.2.

В качестве исходных данных для определения $F_0(t)$ и $F_1(t)$ будут выступать приведенные в приложении экспериментальные ФР времени достижения плотностью флюса уровня 805 г/см^3 и 810 г/см^3 . Время нахождения блока в предотказном состоянии определяется как разность времени достижения уровней 805 г/см^3 и 810 г/см^3 .

При определении закона распределения времени достижения определенного уровня вводится дополнительная гипотеза, согласно которой вид теоретического закона не зависит от начального и конечного уровней плотности. Другими словами распределение СВ должно быть бесконечно делимым [82]. Данная гипотеза ограничивает набор функций распределения до следующих: нормальное и гамма-распределение. Результаты расчета модулем СППР для двух выборок приведены в таблице 4.1.

При использовании автоматического выбора, СППР выбирает Гамма-распределение для описание времени достижения плотности флюса критического уровня в случае принятия гипотезы о сохранении вида закона при изменении величины критического уровня. ФР СВ имеет следующий вид:

$$F_i(t) = \frac{1}{\theta_i^{k_i} \Gamma(k_i)} \int_0^t t^{k_i-1} e^{-\frac{t}{\theta_i}} dt, \quad k_i > 0, \quad \theta_i > 0, \quad i = \overline{0,1}. \quad (4.1)$$

Таблица 4.1. Значение вероятности p_i предлагаемые ЛПР для принятия решения о выборе вида теоретического распределения

Уровень плотности флюса, г/см ³		Значение вероятности p_i для различных видов теоретического распределения F_i	
Начальный	Конечный	Гамма-распределение	Нормальное
794	805	0,335	0,322
805	810	0,846	0,486

Для СВ α_0 параметры Гамма-распределения $k_0 = 8$, $\theta_0 = 9,31$ мин ; для СВ α_1 — $k_1 = 5,02$, $\theta_1 = 8,54$ мин .

Сравнение эмпирической ФР с автоматически выбранной теоретической для СВ α_0 и α_1 приводится на рисунке 4.4.

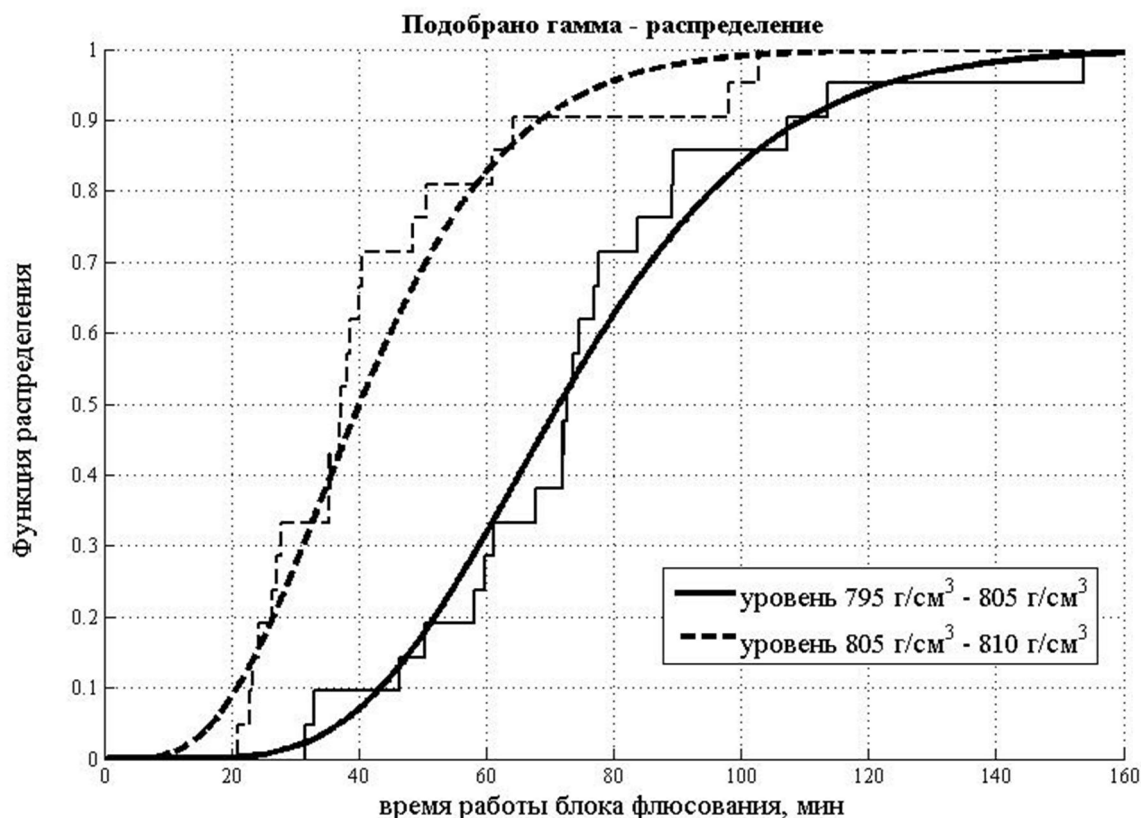


Рисунок 4.4. Сравнение эмпирической ФР с автоматически выбранной теоретической для СВ α_0 (сплошная) и α_1 (пунктирная)

4.2.2 Контроль качества припоя

Документацией производителя припоя определено, что массовая доля меди более 0,85% либо менее 0,4% в ванне припоя является критической. Так как в результате загрязнения припоя массовая доля меди может только увеличиваться, рассмотрим только верхнее ограничение. Величина диагностического допуска выбрана 0,05 %. Начальную массовую долю меди примем как средний уровень припоя, нормируемый производителем, — 0,50%. Время достижения массовой доли 0,80% от начального уровня 0,50% ($\Delta m_{кр} = 0,30\%$) является временем выхода блока в предотказное состояние α_0 , а время достижения массовой доли 0,85% от начального уровня 0,80% ($\Delta m_{кр} = 0,05\%$) — есть время нахождения блока в предотказном состоянии α_1 . Обозначение времен выполнено согласно описанию ПМ модели в параграфе 2.3.

В качестве исходных данных для определения $F_0(t)$ и $F_1(t)$ будет выступать полученная в приложении экспериментальная ФР обратной величины скорости загрязнения медью ванны припоя. Результаты расчета модулем СППР для выборки, представленной на рисунке Г.7, сведены в таблице 4.2.

При использовании автоматического выбора без участия ЛПР, СППР выбирает экспоненциальное распределение для описания величины обратной скорости загрязнения медью ванны припоя. ФР СВ имеет следующий вид:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Для СВ обратной скорости загрязнения медью ванны припоя параметр экспоненциального распределения $\lambda = 1/321 \text{ день}^{-1}$. Сравнение эмпирической ФР с автоматически выбранной теоретической для СВ приводится на рисунке 4.5.

Таблица 4.2. Значение вероятности p_i предлагаемые ЛПР для принятия решения о выборе вида теоретического распределения («-» — гипотеза H_0 отвергнута)

Вид теоретического распределения	Экспоненциальное	Вейбулловское	Гамма-распределение	Нормальное	Логнормальное	Равномерное
Значение вероятности p_i	0,8755	0,7969	0,6182	0,0555	0,8463	-

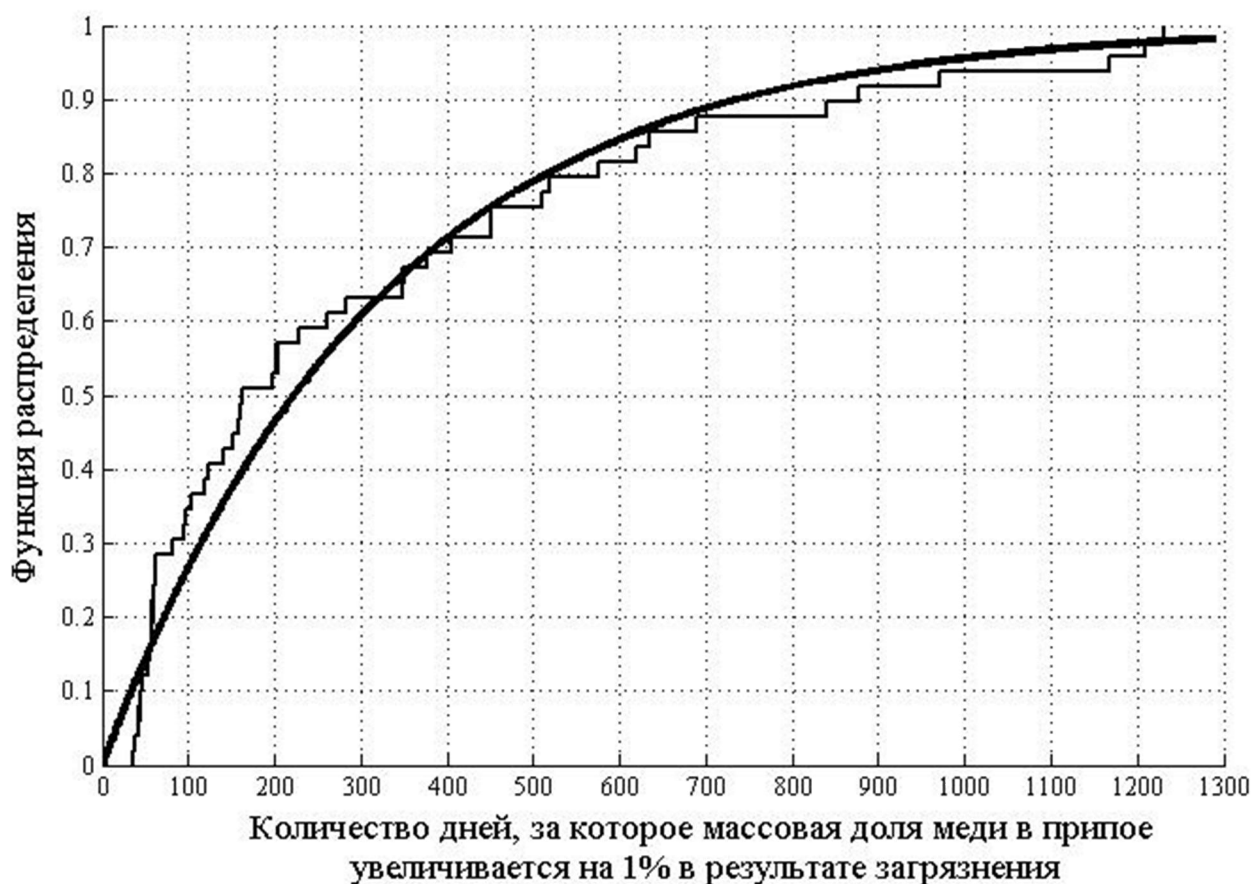


Рисунок 4.5. Сравнение эмпирической ФР с автоматически выбранной теоретической для СВ обратной скорости загрязнения медью ванны припоя

Время $t_{кр}$, за которое массовая доля меди увеличивается на фиксированный уровень $\Delta m_{кр}$, можно определить как произведения

фиксированного уровня на величину обратную скорости загрязнения ванны припоя медью v_{sol} :

$$t_{кр} = \frac{1}{v_{sol}} \Delta m_{кр}.$$

Согласно данному выражению СВ α_0 и α_1 определяются как произведение СВ обратной скорости загрязнения на константу $\Delta m_{кр}$. Известно, что экспоненциальное распределение обладает следующим свойством: если $X \sim Exp(\lambda)$ и $a > 0$ — произвольная константа, то $aX \sim Exp(\lambda/a)$.

Используя данное свойство можем заключить, что время $t_{кр}$, за которое массовая доля меди увеличивается на фиксированный уровень $\Delta m_{кр}$, описывается экспоненциальным распределением:

$$t_{кр} \sim Exp(\lambda / \Delta m_{кр}).$$

Для СВ α_0 параметр экспоненциального распределения $\lambda_0 = 1/96,2 \text{ день}^{-1}$; для СВ α_1 — $\lambda_1 = 1/16 \text{ день}^{-1}$.

4.2.3 *Определение параметров закона распределения наработки на СО блоков, контролируемых в процессе термопрофилирования*

Как ранее отмечалось, проведение контроля температурных параметров установки пайки волной припоя позволяют выявить наличие скрытых отказов в следующих функциональных блоках установки: конвейере, конвекционной печи, нагревателей ванны припоя, встроенной системы контроля температурных параметров и параметров конвейера. Каждый из перечисленных блоков имеют сложную структуру и состоит из большого количества компонентов. Известно [83], что сумма достаточно большого числа независимых (или слабо зависимых) случайных величин, подчиненных каким угодно законам распределения (при соблюдении некоторых весьма нежестких

ограничений), приближенно подчиняется нормальному закону, и это выполняется тем точнее, чем большее количество случайных величин суммируется. Также известно, что СВ которая определяется суммой СВ, описываемых нормальным законом, также подчинена нормальному закону.

Контроль температурных параметров установки является периодическим и выполняется методом взятия пробы. Процесс контроля и восстановления контролируемых блоков системы описывается ПМ моделью, приведенной в параграфе 2.1. Время проведения контроля однозначно определяется организацией производства и последовательностью операций, поэтому является постоянной величиной h . Для рассматриваемой установки время контроля температурных параметров составляет $h = 17 \text{ мин}$. Согласно выражению (2.18) среднее стационарное время обнаружения СО в системе M_{find} для неслучайного времени ожидания τ и проведения контроля h определяется выражением:

$$M_{find} = (\tau + h) \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \bar{F}(n(\tau + h) - h) \right). \quad (4.2)$$

В процессе работы установки среднее стационарное время обнаружения скрытого отказа в системе M_{find} экспериментально определяется как среднее арифметическое из времен $m_{find}^{(i)}$, прошедших от начала работы восстановленных блоков до момента обнаружения СО в результате проведения контроля. Величины τ , h однозначно определены, поэтому среднее время обнаружения СО в системе является функцией от двух параметров нормального закона распределения: $M_{find} = f(M\alpha, \sigma_{\alpha})$.

По факту обнаружения отказа можно провести ряд оценок, позволяющих более точно определить параметры закона распределения. Определим $n_{\min}$ и $n_{\max}$ как минимальное и максимальное число проведенных после восстановления контролей, позволившее обнаружить СО. По отношению

данных величин, можно провести оценку снизу и сверху для СКО наработки системы на СО σ_α :

$$\begin{cases} 0 \leq \sigma_\alpha < \frac{(\tau + h)}{8}, & \text{if } n_{\max} = n_{\min}, \\ (n_{\max} - n_{\min} - 1) \frac{(\tau + h)}{8} < \sigma_\alpha \leq (n_{\max} - n_{\min} + 1) \frac{(\tau + h)}{8}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Отметим, что при оценке используется правило четырех σ_α . При известных величинах τ , h , M_{find} и при оценке СКО сверху из выражения (4.2) однозначно определяется $M\alpha$.

При условии достаточного числа статистических данных и частом проведении контроля, оценка СКО снизу и сверху являются близкими величина, что позволяет достаточно точно определить параметры ФР наработки на СО рассматриваемого блока.

4.3 Модуль системы поддержки принятия решений по выбору оптимального процесса управления

Принятие решения о выборе той либо иной стратегии управления для ПС должно базироваться на решении оптимизационной задачи выбора наиболее эффективной стратегии управления процессом контроля ПС.

Эффективность операции — степень соответствия реального результата операции требуемому [18]. В практике исследования эффективности обычно выделяют проблему оценки эффективности и проблему выбора рационального способа действий (выбора тактики). Оценка эффективности предполагает формирование цели операции, выбор показателя эффективности, количественно выражающего степень соответствия реального результата ожидаемому.

Для рассматриваемой системы в качестве критериев оптимальности будут использованы надежность и экономические параметры производственной установки пайки волной припоя, полученные в параграфе 3.3.4:

- 1) Стационарный коэффициент готовности (3.16):

$$\varphi_1(\bar{\tau}) = K_r(\bar{\tau}) \rightarrow \max_{\bar{\tau} \in T};$$

2) Средняя прибыль в единицу календарного времени (3.17):

$$\varphi_2(\bar{\tau}) = S(\bar{\tau}) \rightarrow \max_{\bar{\tau} \in T};$$

3) Средние затраты в единицу времени исправного функционирования системы (со знаком минус) (3.17):

$$\varphi_3(\bar{\tau}) = -C(\bar{\tau}) \rightarrow \max_{\bar{\tau} \in T}.$$

Здесь $\bar{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_N)$ — вектор варьируемых параметров задачи, область допустимых значений вектора $\bar{\tau}$ образует множество T .

Ставим трехкритериальную задачу оптимизации [84] процесса управления покомпонентным контролем: найти значения варьируемых параметров τ_i , $i = \overline{1,3}$, которые, в пределе, обеспечивают выполнение всех условий 1) — 3). Векторный критерий оптимальности $(\phi_1(\bar{\tau}), \phi_2(\bar{\tau}), \phi_3(\bar{\tau}))$ определен на множестве T и ЛПР стремится максимизировать значение каждого из частных критериев оптимальности $\phi_i(\bar{\tau})$, $i = \overline{1,3}$:

$$\max_{\bar{\tau} \in T} (\phi_1(\bar{\tau}), \phi_2(\bar{\tau}), \phi_3(\bar{\tau})). \quad (4.3)$$

Обычно критерии оптимальности являются противоречивыми, и свои оптимальные значения достигают в различных точках множества допустимых значений вектора варьируемых параметров T . Вследствие этого решением задачи является множество компромиссных решений, называемое множеством Парето (границей Парето, Парето оптимальным множеством). Это множество включает в себя решения, которые нельзя улучшить сразу по всем критериям.

4.3.1 Многокритериальная оптимизация с использованием генетического алгоритма для поиска решений

Для исследуемой системы имеется три критерия эффективности системы, которые зависят от трех параметров управления (от N параметров для N -

компонентной системы). В процессе оптимизации необходимо определить величины параметров управления, которые обеспечат эффективность функционирования системы.

Данная задача имеет следующие особенности:

- многокритериальность;
- большое число альтернативных решений;
- целевая функция может иметь множество локальных экстремумов ввиду рассмотрения общего вида закона распределения СВ.

Очевидно, что простой перебор всех вариантов может занимать слишком много времени. Таким образом, возникает задача, как за приемлемое время найти оптимальное либо близкое к оптимальному решение.

Анализ различных литературных источников [84, 85, 86, 87, 88, 89] показал, что для решения задач с перечисленными особенностями хорошую применимость показывают генетические алгоритмы (ГА). Поэтому было принято решение использовать ГА для определения периодичности КТС блоков установки близкой к оптимальной с точки зрения оптимизационной задачи (4.3).

ГА имеют следующие преимущества (+) и недостатки (-) [85]:

- + не требуется никакой информации о целевой функции;
- + разрывы, существующие на поверхности ответа, слабо влияют на эффективность оптимизации;
- + относительная стойкость к попаданию в локальные оптимумы;
- + пригодность для решения широкого класса крупномасштабных задач;
- проблематично найти точный глобальный оптимум;
- трудно применим для изолированных функций;
- неэффективно применять для оптимизации функции, требующей большого времени на вычисление;
- не для всех задач удастся найти оптимальное кодирование параметров.

При описании ГА используют определения, заимствованные из генетики.

Популяция — это конечное множество особей. Особи, входящие в популяцию, в алгоритме определяются генотипом с закодированным в нем множеством параметров задачи.

Генотип — набор хромосом данной особи.

Хромосома — упорядоченная последовательность генов.

Ген — атомарный элемент генотипа, в частности хромосомы.

Локи — множество позиций генов.

Функция приспособляемости (фитнес функция, функция оценки) — функция, определяющая степень приспособленности данной особи в популяции.

Рассмотрим применение ГА для решения задачи оптимизации процесса покомпонентного ТК наличия скрытых отказов многокомпонентной ПС.

Рассмотрим N -компонентную систему с покомпонентным КТС. Особью в данном случае будет являться план управления периодичностью контроля. Вектор времен $\bar{\tau}$, определяющих периодичность контроля каждого из n компонентов, является характеристикой особи — генотипом. Генотип состоит из N хромосом. I -я хромосома определяет периодичность контроля i -го компонента. В качестве фитнес функции для оценки пригодности особи (решения) используется целевая трехкритериальная функция (4.3).

Каждая хромосома может быть представлена как двоичный код, число разрядов k_i которого определяется количеством возможных значений времен ожидания проведения контроля τ_i . Очевидно, что и генотип также представлен в виде двоичного кода с разрядностью $k = \sum_{i \in 1, N} k_i$. В геноме k_1 младших разрядов образуют первую хромосому, следующие k_2 разрядов — вторую и так далее. Структура произвольного генома приведена на рисунке 4.6.

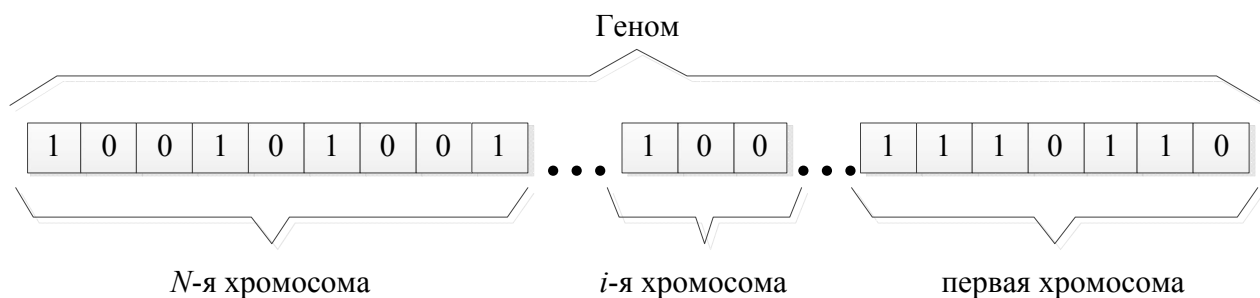


Рисунок 4.6. Структура генома

С учетом специфики задачи был выбран ГА с проведением сортировки по доминированию и с элитарным отбором (NSGA-II) [90, 91].

Опишем пошагово работу выбранного ГА с учетом выбранных генетических операторов (операторы кроссинговера, мутации, генерации популяции) и их параметров:

1. После старта алгоритма создается популяция из R особей. Начальная популяция генерируется случайным образом с использованием равномерного распределения.
2. Проводится селекция методом парного турнирного отбора.
3. Проводится операция скрещивания для отобранных особей (родителей). Создание потомков происходит с использованием однородного кроссовера. В нем скрещивание выполняется на основе бинарного вектора, длина которого равна длине генома в локусах. Каждая позиция вектора определяет взаимную замену локуса у родительских особей. В результате скрещивания создается $R/2$ особей-потомков.
4. Недостающая часть особей ($R/2$) до удвоенного объема популяции ($2 \cdot R$) образуется за счет мутации уже полученных особей.
5. Особи оцениваются на уровень приспособляемости. R наиболее приспособленных особей включаются в новое поколение, остальные отсеиваются.
6. Повторяются шаги 2 — 5, если не достигнут критерий выхода из цикла.

Блок схема используемого ГА приведена на рисунке 4.7.

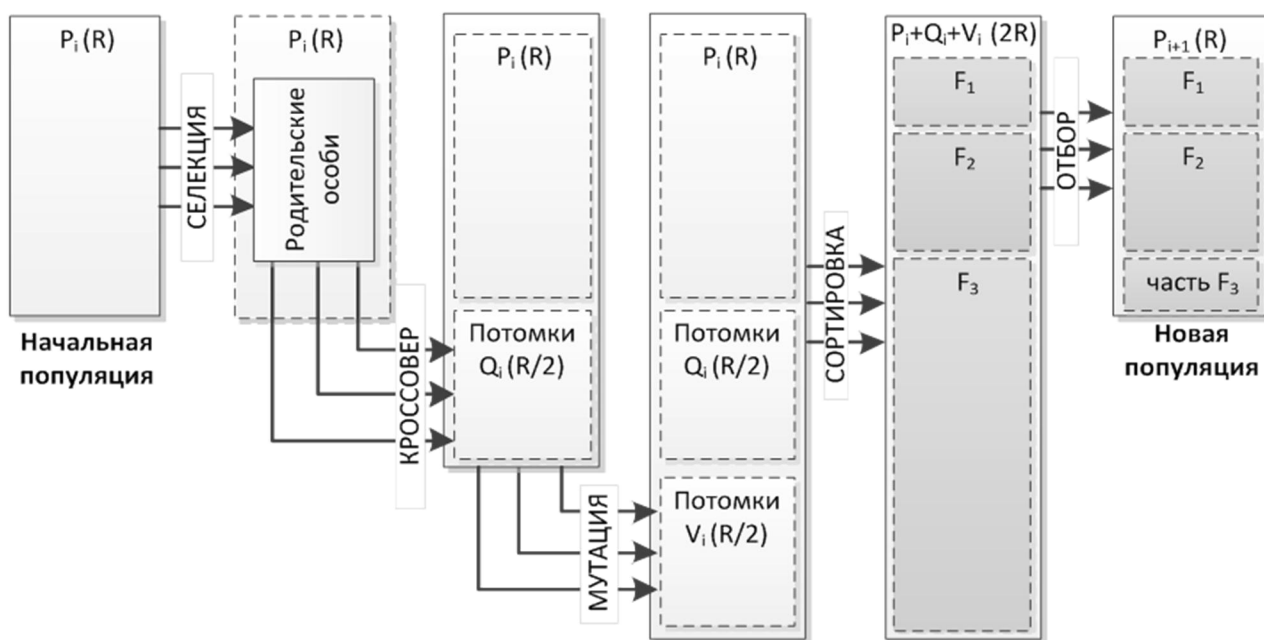


Рисунок 4.7. Блок схема используемого ГА

Критерием остановки алгоритма служит неизменность лучших особей в течение 50 поколений либо достижение критического размера числа поколений (500). Высокая доля мутации особей и применяемый критерий выхода позволяет сократить вероятность обнаружения локального оптимума системы. В то же время использование NSGA-II и турнира при селекции позволяет ускорить процесс выделения глобального оптимума.

При завершении работы алгоритма среди получившихся R особей выбираются уникальные, которые являются близким множеством к границе Парето для поставленной проблемы.

4.3.2 Однокритериальная оптимизация процесса управления при задании значимости критериев

Так как показатели эффективности могут отличаться по абсолютной величине на несколько порядков и имеют различную природу, очевидно, что для проведения однокритериальной оптимизации необходимо провести их нормировку. В качестве нормы приняты надежность и экономические

параметры системы работающей без отказов и восстановления. Далее подобная система будет обозначаться «идеальной».

Для «идеальной» системы коэффициент готовности равен единице. Таким образом, стационарный коэффициент надежности системы, который определяется выражением (3.16), является нормированным показателем надежности производственной системы:

$$K_G''(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = K_G(\tau_1, \tau_2, \tau_3).$$

Величина средней прибыли системы определяется разностью средней величины дохода и затрат на обеспечение работы установки. В случае превышения величины затрат относительно величины доходов, прибыль будет отрицательной. Для нормировки величины S необходимо оценить минимальную и максимальную прибыль системы. В качестве максимума используется величина прибыли «идеальной» системы: $S_{\max} = g_+ - c_f$. Минимум прибыли выбранной системы возникает в случае ее работы со СО с одновременным проведением КТС: $S_{\min} = -(c_f + c_{pf} + c_c)$.

В результате нормированная величина средней прибыли системы в единицу календарного времени определяется выражением:

$$S'' = \frac{S(\tau_1, \tau_2, \tau_3) + c_f + c_{pf} + c_c}{g_+ + c_{pf} + c_c}, \quad (4.4)$$

где $S(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$ определяется выражением (3.17); экономические параметры системы c_{am} , c_{im} , c_f , c_c определяются как сумма соответствующих параметров компонентов.

Затраты в системе в единицу исправного функционирования являются неограниченной сверху положительной функцией, поэтому в качестве показателя эффективности будет использоваться обратная ей величина $1/C$. Обратная величина средних затрат в единицу времени исправного

функционирования «идеальной» системы определяется затратами на обеспечение работы установки: $C_{\max}^H = 1/C_{\min} = 1/c_f$. В результате нормированная обратная величина средних затрат в единицу времени исправного функционирования определяется выражением:

$$C^H(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \frac{c_f}{C(\tau_1, \tau_2, \tau_3)}, \quad (4.5)$$

где $C(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$ задается формулой (3.17).

Таким образом, определены нормированные показатели эффективности работы системы K_Γ^H , S^H и C^H . Отметим, что каждый из показателей в результате нормировки находится в диапазоне $[0;1]$.

Ввиду наличия нескольких критериев, для проведения автоматической оптимизации необходимо выделить общий критерий эффективности системы. Это организовано за счет введения весов для каждого критерия: w_k , w_s , w_c . Веса критериев определяют значимость соответствующего критерия по отношению к остальным. Веса критериев задаются ЛПР в зависимости от требуемых результатов оптимизации. С учетом нормировки и введения уровня значимости критериев целевая функция (4.3) принимает вид:

$$J(\bar{\tau}) = \sqrt{\frac{w_k K_\Gamma^H(\bar{\tau})^2 + w_s S^H(\bar{\tau})^2 + w_c C^H(\bar{\tau})^2}{w_k + w_s + w_c}}. \quad (4.6)$$

Задача оптимизации (4.6) является задачей скалярной оптимизации функции N переменных:

$$J(\bar{\tau}) \rightarrow \max_{\bar{\tau} \in T}. \quad (4.7)$$

Решение данной задачи выбирается из множества решений для трехкритериальной целевой функции (4.3), полученного в результате использования ГА.

4.4 Выводы

1. Разработана и описана структура АСПР. Концепция построения АСПР базируется на иерархическом принципе.
2. Разработано два модуля системы поддержки принятия решений: модуль СППР по выбору закона распределения СВ, модуль СППР по выбору оптимального процесса управления.
3. Поставлена задача многокритериальной оптимизации. Выбран ГА для проведения многокритериальной оптимизации процесса управления периодичностью КТС ПС со СО.
4. Для проведения автоматической оптимизации использован метод весовых коэффициентов, которые задаются ЛПР для каждого критерия. На основании этих коэффициентов задача многокритериальной оптимизации сводится к скалярной оптимизации многопараметрической функции.

РАЗДЕЛ 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЯ БЛОКОВ УСТАНОВКИ ПАЙКИ ВОЛНОЙ ПРИПОЯ «SW 330-SF» ESSEMTEC

В параграфе 5.1 проводится многокритериальная оптимизация периодичности поблочного КТС установки пайки волной припоя Essemtec WS330-SF. Приводятся результаты оптимизации в виде границы Парето.

В параграфе 5.2 проводится скалярная оптимизация периодичности поблочного КТС установки пайки волной припоя Essemtec WS330-SF на базе полученной границы Парето с учетом различных значений весовых коэффициентов для критериев оптимизации.

Разработанная АСПР может быть использована при решении задач оптимизации процесса ТО многокомпонентной ПС произвольной структуры с независимо функционирующими компонентами.

5.1 Многокритериальная оптимизация периодичности контроля

Рассмотрим возможности АСПР при принятии решения при оптимизации периодичности проведения контроля плотности флюса, качества припоя и температурных параметров системы на установке пайки волной припоя Essemtec WS330-SF. Оптимизация трех параметров периодичности каждого контроля проводится с точки зрения влияния на эффективность системы в целом. На действующей ПС контроль плотности флюса не проводится, вместо этого проводится ежедневная замена использованного флюса. Качество припоя проверяется нерегулярно, в среднем раз в 8 месяцев. Температурные параметры регулируются без проведения КТС по факту наличия дефектов пайки. Все это не способствует повышению надежности ПС и приводит к дополнительным экономическим затратам.

В этих условиях АСПР позволяет автоматизировать процесс принятия решения, а сами решения принимаются на основе количественных оценок технических и экономических показателей функционирования ПС.

Для решения проблемной ситуации «Оптимизация периодичности покомпонентного контроля», в качестве исходных статистических данных использовались параметры СВ, определенные блоком СППР для выбора закона распределения на основе данных пассивного производственного эксперимента и полученные в результате экспертной оценки для блока предварительного нагрева. Данные по законам распределения СВ сведены в таблице 5.1.

На установке пайки волной припоя пайка изделий проводится в одну смену в течение 3 часов ежедневно.

Для каждого контроля определены: минимальное время периодичности проведения контроля τ_{min} , минимальный шаг по времени $\Delta\tau_{min}$, который может обеспечить исполнитель. Максимальная длительность контроля должна не менее чем в полтора раза превосходить среднее время наработки на отказ компонента. Исходя из этих данных, определена длина кода для каждой из хромосом и для генома, однозначно описывающего выбранную тактику проведения покомпонентного контроля. Полученные значения приведены в таблице 5.2.

Для определения экономических критериев эффективности системы использовались экономические параметры, приведенные в таблице 5.3.

Напомним, что g_+ — удельный доход, получаемый за единицу времени пребывания системы в работоспособном состоянии; c_f — удельные затраты на единицу времени функционирования системы; c_{im} — удельные затраты на единицу времени проведения минимального ТО (минимальные затраты при проведении ТО связанные с устранением причин выхода системы в предотказное состояние); c_{am} — удельные дополнительные затраты на проведение ТО; c_c — удельные затраты на единицу времени проведения контроля работоспособности системы; c_{pf} — удельные затраты на единицу времени работы со СО по причине выпуска брака.

Таблица 5.1. Статистические параметры системы

Контроль	ПМ модель	Случайная величина	Закон распре- деления СВ	МО, ед.вр.	СКО, ед.вр.	Единица времени
Контроль плотности флюса	Периодический контроль постепенных скрытых отказов с отключением оборудования	Время выхода в предотказное состояние	Гамма	74,48	26,33	минута
		Время нахождения в предотказном состоянии	Гамма	42,87	19,13	
		Время проведения контроля	~	5	~	
		Время проведения ТО	~	5	~	
Контроль темп. парам-ов	Периодический контроль внезапных скрытых отказов без отключения	Время наработки на скрытый отказ	Усеченное слева нормальное	65	15	день
		Время проведения контроля	Постоянное	20	~	минута
		Время проведения ТО	~	2	~	день
Контроль качества припоя	Периодический контроль постепенных скрытых отказов без отключения оборудования	Время выхода в предотказное состояние	Экспонен- циальное	96,2	~	день
		Время нахождения в предотказном состоянии	Экспонен- циальное	16	~	
		Время проведения контроля	Постоянное	4	~	
		Время проведения ТО	~	3	~	

Таблица 5.2. Диапазон изменения периодичности контроля

Контроль	τ_{min}	$\Delta\tau_{min}$	Среднее время наработки на СО компонента	Длина хромосомы	Длина генома
плотности флюса	1 мин	1 мин	117,35 мин	8	23
температурных параметров установки	0	1 день	65 дней	7	
качества припоя	0	1 день	112,2 дня	8	

Таблица 5.3. Экономические параметры системы

Компонент	g_+ , у.е./ день	c_f , у.е./ день	c_{im} , у.е./ день	c_{am} , у.е./ день	c_c , у.е./ день	c_{pf} , у.е./ день
Контроль флюса	~	22	36	10	50	~
Контроль температурных параметров установки	~	10	80	~	30	~
Контроль качества припоя	~	77	10	25	45	~
Установка пайки волной припоя	250	-	-	-	-	90

Для рассматриваемого случая в рамках поставленных ограничений возможно ~ 8.3 млн (2^{23}) различных решений относительно периодичности проведения контроля. Расчет трех критериев эффективности системы для одной тактики контроля занимает в среднем 0,21 секунды на ПК (2,66 ГГц, 4Гб ОЗУ). Для сравнения полный расчет области близкой к границе Парето с использованием ГА, описанного в параграфе 4.3.1 (5 популяций по 100 особей), занимает 90 секунд на идентичном ПК.

Используя параметры, сведенные в таблицах 5.1 — 5.3., проводится поиск границы Парето для трех критериев системы. При расчете коэффициент готовности системы берется с точностью до третьего знака, а экономические

параметры с точностью до одной сотой. В результате использования ГА получено 32 различных решения. Данные решения приведены на рисунке 5.1.

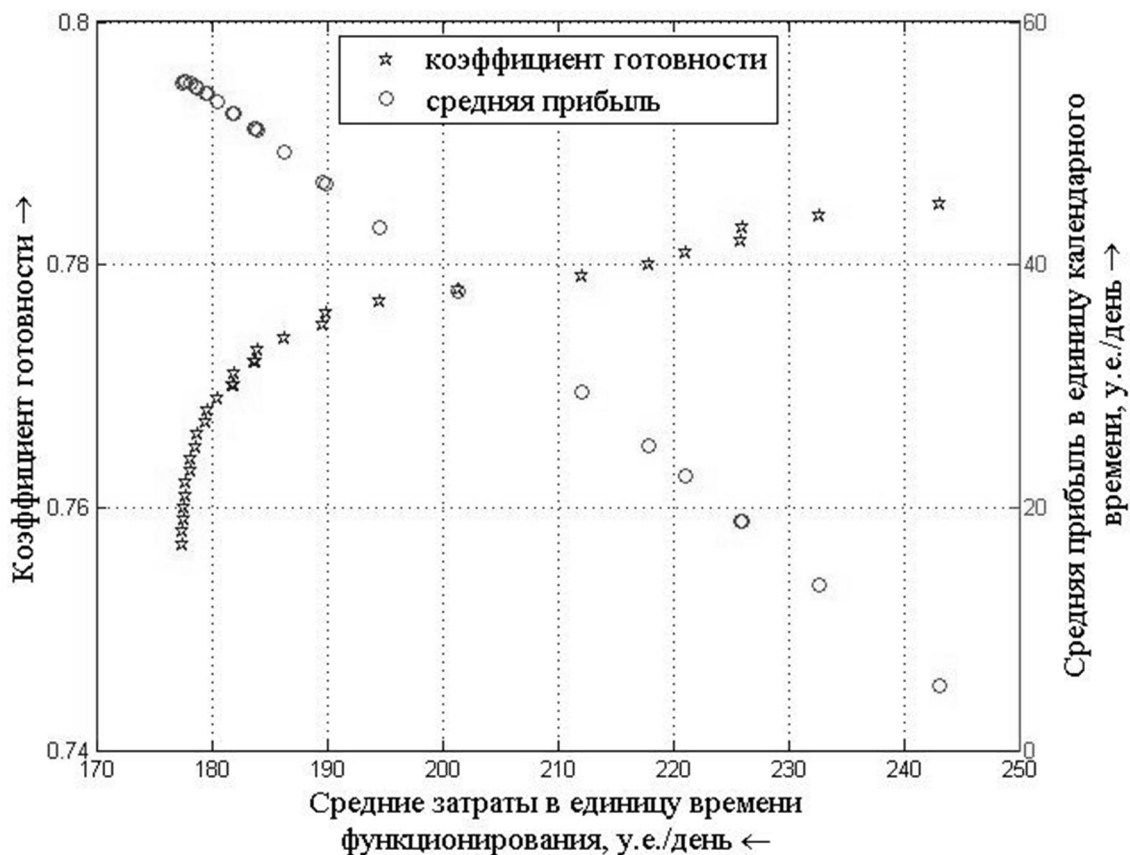


Рисунок 5.1. Оптимальные решения задачи «оптимизации периодичности контроля», полученные в результате использования генетического алгоритма

Значения целевой функции на границе Парето достигаются при величинах входных параметров (периодичность контроля) приведенных на графике 5.2. Из графика видно, что оптимальная периодичность контроля флюсователя изменяется в пределах 46 — 50 минут. Контроль температурных параметров ввиду высокой скорости проведения и невысокой стоимости следует проводить непрерывно, либо ежедневно. Оптимальная периодичность проведения контроля качества припоя изменяется в диапазоне от непрерывного проведения до 13 дней перерыва между контролем.

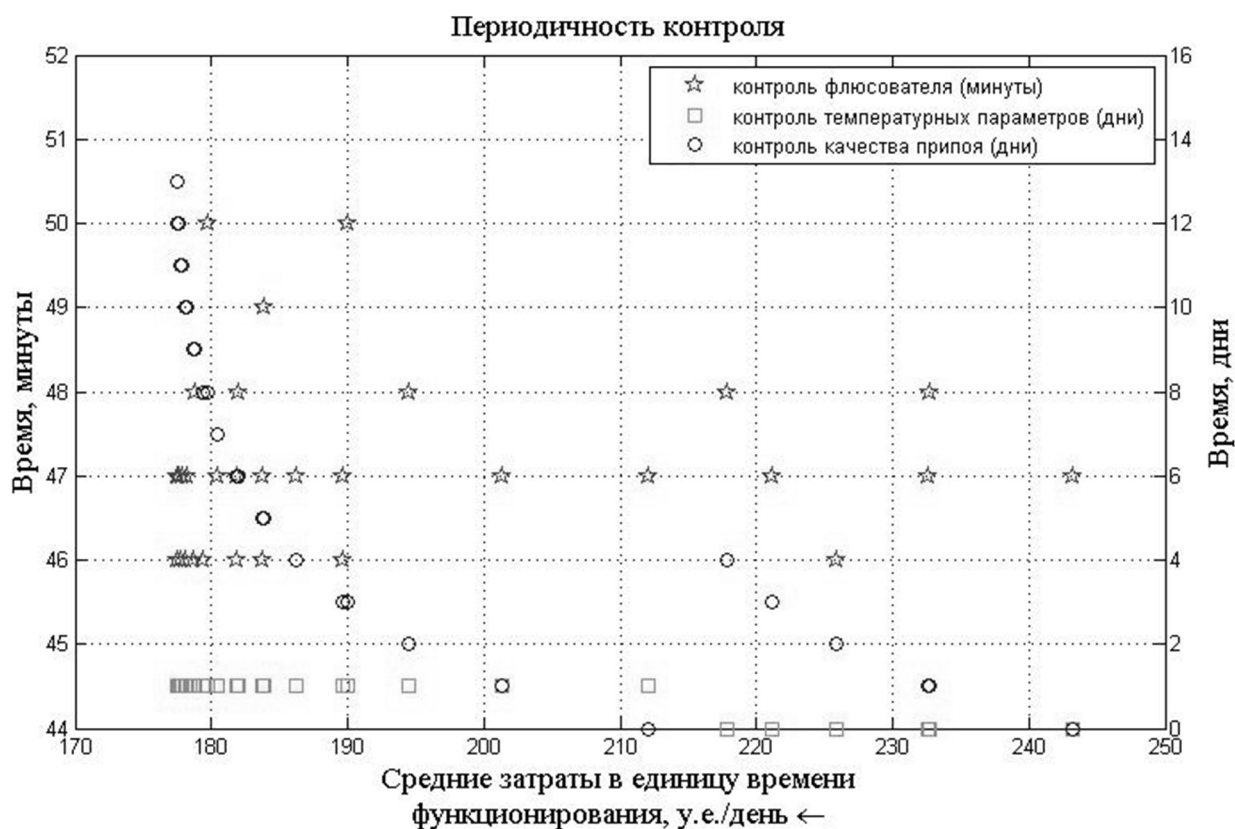


Рисунок 5.2. Периодичность покомпонентного контроля, при выборе которого реализуются оптимальные режимы работы системы

Для проверки решения, методом перебора были найдены все значения критериев оптимизации для рассматриваемой системы. Сравнение полного множества значений целевой функции с найденной границей Парето приводится на рисунках 5.3. На данных рисунках приводится три проекции трехмерного множества значений критериев оптимизации.

Сравнение данных, полученных прямым перебором и полученных с использованием ГА, показывает, что найденные ГА решения находятся на границе Парето, более того, полученные решения являются полной границей Парето.

Проекция границы Парето, приведенной на рисунке 5.1, позволяет ЛПР принимать решение о выборе оптимальной тактики проведения покомпонентного контроля системы.

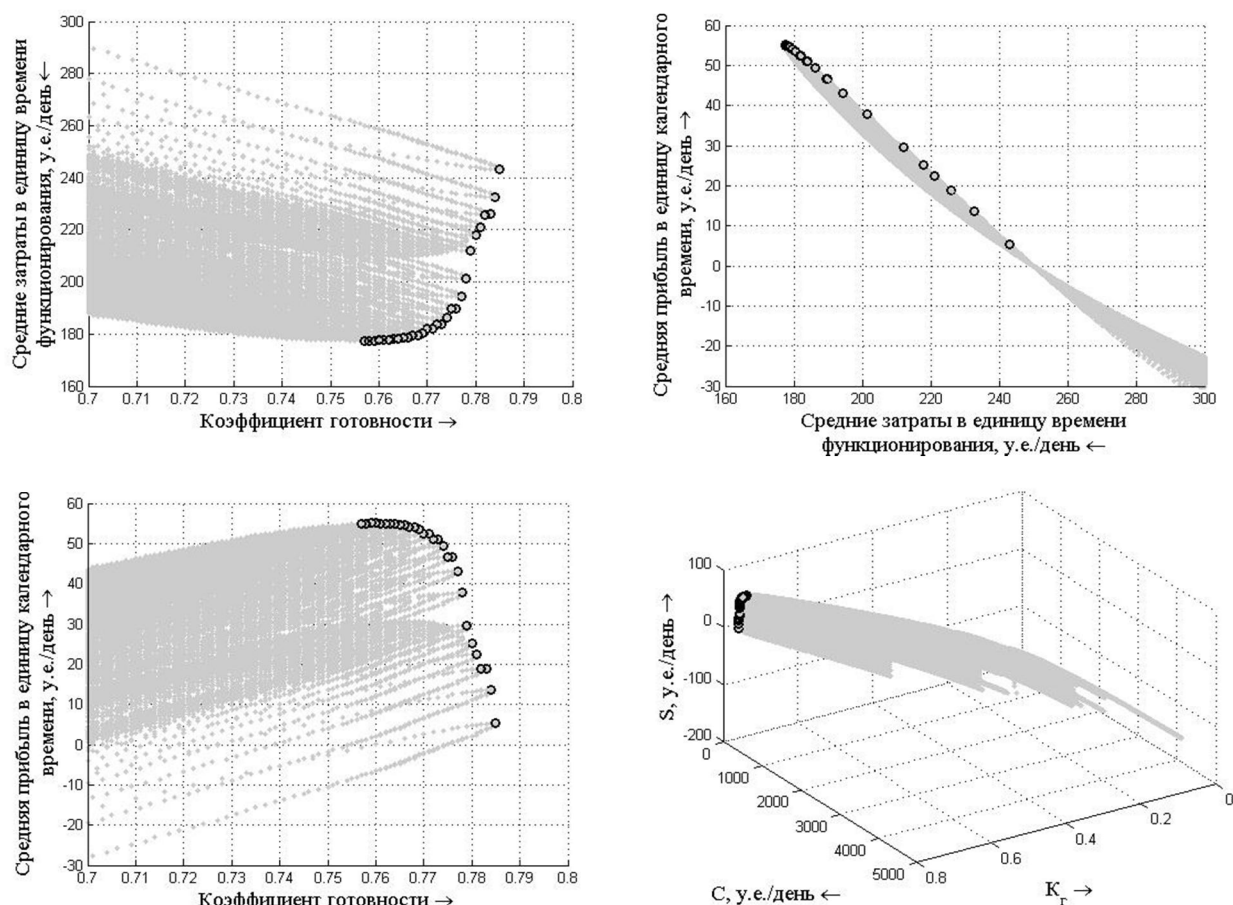


Рисунок 5.3. Проекция трехмерного множества значений критериев оптимизации полученных полным перебором (серый) и полученных с использованием генетического алгоритма (черный)

5.2 Скалярная оптимизация периодичности контроля

В случае если ЛПР задал веса критериев (раздел 4.3.2), проводится автоматический выбор оптимальной стратегии. В таблице 5.4 приводятся оптимальная периодичность проведения покомпонентного контроля, полученная при различных весах нормированных критериев для данной задачи.

Видим, что изменение цели оптимизации (различные веса критериев) ведет к выбору различных тактик проведения покомпонентного КТС установки пайки волной припоя.

Таблица 5.4. Оптимальные тактики покомпонентного контроля установки пайки волной припоя для заданных весов критериев оптимизации

Веса критериев			Периодичность контроля компонентов			Значения критериев		
w_k	w_c	w_s	τ_1 , мин	τ_2 , дней	τ_3 , дней	K_T	C , у.е./день	S , у.е./день
1	0	0	47	0	0	0,785	243,17	5,36
0	1	0	46	1	13	0,757	177,47	54,98
0	0	1	47	1	12	0,760	177,58	55,06
1	1	1	47	1	10	0,764	178,15	54,90
1	3	2	47	1	11	0,762	177,79	55,04
3	0	2	48	1	6	0,771	181,96	52,48

5.3 Выводы

1. Проведена оптимизация периодичности покомпонентного КТС установки пайки волной припоя Essemtec WS330-SF с учетом наличия внезапных и постепенных СО.

2. Найдена граница Парето при многокритериальной оптимизации. Проведен поиск области значений критериев методом перебора. Показано, что использование ГА позволяет найти область близкую к области Парето в области значений критериев за приемлемое время счета. Для рассматриваемого примера, используя ГА, удалось найти точную границу Парето. Определены оптимальные тактики проведения покомпонентного КТС с учетом различных весов критериев эффективности работы установки.

Выполненная задача подтверждают применимость разработанной АСПР УПП ТО для оптимизации периодичности КТС многокомпонентных ПС со СО.

ОБЩИЕ ВЫВОодЫ ПО РАБОТЕ

В результате исследований в данной диссертационной работе установлено, что возможно повышение отказоустойчивости и экономической эффективности многокомпонентной ПС за счет оптимизации периодичности ТК наличия СО. Реализация предложенных моделей, критериев и алгоритмов АСПР позволяет повысить эффективность управления ТО многокомпонентной ПС произвольной структуры с покомпонентным КТС в процессе их эксплуатации за счет автоматизации процесса выбора оптимальной периодичности проведения контроля.

Основные научные результаты и выводы состоят в следующем:

1. Формализована задача проведения КТС ПС со СО.
2. Построены ПМ модели искусственного и естественного КТС однокомпонентных ПС методом взятия пробы с учетом наличия внезапных и постепенных СО. Проведена их верификация с помощью имитационного моделирования.
3. Расширен метод моделирования многокомпонентных ПС с учетом КТС, основанный на использовании теории ПМП с общим ФПС и метода суперпозиции ПМП. Это позволяет создавать модели многокомпонентных ПС для более широкого класса стратегий КТС компонентов системы.
4. В явном виде получены аналитические выражения для стационарных надежностных и экономических параметров многокомпонентной ПС с учетом проведения КТС. Полученные аналитические выражения позволяют определить функциональную зависимость параметров эффективности многокомпонентной ПС от входных данных.
5. Предложен метод решения задачи оптимизации периодичности проведения покомпонентного КТС многокомпонентной ПС. Метод позволяет провести как векторную, так и скалярную оптимизацию периодичности КТС.

6. По данным пассивного производственного эксперимента установлены теоретические законы распределения некоторых характеристик установки пайки волной припоя Essemtec «WS330-SF».

7. Построена структура АСПР УПП ТО. Разработано математическое и программное обеспечение АСПР, в основу которого легли результаты, полученные в рамках данной работы.

8. В ООО «Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры» внедрены на производство методика выбора оптимальной периодичности КТС и программные модули разработанной АСПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обжерин Ю.Е. Модель многокомпонентной системы со скрытыми отказами и покомпонентным контролем / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Оптимизация производственных процессов: Сб. научн. тр. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. — Вып.13. — С.95 — 101.
2. Обжерин Ю.Е. Полумарковская модель многокомпонентной системы на основе характеристик отдельных компонентов / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Неразрушающий контроль и диагностика: Сб. научн. тр. — Минск, 2012. — Вып.4. — С. 3 — 13.
3. Obzherin Yu., Nikishenko A. Semi-Markovian Model of Restorable System with Latent Failures with Condition Monitoring of Samples Method. European International Journal of Science and Technology, Vol. 2 No. 6, July 2013, pp. 143 — 152.
4. Обжерин Ю.Е. Оптимизация процесса контроля плотности флюса в блоке пенного флюсования / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Сборник научных трудов НГУ. Д.: Национальный горный университет — Днепропетровск, 2013. — Вып.41. — С. 72 — 78.
5. Никищенко А.Н. Полумарковская модель покомпонентного контроля скрытых отказов в двухкомпонентной системе / А.Н. Никищенко // Оптимизация производственных процессов: Сб. научн. тр. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — Вып.14. — С. 40 — 45.
6. Обжерин Ю.Е. Эффективность многокомпонентной системы со скрытыми отказами и покомпонентным контролем / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Прикладные задачи математики и механики: матер. 19-ой междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 12 — 16 сент. 2011 г. — Севастополь, 2005. — С. 141 — 144.
7. Обжерин Ю.Е. Определение стационарных характеристик надежности двухкомпонентной системы со скрытыми отказами и покомпонентным контролем / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Стратегия качества в

промышленности и образовании: матер. 7-ой междунар. науч.-техн. конф., Варна, Болгария, 3 — 10 июня 2011 г. — Варна, 2011. — С. 196 — 199.

8. Обжерин Ю.Е. Полумарковская модель многокомпонентной технической системы с покомпонентным контролем / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Автоматика—2011: матер. 18-ой междунар. конф. по автоматическому управлению, Львов, 28 — 30 сент. 2011 г. — Львов, 2011. — С. 171 — 172.

9. Никищенко А.Н. Об одном интеграле, встречающемся в теории надежности / А.Н. Никищенко // Прикладные задачи математики и механики: матер. 20-ой междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 10 — 14 сент. 2012 г. — Севастополь, 2012. — С. 95 — 100.

10. Обжерин Ю.Е. Использование метода суперпозиции для определения стационарных характеристик надежности производственной системы со скрытыми отказами / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Стратегия качества в промышленности и образовании: матер. 8-ой междунар. науч.-техн. конф., Варна, Болгария, 8 — 15 июня 2012 г. — Варна, 2012. — С. 465 — 467.

11. Никищенко А.Н. Полумарковская модель многокомпонентной производственной системы со скрытыми отказами и покомпонентным контролем / А.Н. Никищенко // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 3 — 7 сент. 2012 г. — Севастополь, 2012. — С. 101 — 102.

12. Обжерин Ю.Е. Полумарковская модель многокомпонентной производственной системы со скрытыми отказами и покомпонентным контролем / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 3 — 7 сент. 2012 г. — Севастополь, 2012. — С. 267 — 268.

13. Обжерин Ю.Е. Полумарковская модель процесса контроля исходного сырья, промежуточных шихт и конечной продукции / Ю.Е. Обжерин, А.Н. Никищенко // Системный анализ и синтез процессов в металлургии и

машиностроении: матер. междунар. науч.-техн. конф. ИТММ-2013, Днепропетровск, 26 — 28 марта 2013 г. — Днепропетровск, 2013. — С. 9 — 11.

14. Никищенко А.Н. Моделирование процесса контроля плотности флюса в установке пайки волной припоя / А.Н. Никищенко // Автоматика—2013: матер. 18-ой междунар. конф. по автоматическому управлению, Николаев, 25 — 27 сент. 2013 г. — Николаев, 2013. — С. 228 — 229.

15. Никищенко А.Н. Автоматизированный процесс контроля установки пайки волной припоя / А.Н. Никищенко // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: матер. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 9 — 13 сент. 2013 г. — Севастополь, 2013. — С. 159 — 160.

16. Никищенко А.Н. Сравнение различных стратегий проведения контроля плотности флюса в системе пайки волной припоя / А.Н. Никищенко // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2013: матер. 9-й междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 22 — 26 апреля 2013 г. — Севастополь, 2013. — С. 259.

17. Никищенко А.Н. Моделирование работы блока флюсования в установке пайки волной припоя / А.Н. Никищенко // Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке: матер. 17-го междунар. молодежного форума., Харьков, 22 — 24 апреля 2013 г. — Харьков, 2013. — С. 143 — 144.

18. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т./ Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. — М.: Машиностроение, 1986. Т.1: Методология. Организация. Терминология/ Под ред. А.И. Рембезы. — 224 с.

19. WS 330-SF. Wave soldering system. Installation and User Manual — Essemtec, version 2.2., 2007. 53 p.

20. Установка пайки Ersa ETS-250. Руководство оператора. Ersa Loettechnik GmbH. Перевод и переработка, ред.1 ЗАО Предприятие «ОСТЕК». 2001. — 53 с.

21. EOQC Glossary. — Bern: EOQC. 1988. — 24 p.

22. Mobley K. R. Root Cause Failure Analysis/ K. R. Mobley. — USA: Reed Elsevier, 1999. — p. 306.
23. Shikari, B., Sadiwala, C.M., Dwivedi, R.K., Automation in condition based maintenance using vibration analysis, Department of Mechanical Engineering, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal, India 2004.
24. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов — М: Логос, 2001. — 208 с.
25. Копп В.Я Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием/ В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. — 284 с.
26. Максимова Т.М. Фазовое укрупнение многофазных систем с промежуточными накопителями/ Т.М. Максимова, Ю.Е. Обжерин, В.Я. Копп // Кибернетика и системный анализ. — 1999. — №5. — С. 87-97.
27. Анисимов В.В. Асимптотические методы анализа стохастических систем/ В.В. Анисимов. — Тбилиси: Изд-во «Мецниереба», 1984. — 180 с.
28. Барлоу Р. Математическая теория надежности/ Р. Барлоу, Ф. Прошан. — М.: Сов. радио, 1969. — 488 с.
29. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем./ Ф. Байхельт, П. Франкен: — М.: Радио и связь, 1988. — 392 с.
30. Королюк В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем/ В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. — К.: Наук. думка, 1982. — 236 с.
31. Первозванский А.А. Математические модели в управлении производством/ А.А. Первозванский. — М.: Наука, 1975. — 616 с.
32. Сильвестров Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний/ Д.С. Сильвестров. — М.: Сов. радио, 1980. — 272 с.

33. Герцбах И.Б. Модели профилактики (Теоретические основы планирования профилактических работ)/ И.Б. Герцбах. — М.: Сов. радио, 1969. — 216 с.
34. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS/ Т.Дж. Шрайбер; Пер. с англ. В.И. Горчера, И.Л. Шмуйловича; Под ред. М.А. Файнберга. — М.: Машиностроение, 1980. — 592 с.
35. Советов Б.Я. Моделирование систем/ Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. — М.: Высш. шк., 2001. — 343 с.
36. Емельянов А.А. Имитационное моделирование экономических процессов/ А.А. Емельянов, Е.А. Власова. — М.: Московский междунар. институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2002. — 92 с.
37. Потемкин В.Г. Вычисления в среде MATLAB/ В.Г. Потемкин — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. — 720 с.
38. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем/ Дж. Питерсон. — М.: Мир, 1984. — 264 с.
39. Лескин А.А. Сети Петри в моделировании и управлении/ А.А. Лескин, П.А. Мальцев, А.М. Спиридонов. — Л.: Наука, 1989. — 133 с.
40. Костевич Л.С. Теория игр. Исследование операций/ Л.С. Костевич, Л.А. Лапко. — Минск: Вышэйшая шк., 1982. — 230 с.
41. Конвей Р. В. Теория расписаний/ Р. В. Конвей, В.Л. Максвелл, Л.В. Миллер. — М.: Наука, 1975. — 300 с.
42. Mobley R. K. An introduction to predictive maintenance / R. K. Mobley. — USA: Elsevier Science, 2002. — p. 438.
43. Moubray J. Reliability-Centered Maintenance / J. Moubray. — New York, USA : Industrial Press Inc., 1997. — p. 448.
44. Beebe R. S. Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring / R. S. Beebe. — USA: Elsevier Science, 2004. — p. 181.

45. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке: Учеб. пособие для вузов. / Н.А. Северцев. — М.: Высш. шк., — 1989. — 432 с.
46. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., — 1982. — 231 с.
47. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп // Монография. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. — 548 с.
48. Копп В.Я. Полумарковская модель производственной ячейки, снабженной временным резервом/ В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, Е.Н. Машенко и др.// Вестн. СевГТУ: Сб. научн. тр. — Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1996. — Вып.2. — С.41 — 53.
49. Бойко Е.Г. Модель контроля скрытых отказов автоматизированной системы / Е.Г. Бойко //Автоматизация процессов и управление: Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 108. — С. 52–56. г.
50. Обжерин Ю.Е. Полумарковская модель календарного контроля параметрических отказов автоматизированной восстанавливаемой системы/ Е.Г. Бойко, Ю.Е. Обжерин// Вестник СевГТУ: Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып. 83. — С. 61 — 64.
51. Королук В.С. Стохастические модели систем/ В.С. Королук. — К.: Наук. думка, 1989. — 208 с.
52. Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания/ А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.М. Новиков, А.Ф. Турбин — Кишинев: Штиинца, 1991. — 276 с.
53. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики/ Б.А. Козлов, И.А. Ушаков: — М.: Сов. радио, 1975. — 472 с.

54. Черкесов Г.Н. Использование резерва времени в одноканальной системе с двумя типами отказов/ Г.Н. Черкесов// Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. — 1986. — №6. с. 73 — 78.
55. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 432 с.
56. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения/ В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. — К.: Наук. думка, 1976. — 181 с.
57. Обжерин Ю.Е. Экспериментальная проверка математической модели контроля скрытых отказов / Ю.Е. Обжерин, Е.Г. Бойко // Оптимизация производственных процессов: Сб. научн. тр. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — Вып.14. — С. 160 — 164.
58. Naylor T.H. Verification of Computer Simulation Models / T.H. Naylor, J.M. Finger // Management Sci. — 1967. — V.14 — p. 92–101.
59. Максимей И.В. Математическое моделирование больших систем / И.В. Максимей. — Минск : Вышэйш. шк., 1985 . — 119 с.
60. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем . — 2-е изд., перераб./ Н.П. Бусленко — М.: Наука, 1978. — 399 с.
61. Нейлор Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем . Пер. с англ. Под ред. А.А. Петрова/ Т. Нейлор и др. — М.: Мир, 1975. — 502 с.
62. Поляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах/ Ю.Г. Поляк. — М.: Сов. Радио, 1972. — 400 с.
63. Яковлев Е.И. Машинная имитация/ Е.И. Яковлев. — М.: Наука, 1975. — 390 с.
64. Снетков Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: Учебно-практическое пособие/ Н.Н. Снетков. — М.: Изд. центр ЕАОИ, 2008. — 228 с.

65. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. Серия "Библиотека профессионала"/ В.П. Дьяконов — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 800 с.
66. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 6.x.: программирование численных методов/ Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, М.М. Шульц — Спб.: БХВ-Петербург, 2004. — 672 с.
67. Иглин С.П. Математические расчеты на базе MATLAB/ С.П. Иглин — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 640 с.
68. Кондрашев В.Е. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов/ В.Е. Кондрашев, С.В. Королев — М.: Мир, Институт стратегической стабильности минатома РФ, 2002. — 350 с.
69. Бойко Е.Г. Анализ влияния периода контроля на надежность технической системы/ Е.Г. Бойко, Ю.Е. Обжерин, Н.В. Казакова // Оптимизация производственных процессов — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. — Выпуск 7. — С.23-27.
70. Кузнецов В.Н. Полумарковская модель восстанавливаемых систем/ В.Н. Кузнецов, А.Ф. Турбин, Г.Ж. Цатурян — К.: Ин-т математики АН УССР. 1968. — №8. — С. 56-57.
71. Бойко Е.Г. Определение оптимального периода контроля по наработке параметрических отказов автоматизированной системы //Оптимизация производств. процессов: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып.9. — с. 78 — 83.
72. Обжерин Ю.Е. Исследование влияния периодичности контроля на надежность автоматизированной технической системы/ Ю.Е. Обжерин, Е.Г. Бойко // Наукові праці Донецького національного технічного університету; серія: «Гірнично-електромеханічна». — Донецьк., 2005. — Вып.94. - с. 153 – 156..
73. Обжерин Ю.Е. Полумарковская модель контроля параметрических отказов двухкомпонентной системы/ Ю.Е. Обжерин, Е.Г. Бойко// Проблемы

математичного моделювання: Тези доповідей міждерж. Наук.-методична конф., 23 – 25 мая 2007 г. – Дніпродзержинськ: 2007. — С.221—222..

74. Олышанская И.В. Определение оптимальной производительности технологической ячейки/ Е.Г. Бойко, И.В. Олышанская // Автоматизация процессов и управление: Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2006. – Вып. 72. – с. 31 – 35.

75. Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств/ А.М. Медведев — М.: Техносфера, 2007. — 256 с.

76. Пилипенко О. Мысли о монтаже. Пайка волной припоя/ О. Пилипенко// Технологии в электронной промышленности. — 2006. №4. — С. 48 — 53.

77. Ларин В.П. Технология пайки. Методы исследования процессов пайки и паяных соединений: Учеб. пособие/ В.П. Ларин// СПбГУАП. СПб., 2002. — 42 с.

78. Дипстратен Г. Как справиться с примесями при пайке волной припоя / Г. Дипстратен // SMT Эксперт: Электрон. журнал. — 2011. — Вып. 9 — С. 80 — 90.

79. Вентцель Е.С. Прикладные задачи теории вероятностей/ Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. — М.: Радио и связь, 1983. — 416 с.

80. Денисов В.И. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Методические рекомендации. Часть I. Критерии типа χ^2 / В.И. Денисов, Б.Ю. Лемешко, С.Н. Постовалов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. — 126 с.

81. Лемешко Б.Ю. Прикладные аспекты использования критериев согласия в случае проверки сложных гипотез/ Б.Ю. Лемешко, С.Н. Постовалов// Надежность и контроль качества. — 1997. — № 11. — С. 3 — 17.

82. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей/ Б.В. Гнеденко — 8-е изд., испр. и доп. — М.: Едиториал УРСС, 2005.— 448 с.

83. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и её инженерные приложения/ Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров — 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000. — 480 с.
84. Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие/ А.В. Лотов, И.И. Пospelова. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 197 с.
85. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие/ Т.В. Панченко; под ред. Ю.Ю. Тарасевича. — Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. — 87 с.
86. Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning/ D. Goldberg. — Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
87. Фролов В.В. Особенности реализации генетического алгоритма для проектирования технологических систем механической обработки/ В.В. Фролов// Восточноевропейский журнал передовых технологий №3/9 (57). — Харьков: Технический центр, 2012. — С. 60 — 65.
88. Алиев Р.А. Производственные системы с искусственным интеллектом/ Р.А. Алиев, Н.М. Абдикеев, М.М. Шахназатов — М.: Радио и связь, 1990. — 264 с.
89. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: пер. с польск. И.Д. Рудинского. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
90. Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T. A fast and Elitist multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002; 6(2): 182 — 197.
91. Deb, Kalyanmoy. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. John Wiley & Sons, 2001.
92. Daryl L. Santos, Arun Ramasubramanian, and Laurence A. Harvilchuck, On the use of 3 thermocouples to verify a printed circuit board profile during the reflow operation, Pan Pacific Symposium Conference, 2009.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Решение системы интегральных уравнений (2.2)

Введем оператор $[A_\xi \varphi](x) = \int_x^\infty \xi(y-x)\varphi(y)dy$, тогда система интегральных

уравнений (2.2) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 = \rho(111) = \rho(220) = \rho(202), \\ \rho(212x) = \rho_0 A_r f + A_r \rho(211x), \\ \rho(211x) = A_v \rho(212x), \\ \rho(101x) = \rho_0 \bar{A}_r f + A_r \rho(211x), \\ \rho(102x) = \bar{A}_v \rho(212x), \\ \rho(201) = \int_0^\infty \rho(102y)dy, \\ 3\rho_0 + 3\int_0^\infty \rho(102x)dx + \int_0^\infty \rho(212x)dx + \\ + \int_0^\infty \rho(211x)dx + 2\int_0^\infty \rho(101x)dx = 1. \end{array} \right. \quad (\text{A.2})$$

Последнее уравнение в системе (A.2) – условие нормировки.

Подставим третье уравнение системы (A.2) во второе, тогда второе уравнение можно записать в виде:

$$\rho(212x) = \rho_0 A_r f + A_r \cdot A_v \rho(212x). \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Обозначим } A_r \cdot A_v = A_\pi, \text{ где } \pi = r * v. \quad (\text{A.4})$$

С учетом (A.4) выражение (A.3) примет вид:

$$\rho(212x) = \rho_0 A_r f + A_\pi \rho(212x),$$

тогда

$$\rho(212x) = \rho_0 (I - A_\pi)^{-1} A_r f, \quad (\text{A.5})$$

$$\rho(212x) = \rho_0 \int_x^\infty h^{(0)}(t-x) f(t) dt,$$

где $h^{(0)}(t) = \sum_{n=1}^\infty r * (v * r)^{*(n-1)}(t)$ – плотность функции 0-восстановления.

Подставим (A.5) в третье уравнение системы (A.2):

$$\begin{aligned}\rho(211x) &= \rho_0 A_v (I - A_\pi)^{-1} A_r f, \\ \rho(211x) &= \rho_0 \int_x^\infty h^{(1)}(t-x) f(t) dt,\end{aligned}\tag{A.6}$$

где $h^{(1)}(t) = \sum_{n=1}^\infty (r * v)^{*(n)}(t)$ — плотность функции 1-восстановления.

При подстановке (A.5) в четвертое уравнения системы (A.2) получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}\rho(101x) &= \rho_0 \bar{A}_r f + A_r A_v (I - A_\pi)^{-1} A_r f = \rho_0 \int_0^\infty r(t+x) f(t) dt + \\ &+ \rho_0 \int_0^\infty r(x+y) dy \int_x^\infty h^{(1)}(t-x) f(t) dt = \rho_0 \int_0^\infty f(t) v^{(1)}(t, x) dt,\end{aligned}\tag{A.7}$$

где $v^{(1)}(t, x) = r(t+x) + \int_0^t r(x+t-y) h^{(1)}(y) dy$ — плотность остаточного времени ожидания контроля.

С учетом (A.6) пятое уравнение системы (A.2) примет вид:

$$\begin{aligned}\rho(102x) &= \rho_0 \bar{A}_v (I - A_\pi)^{-1} A_r f = \rho_0 \int_0^\infty v(y+x) dy \int_y^\infty h^{(0)}(t-y) f(t) dt = \\ &= \rho_0 \int_0^\infty f(t) dt \int_0^t v(t+x-y) h^{(0)}(y) dy = \rho_0 \int_0^\infty f(t) v^{(0)}(t, x) dt,\end{aligned}\tag{A.8}$$

где $v^{(0)}(t, x) = \int_0^t v(x+t-y) h^{(0)}(y) dy$ — плотность распределения остаточного времени контроля.

С учетом (A.8) шестое уравнение системы (A.2) примет вид:

$$\begin{aligned}\rho(201) &= \rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f(t) v^{(0)}(t, x) dt = \int_0^\infty f(t) dt \int_0^\infty v^{(0)}(t, x) dx = \\ &= \int_0^\infty f(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt = \int_0^\infty f(t) [H^{(0)}(t) - H^{(1)}(t)] dt\end{aligned}\tag{A.9}$$

Левую часть условия нормировки с учетом выражений (A.5) — (A.9)

можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
& 3\rho_0 + 3\rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f(t) \nu^{(0)}(t, x) dt + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_x^\infty h^{(0)}(t-x) f(t) dt + \rho_0 \int_0^\infty dx \int_x^\infty h^{(1)}(t-x) f(t) dt \\
& + 2\rho_0 \int_0^\infty dx \int_0^\infty f(t) \nu^{(1)}(t, x) dt = 3\rho_0 + 3\rho_0 \int_0^\infty f(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt + \rho_0 \int_0^\infty H^{(0)}(t) f(t) dt + \\
& + \rho_0 \int_0^\infty H^{(1)}(t) f(t) dt + 2\rho_0 \int_0^\infty f(t) \bar{V}^{(1)}(t, 0) dt = 3\rho_0 + \rho_0 \int_0^\infty [H^{(0)}(t) + H^{(1)}(t)] f(t) dt + \\
& + \rho_0 \int_0^\infty f(t) \bar{V}^{(0)}(t, 0) dt + 2\rho_0 \int_0^\infty f(t) [\bar{V}^{(1)}(t, 0) + \bar{V}^{(0)}(t, 0)] dt = 3\rho_0 + 2\rho_0 + \\
& + \rho_0 \int_0^\infty [H^{(0)}(t) + H^{(1)}(t) + H^{(0)}(t) - H^{(1)}(t)] f(t) dt = \rho_0 \left[5 + 2 \int_0^\infty H^{(0)}(t) f(t) dt \right].
\end{aligned}$$

$$\text{Таким образом } \rho_0 = \left[5 + 2 \int_0^\infty H^{(0)}(t) f(t) dt \right]^{-1}. \quad (\text{A.10})$$

В результате, с учетом выражений (A.5) — (A.10) решение системы (A.2)

можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{aligned}
& \rho(111) = \rho(202) = \rho(220) = \rho_0, \\
& \rho(212x) = \rho_0 \int_x^\infty h^{(0)}(t-x) f(t) dt, \\
& \rho(211x) = \rho_0 \int_x^\infty h^{(1)}(t-x) f(t) dt, \\
& \rho(102x) = \rho_0 \int_0^\infty f(t) \nu^{(0)}(t, x) dt, \\
& \rho(101x) = \rho_0 \int_0^\infty f(t) \nu^{(1)}(t, x) dt, \\
& \rho(201) = \rho_0 \int_0^\infty [H^{(0)}(t) - H^{(1)}(t)] f(t) dt, \\
& \rho_0 = \left[5 + 2 \int_0^\infty H^{(0)}(t) f(t) dt \right]^{-1}.
\end{aligned} \right.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Определение скорости конвейера и температурных параметров установки по температурному профилю

В качестве температурного зонда в рамках работы используется термопрофилометр марки v-M.O.L.E. [92]. Термопрофилометр позволяет одновременно записывать температурные профили с трех датчиков. При проведении эксперимента три термопары располагаются в следующих позициях: на верхней стороне платы, на нижней стороне платы, на термокритическом элементе. После установки датчиков на плату, она закрепляется в рамке и пропускается по конвейеру в установке пайки волной. Отметим, что датчики, расположенные на плате не препятствуют проведению процесса пайки. Включение записи термопрофиля синхронизируется с моментом подачи платы на конвейер. Типичная осциллограмма изменения температуры в различных точках платы приведена на рисунке Б.1.

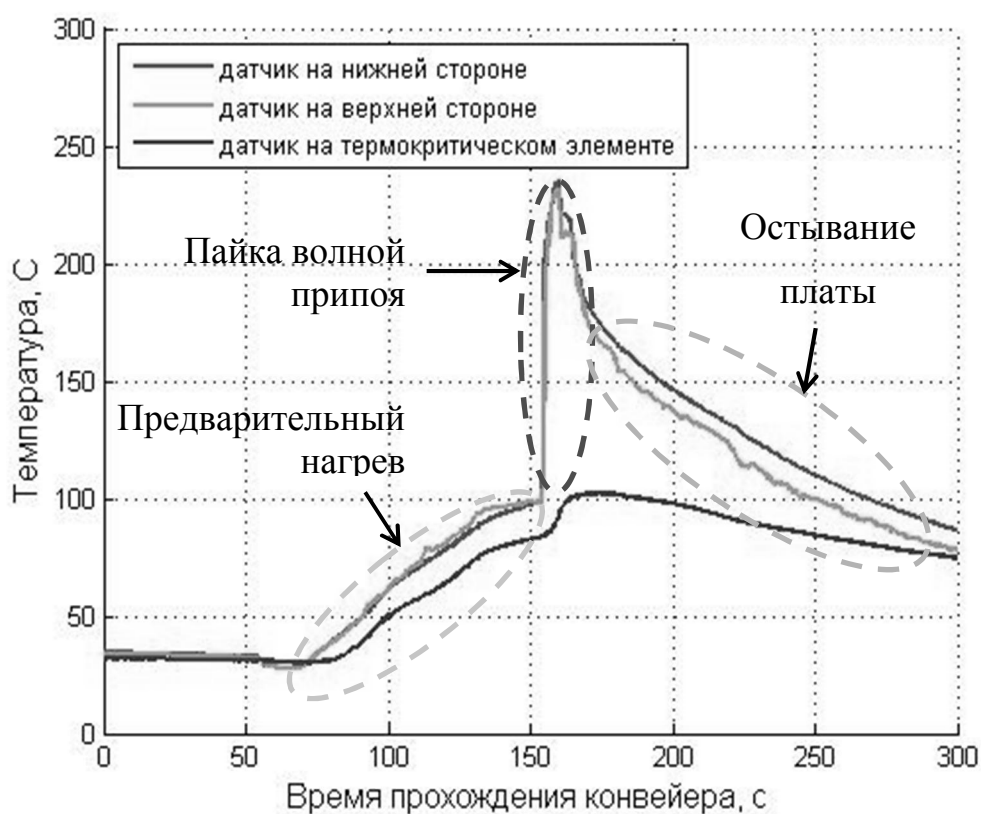


Рисунок Б.1. Экспериментальная осциллограмма температурного профиля.

На данном рисунке выделены следующие области: область предварительного нагрева платы, область пайки волной припоя, область остывания платы.

Для привязки полученной временной зависимости температуры к положению на конвейере необходимо определить скорость конвейера.

Рассмотрим более подробно зону пайки волной припоя (рисунок Б.2). Максимальное значение температуры на осциллограмме соответствует температуре припоя в зоне пайки, т.к. нижний датчик окунается в волну припоя. После того, как датчик проходит волну припоя, на осциллограмме наблюдается снижение температуры в виде скачка. Скачок связан с тем, что температура воздуха возле волны припоя ниже температуры припоя.

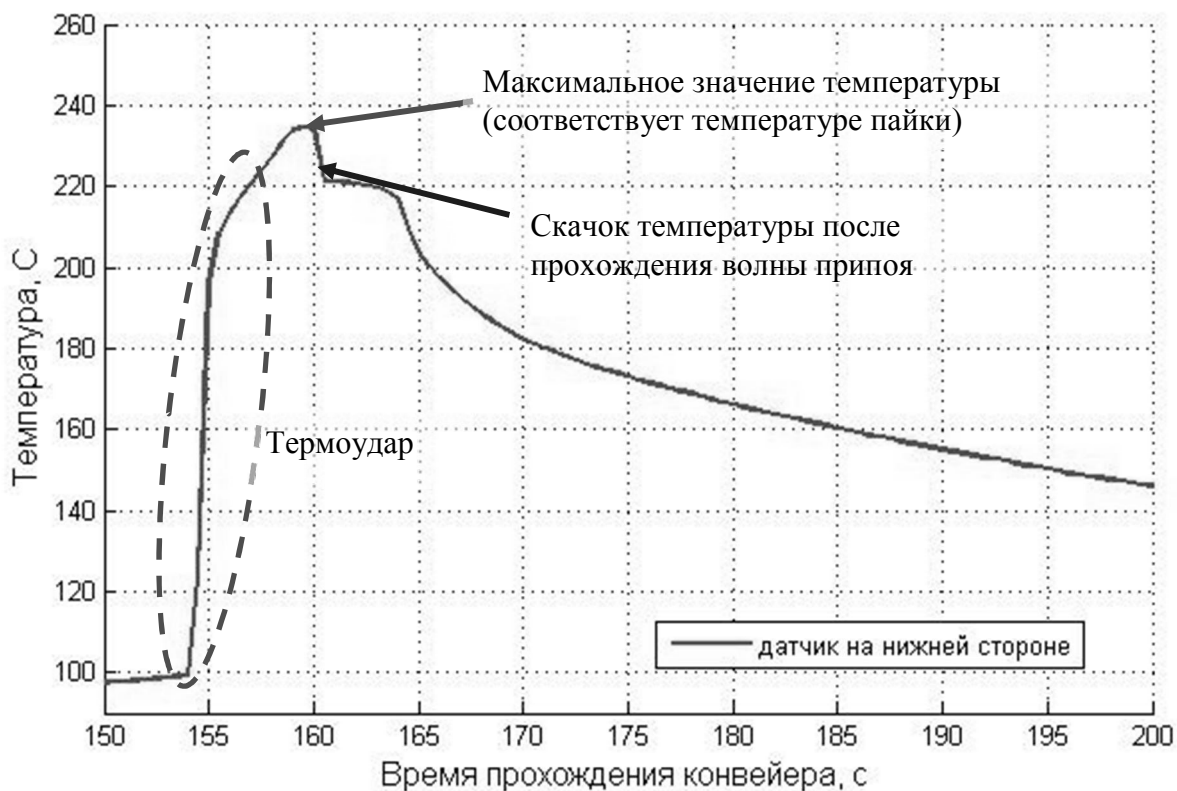


Рисунок Б.2. Участок термопрофиля, который соответствует прохождению платой зоны пайки волной припоя

Т.к. известны ширина волны ($h_w = 4\text{ см}$) припоя и расстояние от начала конвейера до начала волны ($l_w = 166\text{ см}$), то по моменту (t_{down}) скачка

температуры после максимального уровня можно определить скорость конвейера из уравнения связи расстояния со скоростью:

$$v_{kon} = \frac{h_{w+l_{w+x0}}}{t_{down}},$$

где v_{kon} — средняя скорость конвейера, $x0$ — положение датчика на плате относительно передней кромки.

Для проверки применимости подобного метода измерения скорости проводился замер времени между началом и окончанием движения платы с датчиками по конвейеру. С учетом длины конвейера (236 см) определяется его средняя скорость. Сравнение результатов прямого расчета и расчета по термопрофилю (таблица Б.1) проводилось при двух режимах работы установки: режим узкой и режим широкой волны припоя.

Таблица Б.1. Сравнение экспериментально измеренной и вычисленной средней скорости перемещения плат на конвейере

№	тип волны	время прохождения конвейера, с	длина конвейера, м	скорость, м/мин		погрешность, %
				измерение	расчет	
1	широкая	221	2,36	0,641	0,647	1,0
2		208		0,681	0,653	4,1
3		208		0,681	0,657	3,5
4		201		0,705	0,672	4,6
5		197		0,719	0,695	3,3
6	узкая	285		0,497	0,497	0,0
7		297		0,477	0,482	1,0
8		290		0,488	0,489	0,2
9		292		0,485	0,491	1,2

Получено, что погрешность расчета скорости по температурной осциллограмме не превышает 5% для двух режимов работы установки (узкая и широкая волна), что является достаточным при определении скорости.

После определения скорости конвейера можно преобразовать временную зависимость температуры к более наглядной зависимости температуры от местоположения платы на конвейере (рисунок Б.3). При этом координатная зависимость температуры платы рассчитывается с учетом координат, определяющих положение датчиков на плате.

При переходе к координатному температурному профилю, на нем можно отметить зоны установки пайки волной припоя. На рисунке Б.3 красными штриховыми линиями отмечены границы следующих зон установки (слева направо): начало зоны флюсователя, начало первой зоны предварительного нагрева, начало второй зоны преднагрева, конец второй зоны преднагрева, начало узкой волны припоя, начало широкой волны припоя.

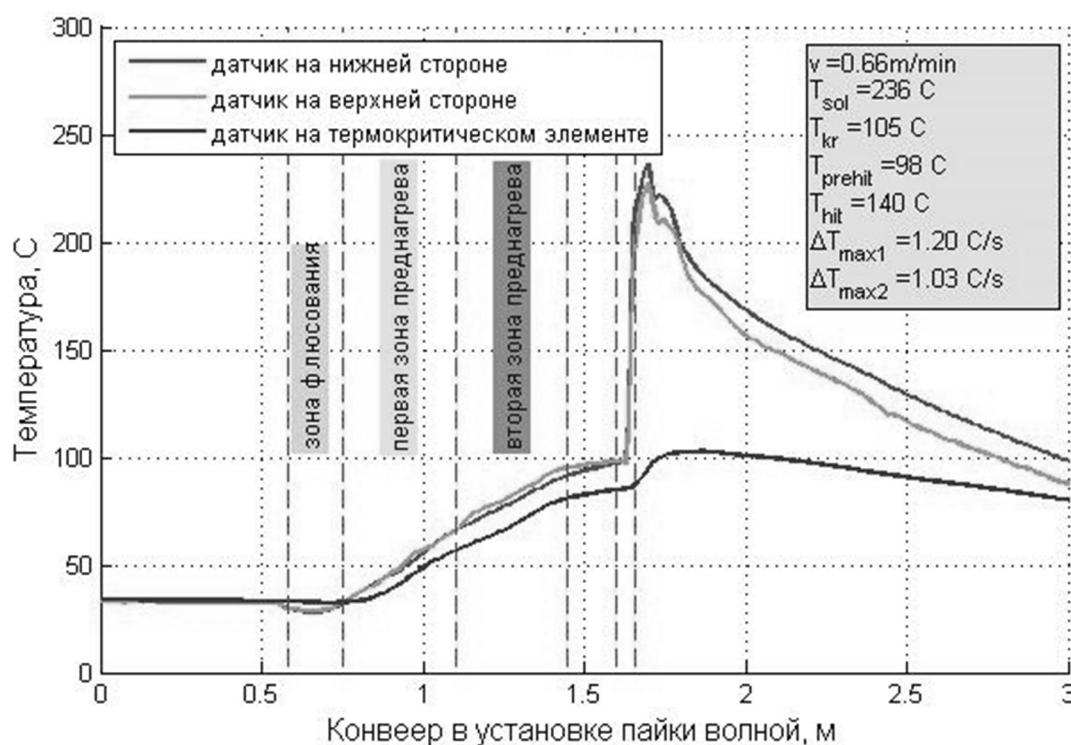


Рисунок Б.3. Типовой экспериментальный температурный профиль в установке пайки волной припоя

Используя полученную зависимость температуры от положения платы рассчитываются такие параметры, как:

- фактическую температуру припоя при пайке T_{sol} ;
- максимальную температуру термокритического элемента T_{kr} ;
- температуру предварительного нагрева платы T_{prehit} ;
- равномерность прогревания платы по толщине;
- максимальная скорость нагрева в первом ΔT_{max1} и во втором ΔT_{max2} блоке предварительного нагрева;
- величину термоудара на компоненты и плату T_{hit} .

Фактическая температура припоя T_{sol} определяется по максимальной температуре, зарегистрированной датчиком на нижней стороне платы.

Температура предварительного нагрева платы T_{prehit} определяется как температура датчика на верхней стороне в момент, когда плата выходит из второй зоны предварительного нагрева.

Определение градиента температуры по времени в зоне преднагрева позволяет оценить скорость нагрева платы в каждой из зон конвекционной печи (ΔT_{max1} , ΔT_{max2}). Для дальнейшего анализа используется максимальное значение градиента.

Величина термоудара на плату T_{hit} определяется как разность между температурой после зоны преднагрева и максимальной температурой платы.

Все эти параметры выводятся после расчета на график температурного профиля совместно с рассчитанной скоростью конвейера, как представлено на рисунке Б.3.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Описание пассивного эксперимента по определению экспериментальной функции распределения времени достижения плотностью флюса заданного уровня

В рамках данной работы был поставлен и проведен пассивный производственный эксперимент по определению скорости изменения параметров флюса в блоке нанесения флюса во время работы установки. Эксперимент проводился на установке пайки двойной волной с блоком пенного флюсования ERSA ETS-250 [20]. Заявленный объем емкости для флюса 2 литра. Фактический объем флюса при наполнении до выводного отверстия — 1,5 литра. Использовался флюс Emil Otto GSP-2533/RX. Заявленная производителем плотность флюса составляет $0,794 \pm 0,003 \text{ г/см}^3$.

Плотность «свежего» флюса измерялась для каждой новой канистры флюса (20 л). За время проведения эксперимента на установке израсходовано 38,5 л флюса (использовался флюс из двух канистр). Плотность «свежего» флюса в данных канистрах составляла $0,794 \text{ г/см}^3$.

В рамках эксперимента в начале смены емкость флюсователя заполнялась «свежим» флюсом, после чего начинался процесс пайки. В случае уменьшения начального уровня флюса в емкость доливался свежий флюс до наполнения емкости.

Во время технологических перерывов проводился контроль плотности флюса и его температуры. Измерение плотности проводилось с помощью ареометра с ценой деления $0,001 \text{ г/см}^3$, температура измерялась цифровым термометром с точностью 1°C . Измерение температуры флюса необходимо для перерасчета измеренной плотности к температуре 20°C . Плотность флюса после контроля не корректируется, что позволяет определить вид закона распределения времени достижения плотности флюса заданного уровня.

Производственный эксперимент проводился с 29.10.2012 по 04.12.2012. Контроль плотности проводился во время 21 рабочей смены (установка

работала 22 смены). Установка включалась 22 раза за 27 рабочих дней. Общее время работы установки составило 82 ч 25 мин.

Общие результаты измерений приведены на рисунке В.4.

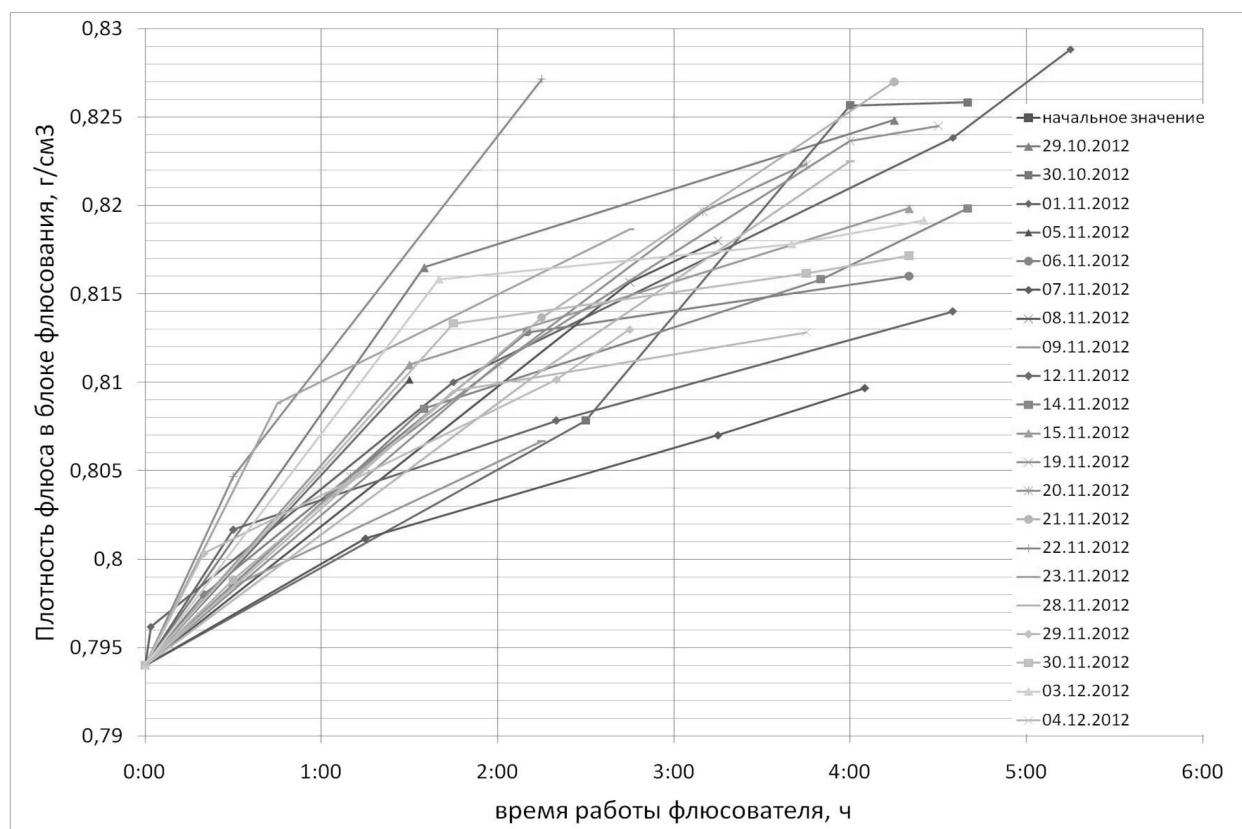


Рисунок В.4. Изменение плотности флюса за время работы блока нанесения флюса

Заметим, что изменение плотности флюса является монотонной и неубывающей функцией. Последнее свойство позволяет использовать данный параметр в качестве диагностического для определения перехода компонента системы в предотказное состояние.

Более наглядно результаты эксперимента показывает зависимость частоты достижения определенного уровня плотности флюса в зависимости от времени работы блока флюсователя. Т.к. контроль плотности проводился не непрерывно, время наступления отказа определяется по двум ближайшим значениям плотности (до достижения уровня и после) с использованием линейной аппроксимации. Для определенных таким образом времен

достижения определенного уровня в системе построена функция распределения (рисунок В.5).

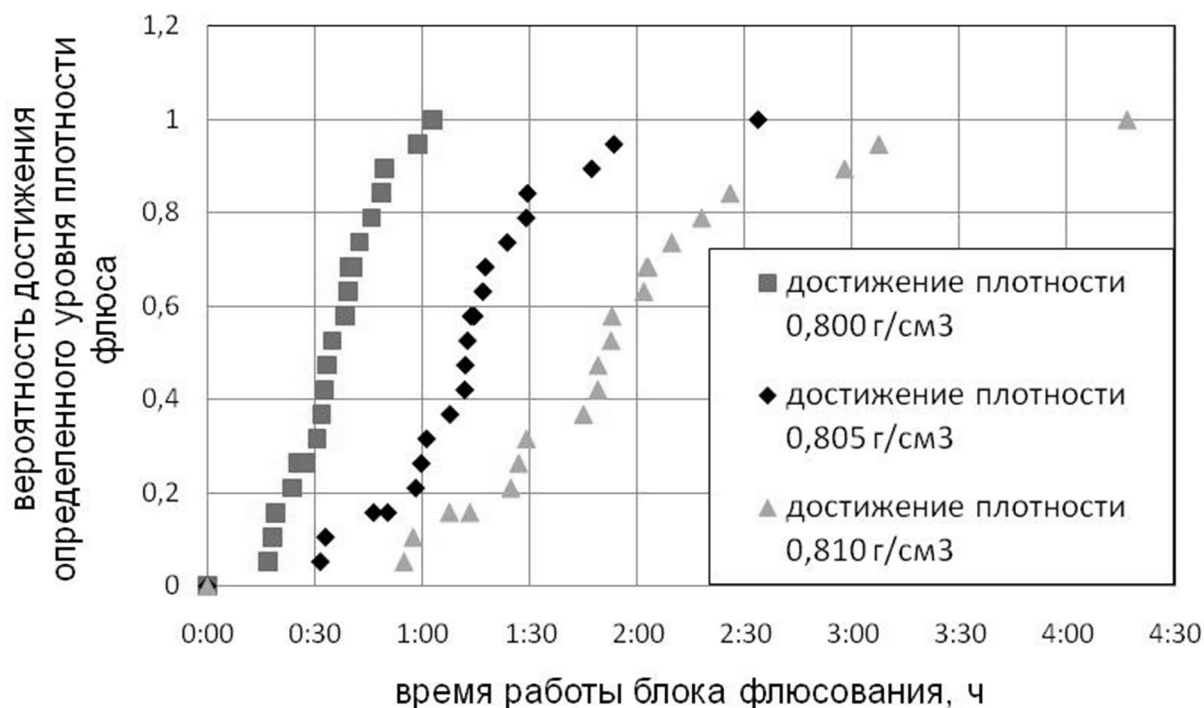


Рисунок В.5. Зависимость вероятности достижения заданного уровня плотности флюса от времени работы установки

В результате получена экспериментальная ФР времени достижения плотностью флюса уровня $0,800 \text{ г/см}^3$, $0,805 \text{ г/см}^3$ и $0,810 \text{ г/см}^3$ в процессе работы блока флюсователя.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Описание пассивного эксперимента по определению экспериментальной функции распределения скорости загрязнения медью ванны припоя

На установке пайки волной припоя используется группа бессвинцовых припоев SN100C и SN100Ce компании Balver Zinn. Начальное содержание примесей, а также критические уровни в процессе работы, которые нормируются производителем, сведены в таблицу Г.2. Производитель указывает, что максимальные уровни примеси в припое не стандартизированы, но основаны на практическом опыте.

Как видно из таблицы основное отличие двух типов припоя — массовая доля меди. Припой SN100C используют для начальной загрузки ванны. В процессе пайки медь выщелачивается из дорожек на платах, что приводит к увеличению ее концентрации в ванне. В литературе [78] указывается, что необходимо весьма часто осуществлять проверку уровня содержания меди в бессвинцовых припоях. Присутствие в припое более 0,85 % меди приведет к увеличению объема брака вследствие образования таких дефектов пайки, как перемычки и «иглы». Поэтому для поддержания уровня меди в необходимом диапазоне уровень припоя в ванне поддерживается добавлением припоя с низкой концентрацией меди (SN100Ce) в случае завышенной и добавлением припоя SN100C в случае заниженной концентрации меди в ванне припоя.

Контроль состава припоя проводится раз в два квартала. Производится взятие пробы припоя. Полученная проба отправляется в лабораторию, которая через определенное время высылает результаты анализа.

Концентрация меди в припое по результатам проведенных химических анализов за период с 04.02.2010 г. по 01.08.2013 г. представлена в таблице Г.3. Возле даты получения результатов контроля указано время, которое проработала установка с момента предыдущего контроля.

Таблица Г.2. Содержание и критический уровень примесей в SN100C(e)

Элемент, входящий в состав припоя	Содержание в припое SN100C® (SnCu0.7NiGe), %	Содержание в припое SN100Ce® (SnNiGe), %	Критический уровень содержания примеси в припое в процессе пайки
Sn	остаток	остаток	остаток
Cu	0,60 – 0,70	max, 0,20	< 0,40 > 0,85
Ge	0,005 – 0,007	0,005 – 0,007	> 0,10
Ni	0,04 – 0,06	0,04 – 0,06	< 0,01 > 0,10
Ag	max. 0,05	max, 0,05	> 0,10
Al	max. 0,001	max. 0,001	> 0,002
As	max. 0,03	max. 0,03	> 0,03
Au	max. 0,03	max. 0,03	-
Bi	max. 0,03	max. 0,03	> 0,10
Cd	max. 0,002	max. 0,002	> 0,002
Fe	max. 0,02	max. 0,02	> 0,03
In	max. 0,03	max. 0,03	-
Pb	max. 0,05	max. 0,05	> 0,10
Sb	max. 0,05	max. 0,05	> 0,05
Zn	max. 0,001	max. 0,001	> 0,005

Таблица Г.3. Результаты химического анализа состава припоя

Дата проведения контроля	04.02.2010	08.08.2011	21.02.2012	28.09.2012	14.03.2013	01.08.2013
Количество дней работы установки	248	550	197	220	167	140
Процентное содержание Cu по массе, %	0,72	1,04	1,50	1,42	0,43	0,91

По данным контроля необходимо оценить время, за которое массовая доля меди увеличивается на фиксированный уровень. Распределение данного времени является входящим параметром для ПМ моделей. Напрямую по результатам контроля невозможно оценить время загрязнения припоя медью, поэтому принято решение определить данный параметр через связанный — через обратную величину скорости загрязнения медью припоя в ванне.

Время $t_{кр}$, за которое массовая доля меди увеличивается на фиксированный уровень $\Delta m_{кр}$, можно определить как произведения фиксированного уровня на величину обратную скорости загрязнения ванны припоя медью v_{sol} :

$$t_{кр} = \frac{1}{v_{sol}} \Delta m_{кр}.$$

В процессе пайки припой расходуется различными темпами в зависимости от типа плат, площади контактных площадок, загруженности установки. Расходуемая часть припоя восполняется за счет добавления «свежего» припоя. «Свежий» припой имеет известное (гарантируется производителем) удельное массовое содержание меди, кроме того известна масса добавляемого припоя и его тип (SN100C или SN100Ce). Это позволяет определить массу меди, которая добавляется совместно со «свежим» припоем в ванну по информации о расходе припоя. Зная процентное содержание меди в ванне до момента добавления, можно определить массовую долю меди в ванне после коррекции. Разница между рассчитанной и фактической (полученной в результате химического анализа) величиной концентрации меди определяет долю меди в припое, причиной появления которой является загрязнение в процессе работы установки (выщелачивание).

Принято, что фактическое содержание меди в ванне припоя до корректировки определяется значением, полученным линейной аппроксимацией по результатам последующего и предыдущего контроля. На

рисунке Г.6 приведена осциллограмма загрязнения припоя медью во времени работы установки. Значения рассчитываются с шагом один месяц. На рисунке Г.6 также представлены данные по фактическому содержанию меди в припое, по результатам контроля и по расчету фактического содержания меди и рассчитанное содержание меди без учета загрязнения.



Рисунок Г.6. Изменение массовой доли меди в припое за время работы установки

Величину обратную скорости загрязнения ванны припоя медью v_{sol} можно определить по рассчитанному уровню загрязнения припоя медью. ФР рассчитанных значений величины обратной скорости загрязнения медью ванны припоя приведена на рисунке Г.7.

Используя ФР СВ обратной скорости загрязнения медью ванны припоя есть возможность определить ФР СВ времени достижения фиксированного уровня загрязнения припоя в ванне. Т.к. массовая доля меди во время функционирования установки изменяется непрерывно по ее величине можно судить о степени наступления СО (выход параметра за критический уровень).



Рисунок Г.7. ФР величины обратной скорости загрязнения медью ванны припоя

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Общество с ограниченной ответственностью

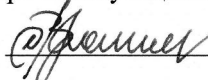
Конструкторское бюро

коммутационной аппаратуры

Юр. адрес: 99003 г. Севастополь, ул. Революции 1905 г., д. 12
Почтовый адрес: 99053, г. Севастополь, ул. Вакуленчука, 22,
тел. (0692) 46-93-10, 47-35-35
факс (0692) 46-93-00,
E-mail: info@tavrida.com
Р/С № 40702810900130000002
ЗАО «ГЕНБАНК»
Корсчет № 30101810800000000382 в Отделении 2 Москва,
БИК 044585382, код ОКПО 31583767

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Конструкторское
бюро коммутационной аппаратуры»

 К.В. Фролков
«10» марта 2014 г.

А К Т

внедрения результатов кандидатской диссертации на тему: «**Оптимизация периодичности автоматизированного контроля многокомпонентных производственных систем со скрытыми отказами**» аспиранта кафедры высшей математики Севастопольского национального технического университета (специальность 05.13.07 – Автоматизация процессов управления) Никишенко Алексея Николаевича в ООО «Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры»

Мы, нижеподписавшиеся, представитель ООО «Конструкторское Бюро коммутационной аппаратуры» в лице ведущего инженера-технолога Горячева В.П., с одной стороны, и Никишенко А.Н., с другой стороны, составили настоящий акт внедрения результатов кандидатской диссертации Никишенко А.Н. в ООО «Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры».

Получены и внедрены следующие результаты:

1. Методика расчета показателей эффективности контроля технического состояния установки пайки волной припоя «WS330-SF» Essemtec с учетом наличия скрытых отказов.
2. Прикладные программы обработки экспериментальных данных, получаемых в результате проведения контроля технического состояния блоков установки «WS330-SF» Essemtec.
3. Прикладные программы расчета показателей эффективности установки пайки волной припоя «WS330-SF» Essemtec с учетом контроля скрытых отказов и определения оптимального периода покомпонентного контроля.

Внедрение предложенных прикладных программ автоматизированной системы принятия решений при управлении периодичностью контроля скрытых отказов позволило оптимизировать расход технологических материалов и повысить качество паяных соединений.

Ведущий инженер-технолог

Аспирант СевНТУ



В.П. Горячев

А.Н. Никишенко