В.И. Сырямкин, В.С. Шидловский

# КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

В.И. Сырямкин, В.С. Шидловский
КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

**В.И. Сырямкин, В.С. Шидловский**

# КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Издательство Томского университета
2010

УДК 681.5
ББК 32.965; 32.815
С952

Р е ц е н з е н т ы: **Ф.П. Тарасенко**, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ (зав. кафедрой системного анализа и управления Томского государственного университета),

**В.И.Гончаров,** д-р техн. наук, профессор (каф. интегрированных компьютерных систем управления Томского политехнического университета)

С952 **Сырямкин В.И., Шидловский В.С.** Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – 316 с.

ISBN 978–5–7511–1964-5

Монография посвящена вопросам синтеза корреляционно-экстремальных систем навигации.

Для специалистов в области современных и перспективных систем управления, может быть полезна для студентов, аспирантов, инженеров и научных работников, специализирующихся в области кибернетики.

**УДК 681.5**
**ББК 32.965; 32.815**

ISBN 978–5–7511–1964-5

© В.И. Сырямкин,
В.С. Шидловский, 2010

**V.I. Syryamkin, V.S. Shidlovsky**

# CORRELATION-EXTREMAL DIRECTION-FINDING SYSTEMS

Tomsk State University publishing house
2010

UDC 681.5
BBC 32.965; 32.815

R e v i e w e r s : **F.P. Tarasenko**, Dr. of technical science, professor, deserved scientist of RF (head of system analysis and management department of Tomsk State University),

**V.I. Gonsharov,** Dr. of technical science, Professor (integrated-computer control system department of Tomsk State University)

**Syryamkin V.I., Shidlovsky V.S.** Correlation-extremal direction-finding systems. – Tomsk: Tomsk State University publishing house, 2010. – 316 p..

ISBN 978–5–7511–1964-5

Monograph is divided to problems of correlation-extremal direction-finding systems synthesis. It is intended for specialists in the area of modern and prospective control systems, can be useful for students, postgraduate students, engineer and scientist of cybernetics field.

**UDC 681.5**
**BBC 32.965; 32.815**

ISBN 978–5–7511–1964-5

© V.I. Syryamkin,
V.S. Shidlovsky, 2010

# ОГЛАВЛЕНИЕ

**ПРЕДИСЛОВИЕ** ..... 13
**ВВЕДЕНИЕ** ..... 18
**Глава 1. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ** ..... 20
1.1. Вводные понятия ..... 20
1.1.1. Теория систем ..... 21
1.1.2. Развитие систем автоматического управления ..... 23
1.2. Адаптивные системы управления ..... 26
1.2.1. Принятие решений при наличии устранимых неопределенностей ..... 31
1.2.2. Моделирование и идентификация систем ..... 33
1.2.3. Параллельные процессы ..... 34
1.3. Обучающиеся системы управления ..... 35
1.3.1. Определения ..... 35
1.3.2. Методология проектирования обучающихся систем ..... 38
1.4. Самоорганизующиеся системы управления ..... 39
1.5. Основы систем интеллектуального управления ..... 41
1.5.1. Введение ..... 41
1.5.2. Человеко-машинные системы управления ..... 43
1.5.3. Интегральные роботы ..... 44
1.5.4. Нечеткий автомат как координатор управления ..... 45
1.5.5. Лингвистические методы интеллектуальной организации ..... 46
1.6. Перестраиваемые вычислительные среды ..... 47
1.7. Основы обзорно-сравнительного метода в корреляционно-экстремальных навигационных системах ..... 49
1.7.1. Вводные понятия корреляционного анализа ..... 51
1.7.2. Основные определения и ограничения корреляционного анализа ..... 53
1.8. Классификация и основные принципы реализации КЭНС ..... 54
1.8.1. Классификация корреляционно-экстремальных систем ..... 55
1.8.2. Особенности реализации обзорно-сравнительного метода в КЭНС ..... 60
1.9. Структура корреляционно-экстремальных систем ..... 61
1.9.1. Вводные понятия ..... 61

1.9.2. Корреляционная обработка изображений ..... 62
1.10. Выводы ..... 64
Литература ..... 65
**Глава 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ СРАВНЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ И ЦВЕТНОСТЕЙ** ..... 73
2.1. Введение ..... 73
2.2. Обобщенная схема алгоритма корреляционного сравнения изображений ..... 73
2.3. Выбор параметров эталонного изображения ..... 79
2.4. Исследование помехоустойчивости корреляционных систем ..... 88
2.4.1. Исследование помехоустойчивости КЭС, сравнивающей точечные изображения ..... 88
2.4.2. Исследование помехоустойчивости КЭС, сравнивающей протяженные изображения ..... 93
2.5. Методы пространственной фильтрации помех ..... 95
2.6. Корреляционное сравнение трехмерных изображений ..... 105
2.6.1. Корреляционное сравнение стереоизображений ..... 105
2.6.2. Корреляционные методы оценки пространственного положения объекта ..... 107
2.7. Корреляционные методы сравнения цветных изображений ..... 110
2.8. Выводы ..... 117
Литература ..... 119
**Глава 3. СТРУКТУРНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ** ..... 123
3.1. Вводные понятия ..... 123
3.2. Понятие систем с переменной структурой ..... 125
3.3. Перестраиваемые вычислительные среды ..... 128
3.3.1. Общие понятия ..... 128
3.3.2. Работа перестраиваемых автоматов ..... 131
3.3.3. Понятие однородной вычислительной среды ..... 132
3.3.4. ПВС как средство построения управляющего устройства в системах с переменной структурой ..... 134
3.4. Способы построения ПВС ..... 137
3.4.1. ПЛИС ..... 137
3.4.2. NI CompactRIO ..... 141
3.5. Средства программной реализации ПВС ..... 147

3.5.1. Графическое программирование ..... 149
3.5.2. Программирование логики ПЛИС в LabVIEW ..... 152
3.6. Моделирование в среде LabVIEW ..... 153
3.6.1. Моделирование перестраиваемых автоматов ..... 153
3.6.2. Моделирование однородной перестраиваемой вычислительной среды на базе М-автомата ..... 159
3.7. Структурно-перестраиваемый коррелятор ..... 164
3.7.1. Получение формул для умножения двоичных чисел ..... 164
3.7.2. Выбор ячейки однородной среды ..... 165
3.7.3. Получение модели коррелятора ..... 169
3.8. Синтез системы автоматического управления ..... 170
3.8.1. Летательный аппарат как объект управления ..... 170
3.8.2. Общие сведения о системе управления углом тангажа ..... 173
3.8.3. Управление углом тангажа посредством статического автопилота ..... 174
3.8.4. Синтез модели системы управления углом тангажа самолета с использованием ПИД-регулятора ..... 177
3.8.5. Синтез модели системы управления углом тангажа самолета с использованием коррелятора и ПИД-регулятора ..... 179
3.8.6. Синтез модели системы управления углом тангажа самолета с использованием коррелятора и СПС-регулятора ..... 181
3.9. Выводы ..... 184
Литература ..... 184
**Глава 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ** ..... 186
4.1. Введение ..... 186
4.2. Структура САПР корреляционно-экстремальных систем ..... 186
4.3. Структурный синтез корреляционно-экстремальных систем на основе функционально-стоимостного анализа ..... 190
4.3.1. Особенности методики проведения комплексного функционально-стоимостного анализа в процессе создания КЭС ..... 190
4.3.2. Функционально-стоимостной анализ на ранних этапах научно-исследовательской работы ..... 193

4.3.3. Экспресс-ФСА на основных этапах научно-исследовательской работы ..... 199
4.3.4. Функционально-стоимостной анализ при оптимизации структуры КЭС ..... 204
4.3.5. Примеры применения функционально-стоимостного анализа при проектировании КЭС ..... 211
4.4. Параметрический синтез корреляционно-экстремальных систем ..... 223
4.4.1. Оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию КЭС ..... 223
4.4.2. Инженерный (приближенный) расчет КЭС ..... 226
4.5. Аппаратно-программный комплекс на базе микроЭВМ для моделирования, проектирования и настройки КЭС ..... 252
4.5.1. Состав аппаратно-программного комплекса ..... 252
4.5.2. Структура программного обеспечения ..... 256
4.6. Выводы ..... 260
Литература ..... 262
**Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В СОВРЕМЕННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ** ..... 269
5.1. Экстремальная навигация ..... 269
5.2. Местоопределение подвижных объектов на местности ..... 270
5.3. Беспилотные летательные аппараты ..... 273
5.4. Групповой полет летательных аппаратов ..... 274
5.4.1. Ударные беспилотные летательные аппараты ..... 279
5.4.2. Беспилотная авиационная система БАС-62 ..... 283
5.4.3. Семейство авиационных комплексов «Иркут» ..... 285
5.5. Избирательное воздействие на объекты поражения ..... 288
5.6. Ракетный комплекс «Тополь-М» ..... 295
5.6.1. Межконтинентальная баллистическая ракета РС-24 ..... 297
5.6.2. Стратегическая ракета морского базирования «Булава» ..... 298
5.7. Оперативно-тактический ракетный комплекс «Искандер-М» ..... 300
5.8. Стратегическая крылатая ракета Х-55 ..... 305
5.9. Выводы ..... 310
Литература ..... 310

# CONTENTS

**PREFACE** ..... 13
**INTRODUCTION** ..... 18
**Chapter 1. CONTROL SYSTEMS DEVELOPMENT** ..... 20
1.1. Introductory terms ..... 20
1.1.2 Systems theory ..... 21
1.1.3 Automatic control system development ..... 23
1.2. Adaptive control system ..... 26
1.2.1 Decision-making in the presence of repairable indeterminateness ..... 31
1.2.2 Systems design and identification ..... 33
1.2.3 Concurrent processes ..... 34
1.3. Learning control systems ..... 35
1.3.1 Adjectives ..... 35
1.3.2 Learning systems design techniques ..... 38
1.4. Self-organizing control system ..... 39
1.5. Basic of intelligence control system ..... 41
1.5.1. Introduction ..... 41
1.5.2. Human-machine control system ..... 43
1.5.3. Integral robots ..... 44
1.5.4.1 Fuzzy automaton like a control coordinator ..... 45
1.5.6. Linguistic methods of smart organization ..... 46
1.6. Tuneable computing environment ..... 47
1.7. Basic of review-comparative method in the correlation-extremal navigation system (CENS) ..... 49
1.7.1. Introductory terms of correlation analysis ..... 51
1.7.2. Basic terms and limitation of correlation analysis ..... 53
1.8. Classification and basic principles of correlation-extremal navigation systems ..... 54
1.8.1. Classification of correlation-extremal systems ..... 55
1.8.2. Realization features of review-comparative method in the CENS ..... 60
1.9. CES structure ..... 61
1.9.1. Introductory terms ..... 61
1.9.2. Correlation image processing ..... 62
1.10. Conclusion ..... 64

References ..... 65
**Chapter 2. GENERAL QUESTIONS OF CORRELATION COMPARISON SYSTEMS THEORY OF DIFFERENCE DIMENTIONS AND CHROMATICITY IMAGES**..... 73
2.1. Introduction ..... 73
2.2. General scheme of correlation images comparison algorithm..... 73
2.3. Sample image parameters choosing. ..... 79
2.4. Correlation systems noise immunity research. ..... 88
2.4.1. CES for point images comparison noise immunity research. ..... 88
2.4.2. CES for extended images comparison noise immunity research. ..... 93
2.5. Methods of noises spatial filtering..... 95
2.6. Correlation comparison of three-dimensional images. ..... 105
2.6.1. Correlation comparison of stereo images..... 105
2.6.2. Correlation methods of object attitude position estimation..... 107
2.7. Correlation methods of color images comparison. ..... 110
2.8. Conclusions. ..... 117
References ..... 119
**Chapter 3. STRUCTURALLY RECONFIGURABLE MOBILE OBJECTS CONTROL SYSTEMS**..... 123
3.1. Introductory terms ..... 123
3.2. Conception of variable structure systems. ..... 125
3.3. Reconfigurable computing environment (RCE)..... 128
3.3.1. General terms. ..... 128
3.3.2. Work of reconfigurable automatons..... 131
3.3.3. Homogeneous computing environments conception. ..... 132
3.3.4. RCE in the role of control device in variable structure systems design. ..... 134
3.4. Methods of RCE design..... 137
3.4.1. EPLD. ..... 137
3.4.2. NI Compact RIO. ..... 141
3.5. Software RCE implementation methods. ..... 147
3.5.1. Graphic programming. ..... 149
3.5.2. EPLD logic programming in LabVIEW. ..... 152
3.6. Modeling in LabVIEW. ..... 153

3.6.1. Reconfigurable apparatus modeling. ..... 153
3.6.2. Homogeneous reconfigurable computing environment on the base of M-automate modeling..... 159
3.7. Structure-reconfigurable correlator ..... 164
3.7.1. Formulas making for binary data multiplication. ..... 164
3.7.2. Homogeneous medium cell selection. ..... 165
3.7.3. Correlator model realization..... 169
3.8. Automatic control system synthesis..... 170
3.8.1. Aircraft like a control object. ..... 170
3.8.2. General information about tangage control system. ..... 173
3.8.3. Tangage angle control by means of proportional autopilot. ..... 174
3.8.4. Plan tangage angle control system synthesis using PID regulator. ..... 177
3.8.5. Plan tangage angle control system synthesis using correlator and PID regulator. ..... 179
3.8.6. Plan tangage angle control system synthesis using SPS regulator. ..... 181
3.9. Conclusions..... 184
References ..... 184
**Chapter 4. COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM DEVELOPMENT OF CORRELATION EXTREMAL SYSTEMS** ..... 186
4.1. Introduction..... 186
4.2. Structure of correlation extreme systems CAD. ..... 186
4.3. Structure synthesis of correlation extreme systems on the base of value analysis. ..... 190
4.3.1. Features of complex value analysis conducting in the process of CES realization method. ..... 190
4.3.2. Value analysis on the early stages of R&D. ..... 193
4.3.3. Express value analysis in the general stages of R&D. ..... 199
4.3.4. Value analysis during CES structure optimization..... 204
4.3.5. Examples of value analysis using in CES design. ..... 211
4.4. Parametric synthesis of CES. ..... 223
4.4.1. Determination of position allowable error estimation in the process of cost minimization for CES development and operating. ..... 223
4.4.2. Engineering (approximate) CES calculation. ..... 226

4.5. Hardware and software complex on the base of microcomputer CES modeling, designing and adjustment. ..... 252
4.5.1. Hardware and software complex content. ..... 252
4.5.2. Software structure. ..... 256
4.6. Conclusions. ..... 260
References ..... 262
**Chapter 5. APPLICATION AND PROSPECTS OF CORRELATION ANALYSYS USING IN THE MOERN NAVIGATION EQUIPMENT**. ..... 269
5.1. Extremal navigation. ..... 269
5.2. Mobile objects position finding in location. ..... 270
5.3. Pilotless vehicle. ..... 273
5.4. Group flight of aircrafts. ..... 274
5.4.1. Impact pilotless vehicle. ..... 279
5.4.2. Pilotless aeronautical system BAS-62. ..... 283
5.4.3. Series of aeronautical complexes «Irkut». ..... 285
5.5. Selective influence on the defeat objects. ..... 288
5.6. Rocket complex «Topol-M». ..... 295
5.6.1. Intercontinental ballistic rocket PS-24. ..... 297
5.6.2. Strategy rocket of marine location «Bulava». ..... 298
5.7. Theatre-of-war rocket complex «Iskander-M». ..... 300
5.8. Strategy cruise missile X-55. ..... 305
5.9. Conclusions. ..... 310
References ..... 310

*Выдающему ученому и педагогу*
*современности*
*Владимиру Петровичу Тарасенко*
*посвящается*

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое развитие корреляционно-экстремальные системы ( КЭС) получили благодаря тому, что они аккумулировали такие достижения кибернетики, как методы искусственного интеллекта, оптимальные процедуры статистической обработки многомерных сигналов, алгоритмы экстремального регулирования, оптоэлектронные устройства корреляционной обработки реализаций многомерных полей различной физической природы.

Первая экстремальная система управления была создана В.А. Богомоловым и В.Л. Бениным, а экстремальная система регулирования впервые описана в книге Г. Штейна «Регулирование и выравнивание в паросиловых установках» (1929).[1]

Работы по созданию КЭС велись в СССР широкомасштабно, развитие теории тесно сочеталось с инновационной деятельностью

Особенно хотелось бы отметить, что в это время осуществлялось тесное сотрудничество многими ведущими специалистами в области теории управления и КЭС, в их числе А.А. Фельдбаум, Я.З. Цыпкин, Г.С. Поспелов, А.А. Первозванский, В.В. Казакевич, Л.А. Растригин, Е.А. Федосов, В.П. Живоглядов, АА. Ашимов, И.Н. Белоглазов, С.Ф. Козубовский, Д.В. Васильев, Г.И. Джанджгава, В.К. Баклицкий, Ю.Г. Якушенков, В.А. Стефанов, В.В. Пицык, Р.И. Полонников, В.П.Тарасенко.

Создание оперативно-стратегического ракетного комплекса РК-55 «Рельеф» с крылатыми ракетами наземного базирования большой дальности было ответом СССР на разработку в США КР «Томагавк».

---

[1] Ивахненко А.Г. Техническая кибернетика. – Киев: Гостехиздат УССР, 1959.

На ракетах была применена корреляционно - экстремальная система коррекции, которая гарантировала попадание в заранее выбранную цель с высокой точностью. При разработке системы коррекции использовались труды академика А.А. Красовского[2].

Ряд технических проблем был не до конца решен, и массированное серийное производство этих систем не было развернуто. Однако результаты исследований не пропали, и огромные ресурсы были направлены на производство мобильных комплексов «Пионер» и «Тополь»[3].

Значительные результаты в теории и практике корреляционно-экстремальных систем управления были получены под руководством одного из разработчиков этих систем В.П. Тарасенко.

Он первый в стране предложил принципы построения и развития теории корреляционно-экстремальных навигационных систем, использующих радиолокационные карты местности, карты звездного неба и искусственных радиоориентиров. Он автор первых монографий по этому направлению в мировой литературе.

В 1993 г. за разработку принципов построения и теории корреляционно-экстремальных сверхточных систем навигации и наведения коллектив в составе И.Н. Белоглазова, В.П. Тарасенко, А.А. Красовского Г.П. Чигина, Ю.С. Осипова, Р.И. Полонникова, В.И.Алексеева получил высшую награду в области науки и техники в России – Государственную премию.

Развитие корреляционно-экстремальной тематики нашло свое отражение при создании высокоточных систем наведения беспилотных летательных аппаратов и в первую очередь при разработке бортовых и наземных информационных систем, включающих в себя специальные системы обработки изображений. К ним прежде всего относятся бортовые инерциальные и спутниковые навигационные системы, корреляционно-экстремальные системы навигации по геофизическим полям, а также наземные системы обработки разведывательной ви-

---

[2] Судьба [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ahtubinsk.ru/udalec/vvs/st5.shtml, свободный.

[3] Военный паритет: военные технологии, военная политика и разведка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.militaryparitet.com/html/ , свободный.

деоинформации, выработки целеуказания и подготовки эталонной информации.

Наряду с развитием корреляционно-экстремальной тематики ее инновационная составляющая требует высокоскоростных вычислений и новых подходов при синтезе систем автоматического управления.

Одним из перспективных путей улучшения технико-экономических показателей систем управления является применение перестраиваемых вычислительных сред в системах автоматического управления, так как на их основе синтезируется новая логическая и функциональная организация устройств управления и достигается значительное повышение качества управления, эффективности переработки информации, производительности, надежности и экономичности при одновременном сокращении трудозатрат на их проектирование и применение.

Основополагающие исследования, посвященные синтезу и анализу исследованию систем автоматического управления, динамика которых изменяется вследствие изменения структуры системы, были проведены Б.Н. Петровым, С.В. Емельяновым, В.И. Уткиным и др.

Синтез систем с изменяемой структурой управления может быть реализован на использовании идеологии модели коллектива вычислителей. Исследования по вычислительным системам, основанным на модели коллектива вычислителей, были начаты в Институте математики Сибирского отделения АН СССР по инициативе академика АН СССР С.Л. Соболева. Начиная с 70-х годов XX в. теоретические и проектные работы в Сибирском отделении АН СССР (ныне СО РАН) по вычислительным системам с программируемой структурой ведутся под руководством одного из разработчиков первой вычислительной системы с программируемой структурой и основателя распределенных вычислительных систем чл.-корр. РАН В.Г. Хорошевского.

В рамках этого направления:

– изучаются теоретические и прикладные проблемы создания научной распределенной информационно-вычислительной среды Grid;

– создаются распределенные вычислительные комплексы нового поколения на основе фундаментальных методов синтеза новых архитектур и алгоритмов их функционирования и управления;

– разрабатываются новые эффективные программные и аппаратные средства обеспечения информационной безопасности;

– исследуются фундаментальные проблемы искусственного интеллекта, распознавания образов, оптимизации, проблемно-ориентированных и экспертных систем, основанных на знаниях;

– разрабатываются методы и программные комплексы многопроцессорных суперЭВМ;

– усовершенствуются системы распознавания рукописного текста и речи, перевода с одного языка на другой, а затем внедряются в глобальные информационные сети;

– создаются теории и технологии элементной базы компьютеров, в том числе квантовых.

Перестраиваемые вычислительные среды позволяют создавать универсальные устройства управления, которые могут эффективно решать задачи различного назначения за счет гибкой программной настройки и перестройки алгоритмов управления как перед началом работы, так и в процессе функционирования системы управления, т.е. приобретают свойства и статической, и динамической реконфигурации своей структуры.

Концепция модели коллектива вычислителей с реконфигурируемой архитектурой развивается в нашей стране давно по нескольким направлениям. Это наглядно отражено в работах Э.В. Евреинова[4, 5, 6], В.Г. Хорошевского[6, 7], И.В. Прангишвили[5, 8], А.В. Каляева[9]. Несмотря на все различия, сущность этих работ состоит в организации структуры вычислительного устройства, обладающего возможностями реконфигурирования связей и, соответственно, адаптацией вычислительной системы под структуру решаемой задачи. Перечень этих задач достаточно широк и в настоящее время часто применим в таких

---

[4] Евреинов Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды. – М.: Радио и связь, 1981. – 208 с.

[5] Евреинов Э.В., Прангишвили И.В. Цифровые автоматы с настраиваемой структурой. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

[6] Евреинов Э.В., Хорошевский В.Г. Однородные вычислительные системы. – Новосибирск: Наука, 1978. – 320 с.

[7] Хорошевский В.Г. Архитектура вычислительных систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 512 с.

[8] Прангишвили И.В., Абрамова Н.А., Бабичева Е.В., Игнатущенко В.В. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. – М.: Наука, 1967. – 228 с.

[9] Каляев А.В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. – М.: Радио и связь, 1984. – 240 с.

областях, как физика плазмы, физика конденсированных сред, атомная физика, теория элементарных частиц, астрофизика, фармакология, биология, генетика, нанотехнологии и т.д.

Особо следует отметить указанные еще в 70-е годы прошлого столетия перспективы использования этого направления в управлении, автоматике и телемеханике[5], что является наиболее актуальным вариантом применения данного подхода при разработке различных систем специального назначения (систем противоракетной обороны, конструирования самолетов, ракет, бесшумных подводных лодок и т.д.).

Использование данного подхода позволяет устранить существенные недостатки современных суперЭВМ с кластерной архитектурой, связанные с относительно низкой скоростью процедур межпроцессорного обмена, ограниченной пропускной способностью сети передачи данных, необходимостью синхронизации множества взаимосвязанных последовательных процессов, т.е. организация параллельного вычисления требует большего времени, чем его исполнение[10].

Практическую реализацию указанного подхода на основе проведенных исследований[10] без применения больших финансовых затрат можно осуществить на основе ПЛИС. Это подтверждается и ведущими мировыми производителями. Использование ПЛИС в качестве элементной базы является перспективным для создания больших вычислительных структур (полей), в рамках которых могут создаваться проблемно-ориентированные управляющие и вычислительные системы, адаптированные под структуру решаемой задачи. Именно при таком подходе возможно обеспечить максимум реальной производительности высокоточных систем для решения конкретных прикладных задач.

---

[10] Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / Под общ. ред. И.А. Каляева. – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 320 с.

Уверен, что найдутся молодые, талантливые выпускники томских университетов, которые реализуют себя в этой многообещающей тематике.

*В.П. Тарасенко*

# ВВЕДЕНИЕ

Современная **теория управления** представляет собой разветвленное научное направление, использующее аппарат классической теории автоматического регулирования и управления, кибернетики, методов оптимизации, исследования операций и искусственного интеллекта, теории принятия решений и охватывающее проблемы управления системами самой разнообразной природы, масштаба и назначения. В то же время более традиционные области использования теории управления – сложные технические системы, робототехника, авиация, навигация, космос, обработка изображений и многие другие – будут сохранять существенную роль стимула для развития теории и областей ее приложений..

В теории управления все большую роль будет играть исследование нелинейных систем. Здесь можно ожидать прогресса в области синтеза нелинейных управлений, появления новых типов обратной связи, исследований хаоса, синхронизации, других специфических нелинейных эффектов. Все большее распространение получат модели гибридного управления, включающие логические и непрерывные компоненты. Особую роль будет играть сетевое и интеллектуальное управление авиационно-космическими, морскими и наземными объектами, в том числе интеллектуальное планирование действий в беспилотных аппаратах. Широчайшие перспективы открываются для применения идей управления в биотехнологиях, биоинформатике, медицине. Очень важны модели управляемых эколого-экономических систем.

Развитие оптимального и адаптивного управления позволяет активно устранять априорную неопределенность, обеспечивает высокую точность управления при сложных многокомпонентных ограни-

чениях, при изменениях конфигурации, в критических и закритических режимах, при неустойчивости объекта в основных и нештатных режимах, при упругости его конструкции, при повреждениях или отказах части органов управления и элементов конструктивной схемы..

В области навигации и наведения движущихся объектов должна развиваться теория навигационных и гироскопических систем, основанная на комплексировании инерциальных навигационных систем со спутниковыми радионавигационными системами, корреляционно-экстремальными системами навигации и наведения по физическим полям, обзорными системами с распознаванием образов и ориентиров. В области задач управления системами междисциплинарной природы (организационно-техническими, медико-биологическими, эколого-экономическими и др.) будут развиваться экспертно-классификационные, экспертно-статистические и так называемые «активные» модели управления.

Важную роль будут играть системы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений (от предприятия до государственных органов), в частности, так называемые когнитивные системы, которые способны вести мониторинг текущей ситуации, включая обработку текстовой информации, давать прогнозы развития ситуации на основе включения экспертных знаний, рекомендации по принятию решений. Такие системы особенно важны для целей стратегического планирования в условиях неопределенности, когда нет возможности получить достоверные количественные прогнозы.

Неоднократно на семинарах кафедры адаптивных оптимальных систем управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и при общении с ее сотрудниками В.П. Тарасенко высказывался о публикации материала, в котором бы отразилось место корреляционно-экстремальных систем в общей структуре систем управления. Ниже в гл. 1 сделана эта попытка. Мы отдаем себе отчет в том, что она не свободна от недостатков, так как любая классификация –это творческий процесс. Авторы будут благодарны всем за конструктивные замечания.

Работа выполнена в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.2/3265.

С авторами можно связаться по адресу:
Сырямкин В.И. – egs@sibmail.com
Шидловский В.С. – v.shidlovskiy@gmail.com

# Глава 1. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

## 1.1. ВВОДНЫЕ ПОНЯТИЯ

На всех ступенях развития техники людей интересовала возможность создания машин, подражающих живому организму. Это стремление к созданию и изучению автоматов всегда выражалось на языке существовавшей в данное время техники. Технические достижения современности своим появлением, созданием и развитием на протяжении последних лет обязаны строгой теории автоматического управления. Во времена Ньютона автомат принимал вид часового музыкального ящика с фигурками на крышке. В XIX столетии автомат — это тепловой двигатель. Современный автомат направляет ракеты на то место, где луч радиолокатора обнаруживает самолет, и т. п. Основополагающие работы таких исследователей, как Боде, Никольса, Попов, Найквист и др. [14, 46, 82, 116] , привели к становлению нового научного направления. Основополагающим в новой дисциплине стало понятие обратной связи, имевшее и важное философское значение. В последующие годы параллельно с развитием техники шло и совершенствование систем управления: разрабатывался сложный теоретический аппарат, накапливался опыт практического применения теоретических результатов и созданных технических средств. Прогресс в области систем управления в значительной мере обязан развитию технической составляющей – появлению электронных вычислительных машин, обладающих поистине фантастическими возможностями. В последние время их влияние сказывается особенно сильно.

Системный подход всегда был неотъемлемой частью методологии, применяемой инженером-практиком, поскольку, в отличие от других наук, сущность работы инженеров заключается не в том, чтобы, пользуясь в основном аналитическими методами, открывать функциональные связи между различными физическими явлениями, а в том, чтобы разрабатывать системы, состоящие из многих компонен-

тов, которые нужно соединить так, чтобы они функционировали как единое целое [105, 133].

Системный подход отличается макроскопическим взглядом на природу. Для него характерно использование только тех свойств объектов, которые необходимы для создания системы и обеспечения ее физической реализуемости и соответствия техническим нормам и стандартам.

Появление больших систем, охватывающих все аспекты инженерной деятельности, потребовало создания всеобъемлющей абстрактной теории систем, которая могла бы привлекаться для решения проблем, возникающих в любой из технических наук, вне зависимости от конкретных физических законов, описывающих объекты этих наук. Математика обеспечила создание необходимого формального аппарата, и в результате возникла новая дисциплина, получившая название *теории систем,* составной частью которой стала теория систем управления.

### 1.1.1. Теория систем

Наиболее целесообразно начать знакомство с теорией систем с представления ее фундаментальных понятий, т. е. понятий системы и состояния системы. В [54] определяют систему как «множество объектов, объединенных некоторой формой взаимозависимости», а состояние системы в некоторый момент времени — как «информацию, необходимую для предсказания поведения системы в любой момент в будущем». К сожалению, эти определения нельзя назвать функциональными, так как они недостаточно конкретны с математической точки зрения, чтобы их можно было использовать при построении математической модели. Например, если следовать первому определению, то к системам может быть отнесено все что угодно, да и определение состояния слишком расплывчато для практического использования.

Более строгое математическое определение этих терминов дано Заде [137].

*Определение 1.* Система создается как множество упорядоченных пар функций времени, описывающих ее входные и выходные воздействия и определяющих ее *абстрактные объекты.* При этом должно

выполняться условие, согласно которому если одна из пар принадлежит системе, то и любой ее сегмент принадлежит системе.

Это определение характеризует каждый абстрактный объект или систему не физическими свойствами, специфическими для конкретного процесса, а определенной связью между входом и выходом. Таким образом, различные системы можно рассматривать как целое, учитывая лишь определяемые ими причинные связи, что позволяет обеспечить единый подход к широкому кругу задач. Для того чтобы структуру системы можно было описывать математически, необходимо дополнительно ввести следующие определения:

*Определение 2.* Текущее *состояние* системы можно рассматривать как минимальное количество информации а ее прошлом, которое необходимо для полного описания будущего поведения системы (т. е. ее выходов) при условии, что входные воздействия на систему в настоящем и будущем известны.

*Определение 3.* Переменная состояния есть зависящая от времени математическая переменная, которая полностью описывает состояние системы.

Используя эти определения, можно приближенно описать систему набором уравнений, позволяющих вычислять состояние или выход системы в будущем, если известно ее текущее состояние и входные воздействия в прошлом, настоящем и будущем.

Однако во многих случаях состояниям системы можно с определенной вероятностью поставить в соответствие любые значения из некоторого множества. Кроме того, недетерминированная среда может обусловливать случайные входные воздействия на систему. В таких ситуациях будущее поведение системы можно прогнозировать лишь с определенной степенью вероятности, и тогда система называется *стохастической.* Если описание системы отличается неопределенностью и она функционирует в стохастической среде и если по мере развития процесса эту неопределенность можно уменьшить, то система называется *обучающейся.* Если система способна выполнять более сложные интеллектуальные задачи, например осуществлять принятие решений, планирование и т. п., то она называется *интеллектуальной* [102].

### 1.1.2. Развитие систем автоматического управления

Теория систем автоматического управления обычно считается одним из разделов теории систем. Начало современному развитию автоматического управления было положено во время Второй мировой войны и в послевоенные годы. Особая заслуга в этом принадлежит таким выдающимся ученым и инженерам, как Винер, Ляпунов, Боде, Никольс, Попов, Найквист, Понтрягин, Калман, Фельдбаум и др. [45, 59, 82, 92, 116, 121, 124]. Благодаря их усилиям автоматическое управление оформилось в самостоятельное научное направление, став одной из интереснейших областей теории систем. Применения теории автоматического управления разнообразны: с ее помощью человек побывал на Луне и проник в космическое пространство, на ее основе создаются системы управления для биомедицинских и бионических устройств. В разные периоды времени для анализа процессов автоматического управления использовались различные математические методы. В результате методы управления получали различные названия и описания, определяемые вкусами их создателей. Для более правильной оценки всех этих подходов нам понадобится следующее определение [12]:

*Определение 4.* Управление процессом представляет собой воздействие на объект, позволяющее эффективно достигать намеченной цели.

Слова «эффективно» и «цель» использованы здесь в широком смысле и могут означать соответствие техническим условиям или — в случае оптимального управления — оптимальность по тому или иному критерию качества.

Первые попытки решить сформулированную выше проблему управления состояли в том, чтобы воздействовать на систему по рассчитанной заранее программе так, чтобы система достигала поставленной цели. Этот подход называется *разомкнутым управлением.* Следующий шаг был сделан, когда в электронных усилителях начал применяться принцип, использовавшийся ранее в регуляторах паровых машин и заключающийся в том, что *реальный выход системы сравнивается с требуемым выходом или задающим воздействием и их разность используется в качестве управляющего воздействия* [92]. Этот принцип получил название управления с обратной связью, при котором осуществляется *оперативная* коррекция управляющего воз-

действия, позволяющая достигнуть желаемой цели без всякого внешнего вмешательства. Управление с обратной связью – это новая эра автоматизации. Однако для того, чтобы реализовать новые идеи и найти способы управления системами, которые ранее считались неуправляемыми, потребовались более тонкие подходы. Была предложена идея *оптимального управления,* при котором все проектные требования объединяются в *критерий качества* (в форме функционала потерь). В этом случае задача управления решается посредством применения вариационных методов, позволяющих отыскивать минимум критерия качества [6, 15, 96, 104, 119, 120]. Математическое изящество теории и возможность реализации соответствующих алгоритмов на ЭВМ обеспечили этому подходу широкую популярность. Тем не менее продолжающееся развитие техники обусловило необходимость исследования систем с еще более сложной структурой, например систем, в которых на объект управления влияют непредсказуемые воздействия или в которых происходят вариации параметров с известными статистическими свойствами. В связи с этим была поставлена задача *стохастического управления,* сформулированная и решаемая с помощью чрезвычайно сложных математических методов [4, 44, 83, 99, 120, 127, 131].

*Определение 5.* Задача стохастического управления — это задача, в которой неопределенности, присущие исследуемому объекту, статистически *несводимы* к измеримым в ходе развития процесса управления величинам.

Существует большой класс систем управления, качество работы которых резко падает, как только изменения характеристик окружающей среды выходят за рамки диапазона компенсации обычного регулятора с обратной связью. Качество работы других систем управления оказывается неудовлетворительным из-за слишком упрощенного или неточного моделирования поведения системы. В обоих случаях проблема возникает в силу неопределенностей описания системы или неточностей представления сигналов, статистические свойства которых заранее неизвестны. Разработано много систем, в которых предусмотрена автоматическая компенсация ухудшения качества регулирования за счет таких эффектов. Для этого в системе автоматически должны производиться такие же изменения, которые внес бы разработчик, если бы он получил дополнительную информацию о ее поведении.

В последние годы появился достаточно широкий спектр вопросов, относящихся к системам управления городским хозяйством, социально-экономическими системами, системами транспорта и связи, биомедицинскими системами, нанотехнологиям и т. п. Можно надеяться, что с помощью теории систем удастся найти общие решения разнообразных проблем, возникших в результате научно-технической революции в современном мире. Однако для успешного решения проблем в новых областях требуется несколько скорректировать сложившиеся теоретические представления. Необходимость такого пересмотра связана с тем, что, в отличие от ранее известных систем, описываемых относительно простыми законами физики, точные модели сложных систем нового типа *неизвестны*. Для поиска эффективных методов решения новых задач потребовалось создать научную дисциплину, которая была бы применима к такого рода системам. В литературе появилось описание многих подобных методов, которым давались самые разные названия: адаптивные, оптимизирующиеся, самонастраивающиеся и т. п. Порой из-за различий в теоретических предпосылках эти методы противопоставлялись друг другу. Чтобы избежать путаницы, которая могла бы возникнуть при описании отдельных методов, была создана новая дисциплина, включающая в себя большую часть этих методов и дающая простор для более широкой интерпретации подходов к исследованию систем с недоопределенными моделями [127].

*Теория самоорганизующихся систем управления (ССУ)* – это раздел теории управления, специально предназначенный для управления объектами с полностью или частично неизвестной динамикой, функционирующими в детерминированной или стохастической среде. В том случае, когда неопределенности можно считать *устранимыми,* теория ССУ требует явной или неявной идентификации объекта управления, а во многих случаях и автоматизированного моделирования неизвестных систем в реальном масштабе времени. Полученная информация используется для подстройки регулятора, в результате которой система управляется в квазиоптимальном режиме. Эта дисциплина сравнительно недавно обрела достаточную зрелость, позволяющую изложить ее в систематизированном виде [127].

*Теорию обучающихся систем управления* можно рассматривать как раздел теории ССУ, она посвящена одной из наиболее совершенных форм управления среди разрабатываемых в настоящее время. По

сути дела в ее основе лежат попытки построить поведенческие модели процессов принятия решений.

Обучающиеся системы управления можно также рассматривать и как первый шаг на пути к *интеллектуальному управлению* — управлению будущего. Такие системы управления могли бы приблизиться к человеческому разуму в принятии решений и планировании стратегий управления; они могли бы обучаться новым действиям путем тренировки и выполнять другие интеллектуальные функции в тех случаях, когда в силу особенностей окружающей обстановки присутствие человека-оператора недопустимо или не оправдано.

Таким образом, теория ССУ определяет современный уровень развития теории систем управления, а интеллектуальное управление представляет собой перспективное направление — будущее этой области. Для обоснования этого утверждения в следующих разделах будет дано понятие «обучающихся» систем и теории самоорганизации в системах с недоопределенными моделями.

## 1.2. АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время не существует общепринятого точного определения адаптивного управления, можно считать, что адаптивное управление – это управление системами с неопределенными параметрами, причем управляющее устройство содержит подсистему текущего оценивания значений неизвестных параметров или структуры системы, а также подсистему, вырабатывающую соответствующие управляющие воздействия на основе произведенных оценок значений параметров или структуры системы [12].

Для разделов теории управления, рассматривающих системы более сложные, чем системы стохастического управления, было предложено несколько названий. Наиболее популярное — «адаптивное управление» [92, 131] —заимствовано из психологии и физиологии и должно указывать на то, что этот метод имитирует некоторые аспекты поведения живых систем. Другие названия — «самооптимизирующееся» [119], «оптимизирующее» [136], «самоорганизующееся» [110] и т. д.— базировались в основном на технических соображениях и не получили достаточно широкого признания. Поскольку эти термины использовались применительно к большому числу методов, на первый взгляд не имеющих ничего общего, они стали предметом

многочисленных споров и недоразумений. Однако главная сложность состоит в том, что ни одно из данных этим методам определений не является настолько общим, чтобы охватить направления всех ведущихся в указанной области работ.

Один из первых примеров адаптивного управления привели Дрейпер и Ли. Они рассмотрели систему управления, способную оптимизировать работу двигателя внутреннего сгорания, несмотря на неопределенность вида рабочих характеристик. Такой тип системы управления, который автоматически ищет оптимальную рабочую точку, называется, *оптимизирующей системой управления* или иногда системой, *поддерживающей максимум*.

Другой важный класс адаптивных систем управления был введен Уитекером с сотрудниками. Уитекер и его коллеги использовали модель поведения идеальной системы для получения сигналов ошибки, обусловленных отличием действительного поведения системы от требуемого; эти сигналы затем служили для модификации параметров управляющего устройства таким образом, чтобы, насколько это возможно, поддерживать идеальное поведение, несмотря на точно неизвестную и изменяющуюся динамику системы. Системы управления такого типа называются *адаптивными системами управления с эталонной моделью*. Уже с 1959 г. эти системы применялись в авиационных системах управления полетами [52].

В 1960 г. Ли и Вандер Велде описали еще один тип адаптивных систем управления, работающих по принципу автоматической компенсации изменчивости параметров с помощью автоколебаний в замкнутом контуре управления. Система такого типа называется *самоосциллирующей адаптивной системой*. Несколько схожий подход к построению адаптивных систем был предложен Петровым, Лановым и Емельяновым. Метод Петрова и его коллег основан на инвариантности траектории системы по отношению к значениям параметров в случае, когда управляющее воздействие определяется переключающейся функцией и реле. Поведение системы при этом характеризуется движением по переключающей поверхности и называется *скользящим режимом*. Адаптивные системы такого типа называются *системами с переменной структурой* [21].

Методы построения адаптивных систем, рассмотренных выше, ограничены рамками детерминированного подхода. Иначе говоря, в этих методах не используются вероятностные величины. Неопреде-

ленность в этом классе задач описывается детерминированным образом, например, вводится внутренняя неопределенность значений параметров.

Теория адаптивного управления базируется на различных эвристических или полуэвристических концепциях. Она открывает другой путь решения задачи управления в условиях неопределенности. Трудность заключается в том, что эти системы очень разнообразны, неоднотипны и порой необязательны. Известно, что некоторые из адаптивных систем управления можно без ущерба для качества работы заменить обычными, хотя и весьма сложными системами управления с обратной связью [92]. Примеры адаптивных систем управления показаны на рис. 1.1, 1.2.

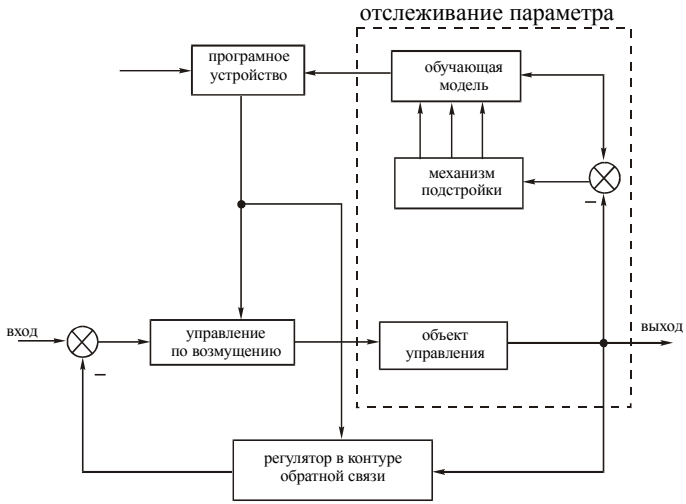


Рис. 1.1. Структурная схема адаптивной системы управления с отслеживанием параметров

Свойство самоорганизации, которое необходимо для управления системами с устранимыми неопределенностями, можно рассматривать как способность системы к обучению. Способность к улучшению модели и к идентификации системы по мере развития процесса управления — это, несомненно, новое свойство управляющего устройства, при котором его работа отдаленно напоминает действия че-

ловека-оператора. Это соображение можно положить в основу нового направления — теории систем управления, в которых обучение, обеспечиваемое за счет использования ЭВМ, представляет собой одно из главных свойств [101]. Уже создан целый ряд обучающихся систем управления на базе сверхбыстродействующих ЭВМ, которые можно научить принимать сложные решения в незнакомой обстановке [62, 84, 103].

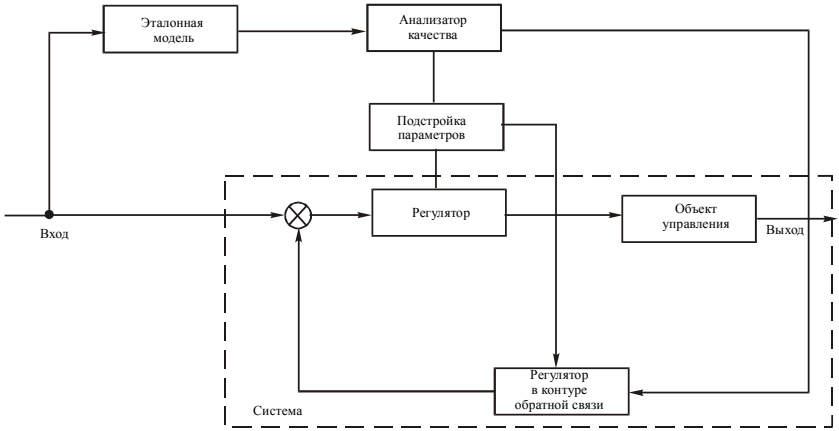


Рис. 1.2. Обобщенная структурная схема адаптивной системы управления с эталонной моделью

Самоорганизация со свойственным ей накоплением информации, направленным 'на оперативное улучшение работы системы в ходе процесса управления, может рассматриваться как первый шаг к созданию обучающихся систем и систем интеллектуального управления с расширенными возможностями.

Для анализа свойств *устойчивости* и *сходимости* детерминированных адаптивных систем использовалось большое число математических методов – *функции Ляпунова, градиентные методы, сжатые отображения* и т. д. Тем не менее только введение стохастических моделей для описания неопределенности, использующих соответственно вероятностные меры, привело к более широкому рассмотрению адаптивных систем. В 1960 г. Беллман в США и Фельдбаум в СССР использовали принципы динамического программирования с целью построения управляющего устройства с вероятностными неопреде-

ленностями. Интересный двойственный характер управляющих воздействий был отмечен Фельдбаумом: идентификация (оценивание параметров) и воздействия (управления). Это привело к появлению термина *дуальное управление* [61].

Лайниотис Д.Г. в 1971 г. ввел подход, использующий *разделение* для адаптивного управления. Другой интересный подход к построению адаптивного управления базируется на *управлении с самоорганизацией*.

Независимо от использования для построения адаптивных систем управления детерминированного или стохастического подхода в результате обычно получают сложное нелинейное управляющее устройство даже для линейной модели управляемой системы. Очень простой линейный подход к линейным моделям, восходящий к работе Боде, использует для компенсации неопределенностей системы фиксированные большие коэффициенты усиления петли обратной связи. Сравнительный анализ адаптивных (нелинейных) систем и линейных систем с большим коэффициентом усиления дан в работе К. Ларка-Горовица.

Адаптивные системы находят важные практические приложения в настоящем и открывают широкие перспективы интенсивного применения в будущем.

Теория оптимальных систем представляет собой важную ветвь общей теории оптимизации, имеющую большое теоретическое и практическое применение. Как одна из задач оптимизации, построение оптимальных систем предполагает наличие трех основных элементов:

а) математической модели, являющейся математической абстракцией реальной физической ситуации;

б) критерия качества, являющегося математическим выражением цели построения системы;

с) условий оптимизаций, налагаемых физическими, экономическими и реализационными соображениями.

Среди перечисленных трех элементов наиболее важную роль играет математическая модель, связывающая реальную ситуацию, для которой строится оптимальная система с положенной в основу этого построения математической моделью. Безусловно, характеристики построенной «оптимальной» системы всецело зависят от той точности, с которой математическая модель приближает реальную «физи-

ческую» ситуацию. При неадаптивном подходе к построению оптимальных систем предполагается, что модель полностью известна. К сожалению, в большинстве реальных ситуаций полное знание модели отсутствует и получить его, в особенности априорно, нелегко. Таким образом, возникает задача построения оптимальной системы (например, управления) при неполном знании модели. Если к тому же необходимо строить систему в реальном времени или в условиях, когда данные еще продолжают поступать, то возникает проблема адаптации.

В зависимости от выбранного критерия проблемы адаптации можно классифицировать самым различным образом. В частности, они могут классифицироваться в соответствии :

а) целями построения системы и соответствующими критериями качества (например, системы управления с квадратичным функционалом качества, системы оценивания со среднеквадратичным критерием качества, системы принятия решений и распознавания образов с критерием качества в виде вероятности ошибки и т.п.);

б) характером используемой математической модели (например, модель линейная, с распределенным параметром, дискретная и т. п.);

с) природой неопределенности модели (например, параметрическая или структурная, стационарная или нестационарная неопределенность);

д) с характером условий, наложенных на искомую систему (например, линейное незамкнутое управление с обратной связью и т. п.), или в соответствии с характером процесса адаптации.

### 1.2.1. Принятие решений при наличии устранимых неопределенностей

Теория стохастического оптимального управления была разработана в расчете на то, чтобы дать возможность рассматривать объекты, функционирующие в случайной среде, характеристики которой установлены вероятностными или статистическими методами. В большинстве случаев вероятностный характер управляемых процессов бывает обусловлен невозможностью точного описания окружающей среды, и если соответствующие плотности вероятности уже вычислены, дальнейшее уточнение моделирования среды просто невозможно.

В более сложных системах, которые встречаются как в современной технике, так и в других областях системных исследований, нередко приходится сталкиваться с другим типом неопределенностей, которые связаны с тем, что во время разработки проекта проектировщик не обладает достаточной информацией.

Такую неосведомленность можно устранить, наблюдая за развитием реального процесса. Возможность устранения неопределенностей, несомненно, проявляется в результате обобщения идей, лежащих в основе управления с обратной связью [5, 59, 64, 127]. При этом подходе процедура проектирования как бы продолжается уже в ходе наблюдения за развитием реального процесса, что позволяет восполнить пробелы в априорной информации, вызванные частичной неосведомленностью. Современная методика проектирования должна предусматривать некоторые возможности самоорганизации для уменьшения роли неопределенностей, влияющих на работу системы. Впрочем, не все исследователи, работающие в этой области, разделяют такую точку зрения. Класс законов управления, рассчитанных на работу в ситуациях, где неопределенности необходимо учитывать в ходе проектирования, вошел в литературу под названием *адаптивного управления.* Эти законы, безусловно, используют идеи самоорганизации, поскольку многие из них были разработаны для автоматической коррекции некоторых параметров регуляторов при сильных 'изменениях внешних условий, влияющих на характеристики системы. Вытекающие отсюда концепции, систематизированные в рамках более широкой теории «самоорганизации», изложены ниже. Попытка математически строгого решения задач со встроенной самоорганизацией была предпринята Фельдбаумом в его знаменитой работе [59, 60], в которой он дал своему методу название *дуального управления.* Им впервые был предложен подход, при котором управляющее устройство использовало «активную» информацию о процессе, что позволяло уменьшать неопределенность в модели объекта и одновременно формировало управляющее действие дли контура обратной связи. Однако, поскольку теория ставила требование обеспечить оптимальность переходных процессов в системе, полученные алгоритмы оказались слишком сложными для реализации.

### 1.2.2. Моделирование и идентификация систем

Отличительной особенностью самоорганизации, направленной на уменьшение неопределенности в модельном представлении объекта управления, является оперативное улучшение качества модели системы. Процесс моделирования может состоять в *структурной идентификации* (когда неизвестна структура объекта управления и лежащие в ее основе физические законы) или в *параметрической идентификации* (если неопределенности в представлении объекта можно свести к неопределенности векторного параметра) [13, 50, 70].

Если характер функционирования объекта управления полностью неизвестен, задача оперативной структурной идентификации оказывается необычайно трудной, поскольку она включает в себя идентификацию имеющихся нелинейностей, их локализацию, выявление порядка и связей различных частей системы. К тому же для выполнения всех этих операций не существует строгой математической процедуры. Саридисом и Хофштадтером [127] был предложен полуэвристический метод классификации нелинейностей в зависимости от их типа (например, от класса характеристик насыщения и их относительной локализации в объекте). В принципе этот метод может быть реализован и в самом контуре управления, но в общем случае он требует больших затрат машинного времени и, следовательно, непригоден для идентификации такого рода. Однако автономно данный метод можно использовать с большим успехом. Другой подход к решению задачи структурной идентификации состоит в использовании автономного представления характеристик объекта в виде разложения по какой-то системе функций с подстраиваемыми коэффициентами. К сожалению, для получения удовлетворительной модели в этом случае требуется большое число членов, а структура модели не отражает особенностей структуры физического объекта. В целом можно сказать, что задача структурной идентификации исследована еще недостаточно успешное использование структурной идентификации в системах ССУ — дело будущего.

Последние несколько лет ведутся интенсивные исследования в области параметрической идентификации в контуре управления, и в литературе описано большое число соответствующих алгоритмов [95, 100, 109, 124, 127].

В процессе самоорганизации системы управления идентификация системы может не выступать в явном виде. Дело в том, что иногда всю информацию, не имеющую прямого отношения к улучшению качества работы системы, считают избыточной. В таких случаях можно сказать, что идентификация проводится неявно, поскольку накопленная информация об объекте используется управляющим устройством без всякого промежуточного моделирования. Концепция идентификации системы охватывает большую часть так называемых «адаптивных» и «обучающихся» алгоритмов управления, которые в различном виде встречаются в литературе [83, 90, 114, 115].

### 1.2.3. Параллельные процессы

Достижения в развитии аппаратных средств вычислительной техники не дали интенсивного толчка в параллельном программировании. В настоящее время тенденция пока такова, – где раньше нужен был кластер, его заменит многоядерный процессор. Но аппаратная поддержка потоков в пределах одного ядра, а затем их перенос на множество ядер – лишь эволюционный путь развития концепции параллелизма. Простым размножением ядер существующих проблем проектирования параллельных систем не решить, да и «виртуальный параллелизм» — вечная проблема, так как сколько бы ни было ядер, всегда найдется задача, которая потребует хотя бы на один процесс (и соответственно ядро) больше [35].

Имеется богатый опыт использования разных моделей вычислений [39]. Если говорить о поточных параллельных моделях, в основе которых лежит модель Хоара, существуют удобства для описания протоколов, а не для детального описания алгоритмов. И причина этого в том, что Хоар отказался сделать математически строгий анализ своего же решения.

Существует еще вариант — сети Петри, которые, несмотря на свою известность, до сих пор не вошли в практику параллельного программирования, потому что исходное назначение сетей Петри — моделирование, а не реализация алгоритмов.

Следующий вариант сетевой модели — сеть на базе конечных автоматов. Еще фон Нейман рассматривал модель параллельных вычислений — автомат и (или) разные варианты клеточных автоматов. Обладая не меньшей мощностью, чем сети Петри, автоматы отлича-

ются в лучшую сторону простотой понимания, структурной ясностью, обширной и проверенной временем теорией. Сегодня, после некоторого охлаждения к автоматам, программисты вновь обратили на них свои взоры. На автоматной модели базируется популярный язык моделирования UML и отечественные технологии проектирования программ SWITCH и КА [66].

Но не только программистов привлекают автоматы. Хороший пример их приложения – теоретические работы О.Л. Бандман о применении клеточных автоматов для моделирования пространственной динамики [8].

Перспективным является применение автоматов в нанотехнологиях — клеточные автоматы на квантовых точках.

Есть важный момент, относящийся к физике реальных параллельных процессов, который не учитывается почти во всех моделях программ, — реальное время. В последовательных вычислениях его можно не учитывать, но совсем иная роль времени отведена в параллельных вычислениях, в которых взаимное изменение скорости работы процессов способно повлиять на результат. Без синхронизации почти неизбежны потери промежуточных результатов или искажение конечного результата.

В абстрактном времени корректнее сравнивать эффективность разных алгоритмов. Но важнее то, что единое абстрактное время позволяет определить алгебру автоматов, без которой о каких-либо математических операциях, решении задач анализа и синтеза параллельных систем говорить сложно, если вообще возможно. И пока физическая природа реального времени остается непознанной, мы имеем полное право на формальном уровне для множества объектов считать его не только дискретным, но и единым. Это как минимум удобно с формальной точки зрения и с точки зрения практики синтеза дискретных устройств (в том числе и многоядерных процессоров).

## 1.3. ОБУЧАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

### 1.3.1. Определения

Название «обучающиеся системы» было дано системам, решающим определенные задачи с использованием поведенческого подхода. В круг этих задач входят проблемы разной сложности — от про-

стого управления системами с неопределенностями в динамике до принятия решений в сложной обстановке, распознавания образов, классификации, организации и т. п. [78, 91, 103]. Таким образом, это название относится к классу систем более сложных, чем системы управления. Однако подкласс обучающихся систем управления с технической точки зрения можно приравнять к классу ССУ с качественной адаптацией. Это класс управляющих устройств, предназначенных для управления полностью или частично неопределенными системами с использованием оперативного «обучения без учителя». Такое перекрытие двух понятий образует звено, которое связывает теорию самоорганизации с теорией обучающихся систем. С другой стороны, отметив, что ССУ обладают некоторой элементарной способностью к обучению, можно рассматривать самоорганизующиеся системы как часть более широкого семейства обучающихся систем, которые в принципе могут решать задачи, значительно превышающие по сложности те, с которыми мы обычно сталкиваемся в технических приложениях. Структурная схема типичной обучающейся системы приведена на рис. 1.3.

Уточнить понятия «обучающиеся системы» и «обучающиеся системы управления» призваны следующие определения [65, 78, 101, 127]:

*Обучающиеся системы.* «Система называется *обучающейся*, если она способна усваивать информацию о неизвестных свойствах объекта или внешней среды, и накопленный ею опыт, используемый впоследствии для оценивания, классификации, принятия решений или управления, приводит в конечном счете к улучшению качества работы системы».

*Обучающиеся системы управления* (ОСУ). «Обучающаяся система называется обучающейся системой управления, если накопленная информация используется для управления процессом с неизвестными свойствами. Если обучение осуществляется автономно, то управляющее устройство считается обучаемым, если же' оно проводится оперативно, т. е. параллельно с управлением, то термин «обучающаяся система управления» является синонимом ССУ с качественной адаптацией при условии, что ОСУ управляет объектами того же типа».

Согласно определению к числу обучающихся относятся системы, в которых имеет место динамическое накопление информации «с учителем» или без него, т. е. или *автономно*, или *оперативно* [65,

103, 108]. Эта информация используется для улучшения понимания свойств объекта управления с целью принятия сложных решений и вообще с целью имитации некоторых простейших «поведенческих» функций человека-оператора. Данная область включает в себя исследования обучающихся систем управления, распознавание образов, теории автоматов, классификации организации и т. п. В применении к техническим процессам *оперативно* обучающиеся системы управления удовлетворяют определениям ССУ с качественной адаптацией. Перекрытие понятий позволяет установить взаимосвязь между теорией ССУ и теорией обучающихся систем, а с другой стороны, указывает следующий этап развития теории систем автоматического управления. Наиболее вероятно, что этим этапом будет включение в обучающиеся системы сложных устройств для принятия решений. Такие системы вне зависимости от того, будут ли они полностью автоматическими или человеко-машинными, должны принимать решения высокого уровня сложности, например, обучаться новым действиям и изменять формы поведения при изменении условий, грубо имитируя таким образом функции человека-оператора [65, 90, 102, 127]

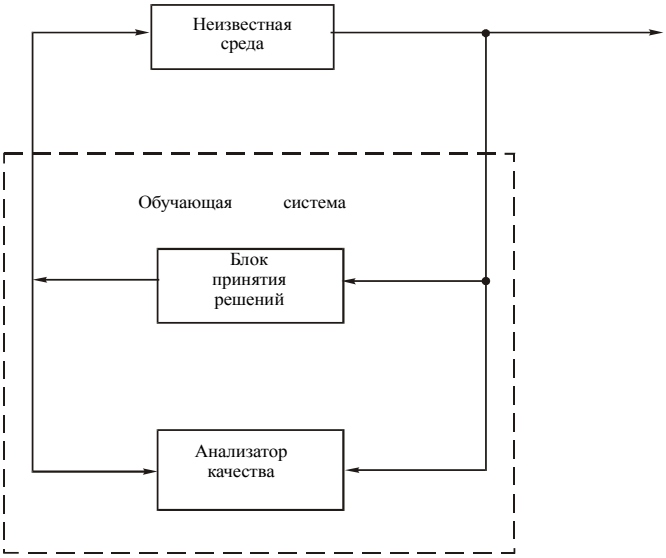


Рис. 1.3. Структурная схема обучающейся системы

Исследование высокосложных систем, использующих современные устройства для принятия решений, относится к научному направлению, именуемому «искусственным интеллектом» [84, 113]. Такие системы, реализуемые с помощью современных компьютеров высокого быстродействия, способны решать задачи, идентифицировать объекты и планировать стратегию выполнения весьма сложных операций.

### 1.3.2. Методология проектирования обучающихся систем

Помимо управления обучающиеся системы должны уметь осуществлять и ряд других функций, имитирующих простейшие функции разумного существа, – распознавать образы, хранить информацию и осуществлять ее поиск, принимать простые решения при неполной информации об объекте, функционирующем в случайной среде, и т. п. Поскольку большая часть этих методов предназначена лишь для имитации простейших интеллектуальных функций, таких как рефлексы разумного существа, для их реализации оказались достаточными простые методы последовательной статистической аппроксимации или последовательного вероятностного оценивания [102]. Теория аппроксимации вообще оказалась весьма полезной для теории обучающихся систем. При этом делаются различные предположения о характере знаний о процессе и соответствующая информация о качестве работы системы получается с помощью разнообразных аналитических методов. К числу наиболее распространенных математических схем, используемых для исследования процессов обучения, можно отнести [103]:.

1) обучаемые системы, использующие классификаторы образов;
2) системы обучения с подкреплением;
3) бейесовское оценивание;
4) стохастическую аппроксимацию;
5) модели стохастических автоматов;
6) модели нечетких автоматов;
7) лингвистические методы.

Из литературных источников [130] известно применение первых пяти методов в теории ОСУ с качественной адаптацией. Все эти методы нашли применение в различных процессах принятия решений с использованием высшего уровня машинного интеллекта — в распо-

знавании образов, анализе сцен, распознавании речи и т. п. Ввиду их способности выполнять «интеллектуальные» функции такие алгоритмы могут служить компонентами структуры высших уровней систем автоматического управления — *систем управления с иерархической организацией* интеллекта.

Наконец, было предложено использовать теорию обучающихся систем для аналитического решения проблем, возникающих в гуманитарных науках, которые занимаются анализом общественных, экологических, политических и других систем [105]. Несмотря на спорность такого подхода и на то, что попытки аналитического решения пока не дали ощутимых результатов, в этой области по-прежнему продолжаются интенсивные изыскания [97, 111, 126]. Теория обучающихся систем может служить для представления и оценки социально-экономических и других аспектов поведения систем, которые с трудом описываются обычными аналитическими методами.

## 1.4. САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Согласно определению [24, 72] термин ССУ употребляется для описания *систем,* характерные черты которых «выходят за рамки систем стохастического управления». В качестве общей основы в определениях использовано наличие неопределенностей в системе и способность системы к накоплению информации, за счет чего удалось сделать определение приемлемым для всех специалистов в данной области. В названии дисциплины сохранена двойственность, указывающая на то, что рассматриваемые проблемы имеют две стороны – «техническую» и «поведенческую», а ее единство подчеркивается путем описания единой области применений. Название «самоорганизующийся процесс управления» используется для описания технических проблем, так как это название подразумевает проведение оперативных структурных и параметрических перестроек в системе. Термин «адаптивный» используется как прилагательное для описания типа адаптации, имеющего место в системе. Понятие идентификации и требование наличия памяти, которые многими исследователями рассматриваются как ключевые моменты для данной отрасли, неявно подразумеваются в словах «накопление информации» и «обучение».

Далее приведены определения самоорганизующегося процесса управления и управляющего устройства [72].

*Самоорганизующийся процесс управления. «*Процесс управления-называется *самоорганизующимся,* если уменьшение априорной неопределенности, ведущее к увеличению эффективности управления объектом, достигается за счет использования информации, получаемой из последовательных наблюдений доступных измерению входов и выходов системы в процессе управления».

*Самоорганизующееся управляющее устройство. «*Управляющее устройство, предназначенное для реализации самоорганизующегося процесса управления, называется *самоорганизующимся,* если оно оперативно уменьшает априорные неопределенности, повышая эффективность управления объектом по мере развития процесса».

Слово «оптимальный» в определениях заменено словами «эффективный» и «улучшающийся», так как во многих случаях строгая оптимальность недостижима. Отсутствуют явные указания на детерминистскую или стохастическую природу неопределенностей, так что формулировки равно приложимы к обоим классам задач.

Ранее упоминалось, что самоорганизация осуществляется либо путем уменьшения неопределенности в динамике объекта (в случае, когда имеется явная схема идентификации), либо путем уменьшения' неопределенности, прямо связанного с улучшением качества работы системы. В последнем случае информация, полученная в ходе наблюдения за объектом управления, непосредственно используется управляющим устройством и соответствующим устройством оценивания качества управления. В целях уточнения различий между двумя категориями ССУ, отражающими два разных подхода к проектированию, здесь приводятся два определения, в которых для описания соответствующей функции используется термин «адаптивный».

*Процесс ССУ с параметрической адаптацией. «*Самоорганизующийся процесс управления называется процессом ССУ *с параметрической адаптацией,* если в ходе управления можно уменьшить априорные неопределенности в векторе параметров, характеризующем объект, за счет последовательных наблюдений за входами и выходами».

*ССУ с качественной адаптацией. «*Самоорганизующийся процесс управления называется процессом ССУ *с качественной адаптацией,* если в ходе управления системой можно непосредственно уменьшить

неопределенности с целью улучшения качества процесса за счет последовательных наблюдений за входами и выходами».

*Самоорганизующееся управляющее устройство с параметрической адаптацией*. «Самоорганизующееся управляющее устройство называется устройством с параметрической адаптацией, если в ходе управления оно оперативно осуществляет уменьшение неопределенности в векторе параметров за счет последовательных наблюдений за входами и выходами системы».

*Самоорганизующееся управляющее устройство с качественной адаптацией. «*Самоорганизующееся управляющее устройство называется устройством *с качественной адаптацией,* если в ходе управления оно осуществляет уменьшение неопределенностей, непосредственно ведущее к улучшению качества процесса за счет последовательных наблюдений за входами и выходами системы».

## 1.5. ОСНОВЫ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

### 1.5.1. Введение

В основе алгоритмов ССУ лежат подходы, которые по степени сложности стоят в иерархии методов управления очень высоко. Они разработаны исключительно для систем, требующих применения сложных законов управления, что обуславливается с существованием неопределенностей в динамике этих систем и в их связях с окружающей средой. Эти алгоритмы наделены способностью принятия обоснованных решений в неизвестных заранее внешних условиях. Однако в силу их аналитической структуры применимость алгоритмов ССУ для эффективного автономного управления резко ограничена системами с большими непредсказуемыми изменениями в параметрах взаимодействия между средой и объектом управления. Как известно, по своему разнообразию создаваемые ныне системы намного превосходят прежние, они оперируют задачами, которые требуют наличия «интеллектуальных» способностей и возможности принятия сложных решений в неопределенных, нестационарных условиях. В теории систем к их числу относятся системы с человеком-оператором, интерактивные системы, устройства искусственного интеллекта, робототехнические устройства, дистанционные манипуляторы, устройства

автоматизации производственных процессов, аппаратура для исследований в опасных для человека условиях, обучающиеся протезы и бионические системы [38, 40].

Для решения проблем, которые требуют систем управления с такими интеллектуальными функциями, как одновременное использование памяти, обучение и многоуровневое принятие решений в ответ на «нечеткие» и качественные команды, необходимо новое поколение управляющих устройств с более широкими возможностями.

Лучше всего взять за образец человеческий мозг, так как на сегодня это, несомненно, самый «интеллектуальный» из известных нам регуляторов. Многие характеристики мозга известны по результатам специальных исследований [79, 80, 113, 117].

Обучающиеся системы рассматриваются как класс систем, способных воспроизводить простейшие поведенческие функции живых организмов. В этом качестве их можно рассматривать как частный класс систем, принадлежащих к области, называемой специалистами «искусственным интеллектом» [84, 113].

Эта область очень широка и охватывает интеллектуальные функции современной компьютеров, пытающихся воспроизвести некоторые черты разумного поведения человека, и *бионические системы,* т. е. искусственные устройства, которые имитируют интеллектуальные функции биологических систем. Таким образом, бионические системы также можно отнести к области искусственного интеллекта, представляющего высший уровень иерархии систем, созданных человеком. С точки зрения управления бионические системы рассматриваются как *интеллектуальные управляющие устройства* [102]. Примерами использования бионических систем являются процессы с человеком-оператором, человеко-машинные интерактивные системы управления типа дистанционных манипуляторов и т. п., а также интегральные робототехнические системы [4, 77, 85, 106, 129]. *Нечеткие автоматы и формальные языки,* принадлежащие к классу высокоинтеллектуальных методологий, играют важную роль при создании систем управления с иерархической организацией интеллекта.

*Нечеткий автомат* [76, 118, 137] представляет собой обучающееся устройство со способностью к принятию решений, которое может оперировать с нечетко сформулированными командами и, таким образом, пригодно для использования в качестве части многоуровневой системы организации и координации управления.

*Формальный язык* — это машинный язык высокого уровня, в основе которого лежит некоторая грамматика, определяющая структуру фразы, связанная с математической структурой, способной описать этот язык. Синтаксические методы, близкие к методам, применяемым в языкознании, могут быть использованы для описания, композиции и даже генерирования качественных команд в соответствии с запрограммированной или наработанной логикой [132].

### 1.5.2. Человеко-машинные системы управления

Человеко-машинные (полумашинные) системы управления были созданы главным образом для имитации функций человека-оператора, например для выполнения операций манипулирования с объектами на большом удалении или в опасной для человека среде. Примерами таких действий могут служить управление автоматом для исследования поверхности Марса и операции с радиоактивными веществами [77]. Машинная часть регулятора до некоторой степени автономна, т. е. в ней предусмотрена способность к тренировке, элементарные способности к обучению и возможность самостоятельного принятия решений в простейших ситуациях.

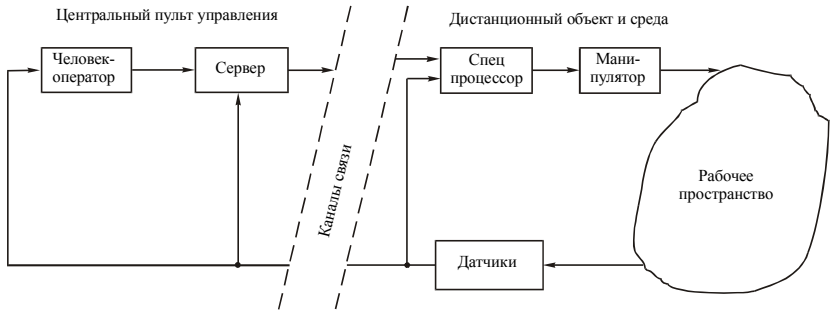


Рис. 1.4. Структурная схема дистанционного манипулятора с человеко-машинным управлением

Другими словами, простые управленческие задачи как адаптивного характера, так и связанные с обучением могут выполняться компьютером, в то время как более сложные задачи — принятие ответственных решений, координация движений и т. п.— решаются человеком-оператором. Благодаря способности к обучению компьютер по-

степенно будет брать на себя принятие решений в ряде ситуаций, где ранее решения принимал человек. Принцип действия такой системы иллюстрирует структурная схема рис. 1.4.

### 1.5.3. Интегральные роботы

Интегральным роботом называется универсальная интеллектуальная система с антропоморфными функциями, которая работает в некоторой среде без оперативной помощи человека-оператора и улучшает свои характеристики без внешнего контроля.

Ясно, что это наиболее смелый из современных технических проектов, так как он предусматривает создание устройства, способного эффективно выполнять антропоморфные функции. Такое устройство должно иметь нижний уровень интеллектуального управления, производящий сбор данных с датчиков, принимающий типовые решения и осуществляющий оперативные расчеты для простейших действий рефлекторного типа. Кроме того, должен быть создан верхний уровень интеллектуального управления, призванный заменить разум оператора и принять на себя роль, которую в рассмотренной выше системе играл человек. Устройство управления верхнего уровня, используя некоторый набор качественных команд, должно обучать робота и управлять им, обеспечивая выполнение поставленных задач [75, 89, 104, 112, 123, 128, 133, 135].

В настоящее время ведутся обширные работы по созданию отдельных узлов робототехнических систем. Решаются задачи: 1) моделирования восприятия; 2) представления окружающей обстановки; 3) принятия решений в сложных условиях (решения задач); 4) эффективной локомоции [74, 85, 93, 94, 125].

В литературе имеются данные о других попытках создания роботов [65, 81, 107, 122]. Большинству этих роботов свойственны конструктивные недостатки, влекущие за собой медлительность, неуклюжесть и ограниченность действий. Кроме того, все они без исключения страдают несовершенством устройств координации и принятия решений верхнего уровня. Последний недостаток может быть преодолен только за счет прогресса в вычислительной технике.

### 1.5.4. Нечеткий автомат как координатор управления

*Нечеткий автомат* представляет собой развитие понятия стохастического автомата переменной структуры и приспособлен к работе с входами «нечеткого» характера по Заде [87, 118, 138].

Нечеткая величина принадлежит к категории величин, описывающих «объекты» с неопределенными границами, характеризуемыми функцией принадлежности, заданной на некотором множестве [118].

Таким образом, нечеткий автомат определяется шестеркой величин [$Z$, $Q$, $U$, $F$, $H$, $\mu$], в которой кроме конечного множества нечетких входов $Z = \{z\}$, конечного множества состояний $Q$ – $\{q\}$, конечного множества выходов $U$ – $\{u\}$, функции переходов между состояниями $F$ и выходной функции $H$ фигурирует еще вектор принадлежности $\mu$, определяющий нечеткое состояние системы [76, 86, 134]. Для изменения значений функций принадлежности $\mu$ каждому нечеткому входу $z^k$ можно поставить в соответствие матрицу пересчета векторов принадлежности. Такой нечеткий автомат может скоординировать $p$ элементарных движений, соответствующих отдельным подпроцессам, так, чтобы они составили требуемое сложное движение [41].

Нечеткий автомат, используемый как координатор движений, показан на рис. 1.5.

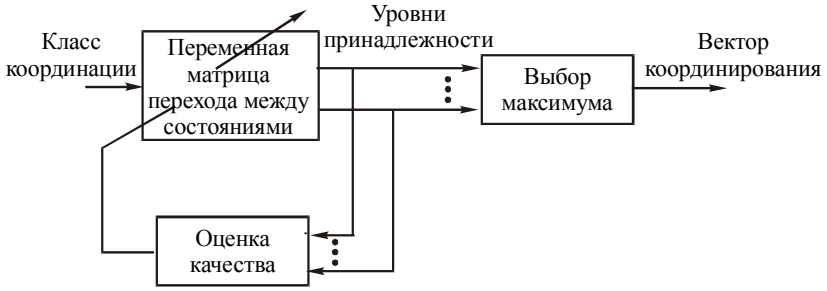


Рис. 1.5. Нечеткий автомат. Структура алгоритма обучения

### 1.5.5. Лингвистические методы интеллектуальной организации

Управление, осуществляемое нечетким автоматом, обладает большим уровнем искусственного интеллекта, чем самоорганизующаяся система управления. Однако команды, формируемые в мозгу человека-оператора, чаще имеют вид сложных заданий. Поэтому необходима система интеллектуального управления, которая служила бы интерфейсом между мозгом и нечетким автоматом и преобразовывала качественную команду в последовательность сложных движении, позволяющих решить поставленную задачу [58] (рис. 1.6).

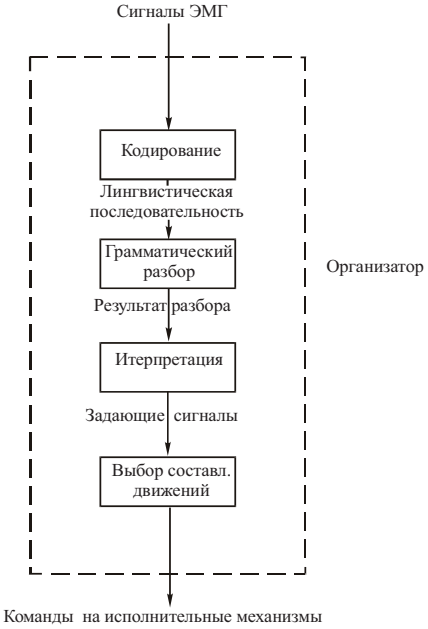


Рис. 1.6. Структурная схема уровня организации

Машиной, способной к столь разумным действиям и решениям, может быть только совершенный компьютер, приспособленный к обработке качественной информации, насыщенной содержанием, но в то же время нечеткой по природе в том смысле, что при исполнении команд не требуется высокой точности. Для обработки подобной ин-

формации естественно применить уже упоминавшийся выше лингвистический подход, который в последнее время разрабатывается для систем искусственного интеллекта, распознавания образов, анализа сцен и для других приложений [88, 91, 98]. Эти методы позволяют обрабатывать наборы слов, содержащих логические команды, и тем самым выполнять задания согласно некоторой заданной грамматике и синтаксису, как это имеет место в естественных языках.

## 1.6. ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СРЕДЫ

В настоящее время происходит бурное развитие средств вычислительной техники и переход от вычислительных архитектур последовательного принципа функционирования к параллельным, о чем свидетельствуют последние разработки ведущих компаний в области микропроцессорной техники. В связи с этим также происходит прорыв в области интегральных технологий и появляется возможность построения целых систем на кристалле. Это требует, в свою очередь, разработки специального алгоритмического обеспечения и вопросов их применения в различных областях науки и техники (теории автоматического управления, цифровой обработки сигналов и изображений, экспертных систем, биоинформатики и др.). Результаты проведенных исследований в этой области позволяют получать высокопроизводительные вычислительные среды; обеспечивать модульность, мобильность, высокую надежность, реконфигурируемость аппаратно-программных автоматов, инвариантность алгоритмов к аппаратной платформе [62].

Классические архитектуры средств вычислительной техники, используемых в системах управления, обладают рядом недостатков, существенно ограничивающих их возможности. К этим недостаткам следует отнести: жесткость самой вычислительной архитектуры (т. е. отсутствие возможности автоматического изменения архитектуры с целью достижения адекватности структурам и параметрам решаемых задач), неизменность каналов связи, трудности распределения как самих задач, так и их частей между параллельно работающими процессорами, наличие узких каналов в системах обмена информации и др. Указанные факторы стимулируют интенсивные исследования, имеющие целью найти более эффективные вычислительные архитек-

турные решения, обеспечивающие высокие качественные показатели вычислительных сред и систем управления.

Перестраиваемые вычислительные среды позволяют создавать универсальные устройства управления, которые могут эффективно решать задачи различного назначения за счет гибкой программной настройки и перестройки алгоритмов управления как перед началом работы, так и в процессе функционирования системы управления, т. е. приобретают свойства и статической, и динамической реконфигурации своей структуры. Синтез перестраиваемых автоматов, на основе которых создается перестраиваемая вычислительная среда, является весьма трудоемкой и кропотливой задачей. Разработанный автоматно-структурный метод позволяет существенно снизить трудозатраты на проектирование перестраиваемых автоматов и кратно сократить время их синтеза [67].

Предлагается новый принцип обработки информации в системах автоматического управления. Он заключается в том, что в функциональную структуру системы управления вводятся перестраиваемые вычислительные среды, способные использовать единую информацию об управляемых процессах, протекающих в различных контролируемых точках объекта. Такие системы способны сформировать динамическое информационное поле о состоянии объекта, а также вырабатывать управляющие воздействия, позволяющие решить задачу высококачественного управления при неполной информации об объекте и наделить всю систему новыми свойствами, не присущими ни одной из фиксированных структур [68].

Структурная схема автоматической системы регулирования с перестраиваемой структурой, управляющее устройство которой базируется на идеологии модели коллектива вычислителей, представлена на рис. 1.7.

Проведенные исследования показывают, что построенные управляющие устройства с новой логической и функциональной организацией на базе перестраиваемых вычислительных сред, синтезированные на их основе системы автоматического управления процессами с сосредоточенными и распределенными параметрами способны функционировать при неполной информации об объекте, автоматически выбирать наилучший закон управления из заданного класса и повышать качество процесса управления, эффективность переработки информации в системе.

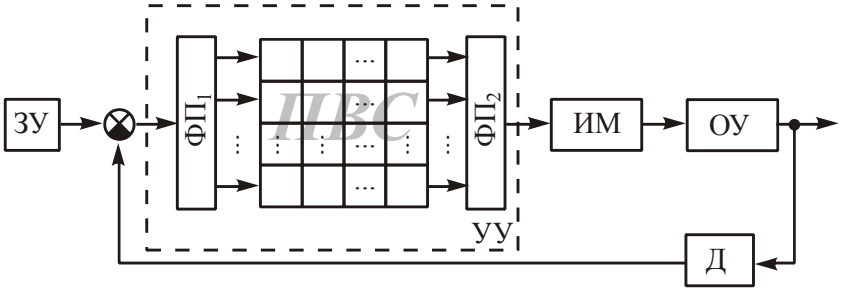


Рис. 1.7. Обобщенная схема структурно-перестраиваемой системы автоматического управления: ОУ – объект управления; ИМ – исполнительный механизм; УУ – устройство управления; ФП – функциональный преобразователь; ПВС – перестраиваемая вычислительная среда; ЗУ – задающее устройство; Д – датчик

Таким образом, для рассмотренного класса объектов управления эффективность использования автоматно-структурного метода при синтезе перестраиваемых вычислительных сред позволила существенно сократить (в 2 – 3 раза) время их разработки, выявить недостатки при моделировании и значительно повысить качественные характеристики. В результате в синтезированных системах автоматического управления различного назначения за счет применения перестраиваемых вычислительных сред происходит существенное повышение качества и эффективности переработки информации по сравнению с существующими.

## 1.7. ОСНОВЫ ОБЗОРНО-СРАВНИТЕЛЬНОГО МЕТОДА В КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В обзорно-сравнительном методе навигации в качестве формирователей эталонного и наблюдаемого ориентиров могут быть использованы как искусственные, так и естественные геофизические поля. В выбранной системе отсчета положение эталонного изображения ориентира соответствует требуемому курсовому направлению движения. Сопоставляемая информация может сниматься в точке, с линии или с площади соответствующего поля. При этом точечное зондирование не накладывает ограничений на вид зондируемого поля, тогда как съем информации с линии или площади исключает возможность ис-

пользования пространственных полей и базируется только на поверхностных полях (поле рельефа, оптического или радиолокационного контраста и др.). Последнее обусловлено тем, что летательные аппараты (ЛА) имеют обычно несоизмеримо малые размеры по сравнению с так называемым радиусом корреляции пространственного поля [20].

Вне зависимости от принципов разработки алгоритмов и систем, строящихся на использовании обзорно-сравнительного метода навигации, все они обладают общностью, заключающейся в реализации вычислительной процедуры, сходной с вычислением взаимной корреляционной функции и определением экстремума этой функции. В связи с этим навигационные системы данного типа получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС). В случае, если априори известно, что в процессе полета могут иметь место относительно небольшие отклонения параметров движения ЛА от номинальных, при которых рассогласование между текущим и эталонным изображениями не превзойдет радиуса корреляции их взаимной пространственной корреляционной функции, предпочтение отдается беспоисковым КЭНС. Поисковые КЭНС, обладая свойством инвариантности по отношению к начальным ошибкам, являются более универсальными, но в то же время и более сложными по сравнению с беспоисковыми. Теория КЭНС как для поисковых, так и беспоисковых систем развита в основном советскими учеными [7, 9, 32, 36].

Принципы функционирования поисковых КЭНС основываются на теории статистических решений и сводятся к заданию множеств гипотез об истинном движении ЛА на некотором временном интервале, предшествующем текущему. Каждой гипотезе ставится в соответствие конкретная реализация, которая сопоставляется с наблюдаемым изображением.

Работа систем автоматического управления в реальных условиях находится под действием случайных возмущений. Поэтому одним из перспективных направления при анализе и синтезе современных систем управления считается использование вероятностных методов. Исторические корни этого подхода заложены в теории информации в классической работе Шеннона [73], где предложено в качестве параметра процесса использовать известное из термодинамики понятие функции энтропии (энтропии сообщения). Дальнейшее развитие ста-

тистические способы получили с введением второй средней величины названной корреляционной функцией. При этом оказывается, что корреляционная функция, как и функция энтропии, представляет собой ценное дополнение математического аппарата теории информации.

Понятие корреляция становится центральным в определяющих отраслях науки и техники, включая системы управления, оптику, акустику, навигацию, и особо следует отметить исследования различных физических полей. Важность и актуальность подобных исследований не требуют специальных пояснений, а корреляционный метод стал вполне адекватным ответом на поставленную проблему.

Корреляционный анализ имеет много общего с теорией информации, но есть и существенные отличия, что приводит к совершенно иным понятиям, нежели в теории информации. Спецификой при исследовании статистических процессов является способ математической обработки результатов эксперимента, т. е. корреляционный анализ дает возможность определить, существуют ли связи между измеряемыми величинами и какие именно, а также появляется возможность установить, являются ли независимыми друг от друга две измеряемые величины в некоторой последовательности измерений или в наблюдаемый интервал времени, либо между ними существует одинаково и противоположно направленное изменение. Параметр, определяющий эту зависимость, называется коэффициентом корреляции [32].

### 1.7.1. Вводные понятия корреляционного анализа

Корреляционный анализ дает исследователю в корреляционной функции форму представления статистически важного среднего значения временного процесса, который эквивалентен спектру мощности, но имеющий совершенно другой вид. При этом корреляционный анализ определяет функциональную связь измеряемых величин. Понятие корреляции в теории информации стало настолько важным, что без него не обходятся ни в одной из областей техники связи. В середине XIX в. французский физик Фурье впервые представил спектральное разложение временного процесса на гармонические составляющие для решения дифференциального уравнения теплопроводности. Это явилось прорывом, и в настоящее время любой электриче-

ский процесс рассматривают, или как временную или как частотную функцию. Дальнейшие исследования позволили расширить теоретический базис. Одна из основных рабочих идей теории информации сводится к тому, что сообщения, подлежащие передаче, следует рассматривать как флюктуационные процессы. Дело в том, что при исследовании флюктуационных процессов (под флюктуационным процессом будем понимать непрерывно протекающий временной процесс $x(t)$ с хаотически меняющимися частотой и фазой) от амплитудного спектра (коэффициентов Фурье) следовало перейти к более общему понятию спектра мощности, который у флюктуационных процессов не содержит неопределимых фазовых информаций. Первоначальную временную функцию исследуемого процесса дает прямое преобразование Фурье, а обобщенную временную функцию, которая не содержит фазовых соотношений процессов, можно получить с помощью обратного преобразования Фурье. Эта временная функция получила название автокорреляционной и является некоторым обобщением понятия эффективности значения временного процесса; последнее идентично нулевому значению автокорреляционной функции. Автокорреляционную функцию можно получить не только из спектра мощности преобразованием Фурье, но и из первоначальной временной функции процесса непосредственным осреднением, развивая классическое понятие коэффициента корреляции. Итак, к корреляционному анализу можно прийти исходя либо из спектральной теории, либо из практической статистики.

Понятие коэффициента корреляции, развитое в понятии корреляционной функции, и ее спектральный образ, спектр мощности далеко выходят за рамки эмпирической статистики естественных наук. Связь корреляционного анализа с понятием теоретической электротехники сохраняется вследствие того, что автокорреляционная функции является развитием привычного понятия среднего квадратичного значения. С другой стороны, корреляционный анализ является также развитием спектральной теории, так как преобразование Фурье функции взаимной корреляции дает взаимный спектр – между спектральным соответствием двух временных процессов. При исследовании флюктуационных процессов, которые не могут быть аналитически описаны временной функцией, применяются лишь определенные вероятностные законы. Поэтому понятие корреляционной функции расширяется и получаются три различных ее определения: среднее значение по

времени, спектральное среднее значение и вероятностное среднее значение [32].

### 1.7.2. Основные определения и ограничения корреляционного анализа

Корреляция – статистическая взаимосвязь двух или нескольких случайных величин (либо величин, которые можно с некоторой допустимой степенью точности считать таковыми). При этом изменения одной или нескольких из этих величин приводят к систематическому изменению другой или других величин. Математической мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции является количественной мерой степени родства двух величин.

Коэффициент корреляции – это мера истинности пропорциональности или обратнопропорциональности двух величин и представляет меру рассеивания или меру погрешности родственной связи.

Взаимокорреляционная функция – стандартный метод оценки степени корреляции двух последовательностей.

Автокорреляционная функция – эта характеристика сигнала, которая помогает находить повторяющиеся участки сигналов или определять несущую частоту сигнала, скрытую из-за наложения шума и колебания других частот. В статистике автокорреляция случайного процесса описывает корреляцию между значениями процесса в различные моменты времени. Автокорреляционная функция часто используется в обработке сигналов и анализе временных рядов. Неформально автокорреляционная функция – это сходство между значениями сигнала как функция от разности во времени между ними.

Корреляционный анализ – метод обработки статистических данных, заключающийся в изучении коэффициентов корреляции между переменными. При этом сравниваются коэффициенты корреляции между одной парой или множеством пар признаков для установления между ними статистических взаимосвязей. Цель корреляционного анализа – обеспечить получение некоторой информации об одной переменной с помощью другой переменной. В случаях, когда возможно достижение цели, говорят, что переменные коррелируют.

Корреляция отражает лишь линейную зависимость величин, но не отражает их функциональной связности [32, 36].

**Ограничения корреляционного анализа.** 1. Применение возможно при наличия достаточного количества случаев для изучения: для конкретного вида коэффициент корреляции составляет от 25 до 100 пар наблюдений.

2. Второе ограничение вытекает из гипотезы корреляционного анализа, в которую заложена линейная зависимость переменных. Во многих случаях, когда достоверно известно, что зависимость существует, корреляционный анализ может не дать результатов просто ввиду того, что зависимость нелинейна (выражена, например, в виде параболы).

3. Сам по себе факт корреляционной зависимости не позволяет утверждать, какая из переменных предшествует или является причиной изменений или что переменные вообще причинно связаны между собой, например ввиду действия третьего фактора [32, 36].

**Область применения.** Этот метод обработки статистических данных весьма популярен как в технических, так и в экономике и социальных науках, хотя сфера применения коэффициента корреляции достаточно обширна: контроль качества промышленной продукции, военная техника, металловедение, агрохимия, гидробиология, биометрия и т. д. Популярность метода обусловлена двумя моментами: коэффициенты корреляции относительно просты в подсчете, м их применение не требует специальной математической подготовки. В сочетании с простотой интерпретации простота применения коэффициента привела к его широкому распространению в сфере анализа статистических данных

## 1.8. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ КЭНС

Под корреляционно-экстремальными системами понимаются системы обработки информации, представленной в виде реализаций случайных функций (полей), предназначенные для определения координат движения или иных целей. Название данного типа систем объясняется тем, что по принципу действия первые образцы КЭС рассматривались как системы экстремального регулирования, в которых для построения экстремальной функции использовалось свойство корреляционной функции одного или нескольких аргументов достигать максимума при нулевом значении аргументов. В них в той или иной

степени использовалась корреляционная связь между реализациями случайных функций, а определение выходных величин (координат местоположения и их производных) осуществлялось с помощью отыскания экстремума корреляционной функции или какой-либо другой статистической оценки реализаций случайных функций.

В настоящее время разработаны общие методы синтеза и анализа оптимальных и субоптимальпых КЭС па основе различных теоретических подходов. Тем не менее название «корреляционно-экстремальные системы» сохраняет право на существование как в историческом плане, так и вследствие того, что при тщательном исследовании динамики даже очень сложных КЭС выясняется, что их принцип действия и достижимые характеристики теснейшим образом связаны с экстремальным и другими свойствами корреляционных функций используемых полей [32].

### 1.8.1. Классификация корреляционно-экстремальных систем

Классификация — процесс группировки объектов исследования или наблюдения в соответствии с их общими признаками, используемый как средство для установления связей между этими понятиями или классами объектов [54]. Сам процесс классификации имеет творческую направленность. Классические примеры классификации корреляционно-экстремальных систем приведены в [9, 32]. Ниже в несколько сокращенном виде представлен этот классический пример.

По области применения:

– *для целей навигации,* наведения и радиолокации; подобные системы получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС);

– *для управления технологическими процессами*; эти системы можно условно назвать корреляционно-экстремальными технологическими: системами (КЭТС);

– *для исследования природных ресурсов и окружающей среды;* такие системы можно называть корреляционно-экстремальными геофизическими системами (КЭГС).

**Использование КЭС в области навигации, наведения и радиолокации**. Среди этих применений целесообразно упомянуть о корреляционных измерителях скорости самолетов и космических кораблей, корреляционных измерителях углового положения, комплексной

инерциально-корреляционной системе, системах экстремального приема сигналов и экстремальной радионавигации, корреляционном методе радиолокации, системах слежения за объектами в дальнем космосе, корреляционно-экстремальном пеленговании протяженных и точечных источников, методе автоматической стыковки спутников на орбите.

В соответствующих главах работы [9] рассматриваются системы навигации и наведения но картам геофизических полей. Эти применения КЭС связаны с точечным зондированием полей. Показываются «кадровые» КЭС, использующие изображения местности и предназначенные для навигации, наведения летательных аппаратов и для вождения речных и морских судов вблизи берегов.

**Использование КЭС для управления технологическими процессами**. Среди применений КЭС для управления технологическими процессами надо отметить использование КЭС для очувствления промышленных роботов, создания органа корреляционного технического зрения навигации транспортных роботов, измерения скорости проката, движения бумаги и других материалов бесконтактным способом, поиска и сортировки изделий, выбора неориентированных деталей из бункера, автоматического распознавания микроструктур материалов, измерения расходов, настройки радиоаппаратуры, в АСУ технологическими процессами нефтехимической и микробиологической промышленности, для исследования колебаний плазмы и турбулентности. Находят применение идеи КЭС в бионике и медицине .

**Использование КЭС для исследования природных ресурсов и окружающей среды**. Значительные применения находят КЭС в исследованиях оптики атмосферы, в частности для целей измерения скорости ветра, в задачах контроля за состоянием биосферы Развиты статистические подходы, в том числе и методы КЭС, в гидроакустике и гидролокации, дистанционном зондировании и исследовании природных ресурсов с летательных и космических аппаратов, при поиске полезных ископаемых и анализе сейсмограмм.

В геодезии, гравитационной и магнитной разведке, при исследовании статистических свойств магнитного и гравитационного полей КЭС также нашли применение.

**По информационным признакам**. К ним относят:

1) способ зондирования используемых полей измерителем поля и в блоке карт (эталоне);

2) методы и алгоритмы оценивания;
3) используемые поля;
4) эталонное обеспечение (картообеспечение).

По последнему признаку КЭС можно подразделить на системы со статической и динамической памятью, если условиться понимать под системами со статической памятью такие КЭС, в которых априорная информация об используемых полях накапливается до начала функционирования КЭС, а под системами с динамической памятью — КЭС, в которых эталонные реализации поля фиксируются уже во время функционирования КЭС, как это имеет место, например, в корреляционных измерителях скорости.

Картообеспечение навигационных КЭС со статической памятью полезно дополнительно подразделять на долговременное, оперативное и мгновенное в зависимости от величины временного интервала между созданием эталонных карт полей и применением КЭС.

Признаки, по которым можно классифицировать КЭНС, достаточно обширны и определяют возможные виды реализации их составных элементов (датчиков поля, блоков памяти, корреляторов, вычислительных устройств и др.), особенности используемых алгоритмов обработки информации, методы вычисления корреляционной функции и определения ее экстремума, объем и способы использования априорной информации и т. д. По виду зондируемого физического поля КЭНС можно разделить на системы, использующие пространственные и поверхностные поля. По виду рабочей информации, снимаемой датчиком поля в текущий момент времени, КЭНС делятся на системы, в которых информация снимается в точке (КЭНС I), с линии (КЭНС II) и с площади (КЭНС III). По объему начальной информации, используемой в системе, выделяют системы «без памяти» и системы «с памятью». Первые, в отличие от вторых, не имеют «эталонного» изображения поля в районе навигации и могут определять лишь скорость изменения координат ЛА относительно ориентиров, используя любые, в том числе и нестабильные во времени поверхностные поля (например, облачный покров). По способу хранения и обработки информации выделяют классы аналоговых и цифровых систем.

Обратимся к классификации КЭС, представленной на рис. 1.8.

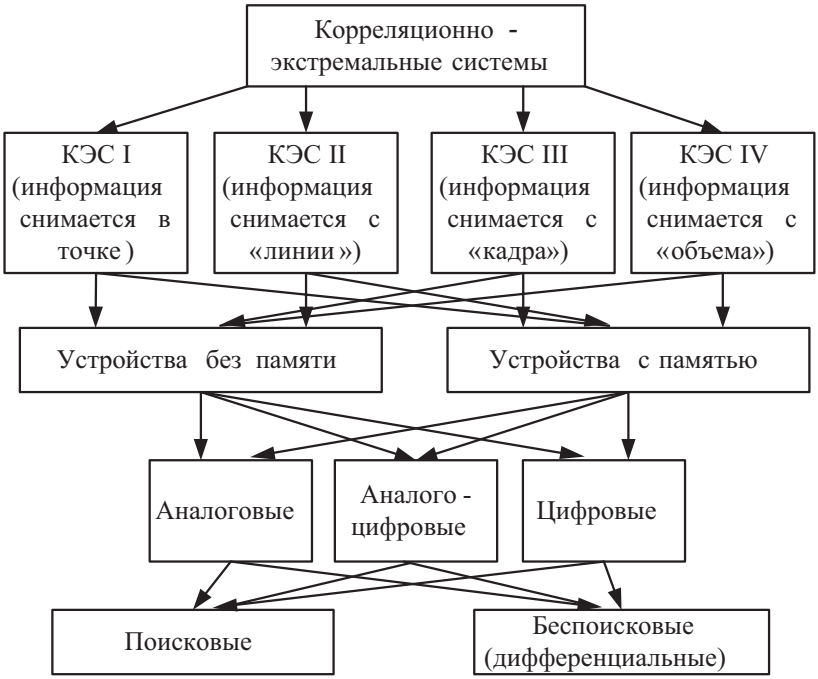


Рис. 1.8. Классификация КЭС

При исследовании КЭС обычно используются следующие признаки классификации [9, 29, 30, 32]:

1) вид рабочей информации;
2) объем начальной (априорной) информации;
3) способ хранения и обработки информации;
4) метод определения отклонения от экстремума.

По виду рабочей информации, воспринимаемой датчиками, КЭС делятся на четыре класса [3, 32]: системы, в которых информация снимается в точке (КЭС I), с отрезка линии (КЭС II), с участка площади (КЭС III), с части объема (КЭС IV). Рабочая информация в $КЭС_I$ представляет собой скалярную величину, а в системах второго, третьего и четвертого классов – вектор. КЭС II, КЭС II, КЭС IV по назначению вплотную примыкают к системам опознавания образов и совмещения изображений [49, 55, 57]. Кроме указанных четырех классов систем, существуют и промежуточные виды, представляю-

щие собой комбинации упомянутых систем [9, 36]. К классу КЭС IV относятся системы, использующие стереоскопические методы или методы голографии [16].

По объему начальной информации КЭС делятся на два подкласса [9]: системы «без памяти» и системы с памятью. В КЭС «без памяти» информация извлекается сопоставлением сигналов (реализаций), один из которых задержан во времени. В КЭС «с памятью» привлекается априорная информация об используемом случайном процессе (например, фотоизображение местности или участка сцены).

В зависимости от способа хранения и обработки рабочей информации подклассы КЭС подразделяются на аналоговые (непрерывные), цифровые (дискретные) и аналого-цифровые (комбинированные [9, 37].

Отметим несколько примеров использования КЭС. В настоящее время известны КЭС, относящиеся согласно рассмотренной классификации к КЭС II, КЭС III и КЭС IV.

Большой интерес представляют простые и дешевые корреляционные зрительные системы, реализованные в виде спецпроцессоров (аналоговых или цифровых) или на универсальных микроЭВМ. Причем перспективно создание КЭС на основе некогерентных оптических корреляторов – простых оптических вычислительных устройств, практически мгновенного быстродействия.

На основе вышеизложенного сформулируем следующие задачи исследования:

1. Разработать обобщенную схему алгоритма корреляционного сравнения телевизионных изображений, обосновать выбор параметров эталонных изображений (ЭИ), аналитически исследовать помехоустойчивость КЭС при сравнении точечных и протяженных изображений и синтезировать методы пространственной фильтрации помех.
2. Обосновать корреляционные алгоритмы сравнения трехмерных и цветных изображений.
3. Рассмотреть вопросы метрологии КЭС, включая анализ погрешностей и поверку КЭС.
4. Разработать структуру, состав и основные элементы САПР КЭС.
5. Разработать и исследовать телевизионные КЭС сравнения изображений различных размерностей и цветностей.

6. Исследовать вопросы применения КЭС для решения различных практических задач.

### 1.8.2. Особенности реализации обзорно-сравнительного метода в КЭНС

Основная задача КЭНС состоит в определении текущих координат местоположения ЛА и (или) их производных. Одна из первых корреляционно-экстремальных систем была разработана для управления движением самолета и предназначалась для удержания его на заданной траектории при многократных полетах по одному тому же маршруту

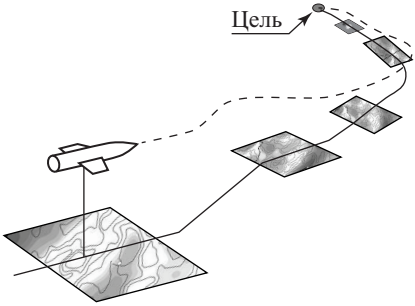


Рис. 1.9. Характер траектории полета дозвуковой крылатой ракеты при использовании информации о рельефе местности в районах коррекции

Во время первого полета фиксируется изображение подстилающей местности. Оно служит эталоном для последующих полетов, при которых управление самолетом проводится так, чтобы эталонное и текущее изображения совпадали. В этом состоит идея управления движения ЛА по заданному курсу с использованием карт местности [32].

Автоматические системы данного типа могут реализовать различные алгоритмы работы. Так, автоматическое управление движением ЛА по «карте заданного курса» может быть организовано непрерывно на всей траектории движения. Иногда целесообразно лишь периодически корректировать эту траекторию в отдельных навигационных районах (рис. 1.9). При этом не требуется карта местности всего маршрута, а только карта местности в районах коррекции. Корре-

ляционно-экстремальная система может использоваться для коррекции других навигационных систем, в частности инерциальных, при создании корреляционно-экстремальных систем для наведения

ЛА класса «воздух—земля» используются системы с многократной перезаписью «эталонного» изображения цели и района местности в окрестности цели. В момент пуска начальная ориентация системы на цель (т. е. выбор цели, наведение головки самонаведения на нее и запись «изображения» цели в память системы) осуществляется по команде оператора, а затем после пуска ракеты по мере приближения к цели ее текущее изображение будет все больше отличаться от «эталонного» вследствие накопления масштабных и ракурсных изменений. Поэтому периодически осуществляется перезапись «эталонного» изображения местности в районе цели [7].

## 1.9. СТРУКТУРА КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

### 1.9.1. Вводные понятия

Под КЭС понимается совокупность аппаратных и программных средств, содержащая один или большее число видеодатчиков и обеспечивающая получение, обработку и анализ видеоинформации с выдачей результатов в форме, пригодной для дальнейшего использования [17, 22, 23, 25, 34, 45, 48, 51, 53]. В общем виде КЭС состоит из датчика (или датчиков) изображения (ДИ) (видеодатчиков), блока обработки изображения (БОИ), блока адаптации (БА), блока оценки параметров (БОП) и блока подсветки (рис. 1.10).

В качестве видеодатчиков КЭС, преобразующих измеряемые оптические характеристики в пригодный для дальнейшей обработки видеосигнал, обычно используются фотоприемники, телевизионные камеры (телекамеры), оптические локаторы или радиолокаторы [1, 11, 18, 19, 33, 42, 63, 69]. Информация, снимаемая с ДИ, преобразуется блоком обработки изображения в вид, необходимый для использования в БОП. Этот блок определяет заданные оценки параметров анализируемого объекта (например, его положение и габариты). БОП может управлять через блок подсветки освещением рабочей зоны (РЗ). Подстройку параметров ДИ и ДОП осуществляет блок адаптации. Очевидно, что данная схема может видоизменяться и упрощать-

ся. Например, БА, БОИ и БОП могут реализовываться на ЭВМ. Далее рассмотрим подробнее классификацию КЭС.

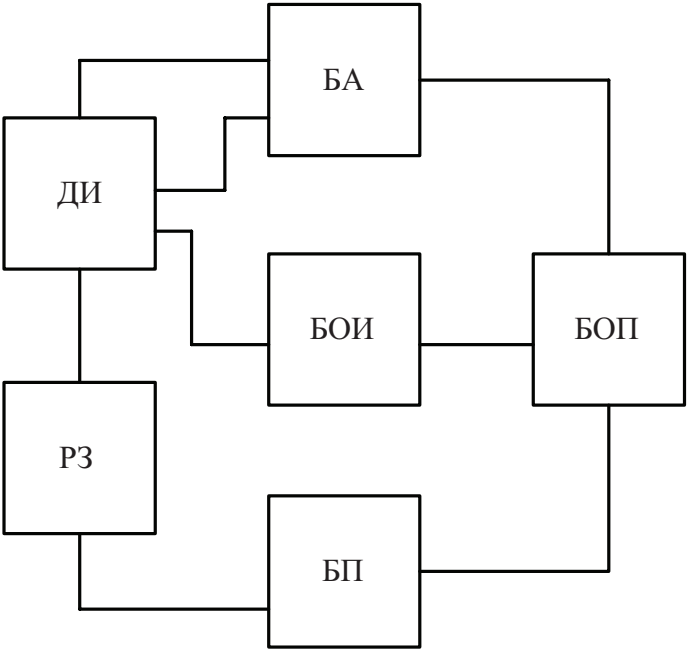


Рис. 1.10. Структурная схема КЭС

### 1.9.2. Корреляционная обработка изображений

Известно, что работа КЭС базируется на распознавании объекта и определении его искомых характеристик путем обработки информации, представленной в виде реализаций случайных функций (полей). Термин «КЭС» объясняется тем [9, 36], что по принципу действия подавляющее большинство известных КЭС представляет собой системы экстремального управления, в которых для построения экстремальной зависимости используется свойство корреляционной функции одного или нескольких аргументов достигать наибольшей величины при нулевом значении аргументов.

В функциональной схеме каждой КЭС присутствуют три основных блока: блок моделей, генерирующих эталонную информацию; блок вычисления (формирования) функционала сравнения (в частности, взаимнокорреляционной функции – ВКФ) эталонной и текущей информации от датчиков и блок определения экстремума этого функционала. Общие принципы построения КЭС могут быть применены для обработки данных от датчиков текущей информации любой физической природы. В настоящее время на основе этих принципов создаются системы обработки данных от измерителей характеристик поверхностных и пространственных физических полей Земли, излучений небесных тел, которые могут быть представлены в виде карты звездного неба, и искусственных радиополей [26, 31, 56, 71]. Данные принципы построения КЭС положены в основу оптимальной обработки информации от датчиков внешней визуальной информации промышленных роботов. Система, реализующая эту обработку, располагается на верхнем уровне иерархической системы управления адаптивного робота и называется корреляционной [27, 28].

В КЭС в качестве эталонной информации используется эталонное изображение (ЭИ) объекта (детали) либо рабочего инструмента в требуемом (программном) положении, текущая информация представляется в виде текущего изображения (ТИ) того же объекта или рабочего инструмента в текущем, действительном положении. Таким образом, ЭИ является моделью внешней среды, отражающей с точностью до параметров состояние внешней среды. С помощью вычислительных устройств определяются линейные и угловые рассогласования изображений ЭИ и ТИ, используемые затем для управления потребителем информации [2, 10].

Разъясним более детально принцип действия КЭС на примере, использующем оптический коррелятор Берджера [9]. Работу коррелятора этого типа иллюстрирует рис. 1.11.

Предполагаем, что ТИ описывается функцией $F_1(x_1, y_1)$, а ЭИ – $F_2(x_2, y_2)$, где

$$x_1 = (x_2 - \xi)\cos\alpha + (y_2 - \eta)\sin\alpha;$$

$$y_1 = (y_2 - \eta)\cos\alpha + (x_2 - \xi)\sin\alpha;$$

$\xi$, $\eta$ и $\alpha$ – линейные и угловое рассогласования одного изображения относительно другого [9]. Поэтому в корреляционной плоскости

будет воспроизводиться изображение сравниваемых изображений ТИ и ЭИ:

$$J(\xi,\eta,\alpha)=\int_s F_1(x_1,y_1)F_2(x_2,y_2)ds,$$

где $s$ – площадь изображений. В КЭС осуществляется анализ ВКФ ТИ и ЭИ и определяются координаты $\xi_i$, $\eta_i$, $\alpha_i$ главного максимума ВКФ, являющиеся оценками линейных и углового рассогласований ТИ и ЭИ. Поиск координат главного максимума ВКФ осуществляется с помощью алгоритмов адаптации [9, 47].

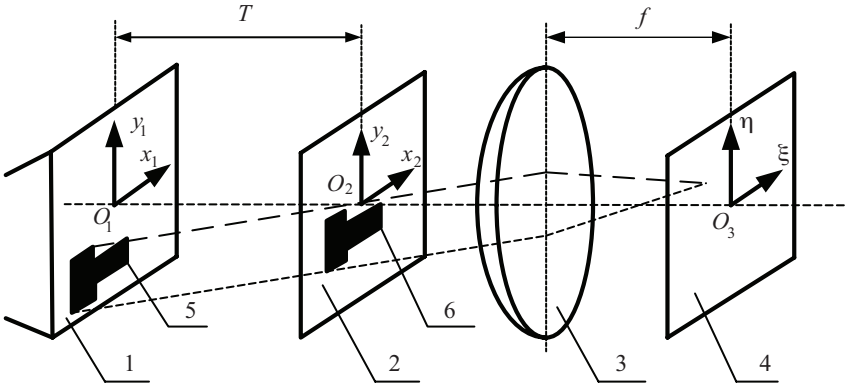


Рис. 1.11. Оптический коррелятор Берджера:
1 – электронно-лучевая трубка; 2 – маска; 3 – линза; 4 – плоскость регистрации ВКФ; 5 – ТИ; 6 – ЭИ; $T$ – расстояние (по оптической оси) между плоскостями ТИ и ЭИ; $f$ – фокусное расстояние линзы

## 1.10. ВЫВОДЫ

1. В пределах ограниченного объема мы попытались оценить современное состояние теории автоматического управления и указать одно из перспективных направлений, на котором стоит сконцентрировать усилия исследователей. Интеллектуальное управление представляет собой естественное развитие принципов разрабатываемого в настоящее время адаптивного обучения и систем ССУ. Интеллектуальное управление должно сыграть роль идеального интерфейса между традиционными средствами управления и компьютером, осуще-

ствляющим принятие решений высшего уровня. Применение интеллектуального управления открывает грандиозные перспективы для решения задач управления производственными процессами высокой размерности и для создания чрезвычайно сложных роботов. Не исключена и возможность его использования в социально-экономических, транспортных и других больших системах, с которыми сталкивается современная наука.

2. Автоматные модели позволяют преодолеть негативные тенденции, которые существуют при эволюционном переходе от многопоточного программирования к многоядерному. Теория конечных автоматов, дополненная теорией сетевой автоматной модели, и есть по существу теория параллельных процессов. Алгебраические операции на множестве автоматов позволяют внедрить новые методы анализа и синтеза параллельных алгоритмов. Важно и то, что эти методы отработаны в практике проектирования цифровых систем. Более того, на базе автоматов проектирование параллельных систем вплоть до этапа реализации может быть единым как для программных, так и для аппаратных систем.

3. Показано место КЭС в общей идеологии систем управления и определены наиболее перспективные подходы к решению этих задач, а также даны основные понятия КЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров В.В., Горский Н.Д.* ЭВМ видит мир. – Л.: Машиностроение, 1990. – 139 с.

2. *Алексеев К.Б., Белоглазов Н.Н.* Корреляционные методы автоматического распознавания микроструктур материалов // Корреляционно-экстремальные системы обработки информации и управления. – Томск: ТГУ,1977, – N2. – С. 14 – 125.

3. *Ангелов М.П., Сырямкин В.И.* Телевизионное корреляционно-экстремальное сенсорное устройство для промышленных роботов // Корреляционно-экстремальные системы управления: Тез.докл. первой Всесоюз. конф. – Томск: ТГУ, 1979. – С. 208 - 212.

4. *Аоки М.* Оптимизация стохастических систем. М.: Наука, 1971.

5. *Астапов Ю.М., Медведев В.С.* Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1982. – 304 с.

6. *Атанс М., Фалб П.* Оптимальное управление. М.:Машиностроение, 1968.

7. *Балицкий В.К.. Юрьев А.Н.* Корреляционно-экстремальные методы навигации. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.

8. *Бандман О.Л.* Клеточно-автоматное моделирование диффузионно-реакционных процессов // Автометрия. – 2003. – № 3. – С. 1–16.

9. *Белоглазов И.Н. Тарасенко В.П.* Корреляционно-экстремальные системы. М., Сов. Радио, 1974. – 392 с.

10. *Белоглазов Н.Н.* Дифференциальные схемы оптического коррелятора для управления промышленными роботами // Корреляционно-экстремальные системы управления, – Томск: ТГУ, 1980. – N5. – С. 187 – 200.

11. *Белянин П.Н.* Робототехнические системы для машиностроения.. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

12. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.

13. *Бессонов А.А., Загашвили Ю.В., Маркелов А.С.* Методы и средства идентификации динамических объектов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1989. – 280 с.

14. *Боднер В.А.* Теория автоматического управления полетом. – М.: Наука, 1964. – 700 с.

15. *Брейсон А., Хо Ю-ши*. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.

16. *Василенко Г.И.* Голографическое опознавание образов. – М.: Сов. радио, 1977. – 328 с.

17. *Васильев В.И.* Распознающие системы. Справочник. – Киев: Наукова думка. 1983. – 422 с.

18. *Войчинский А.М., Диденко Н.И., Лузин В.П.* Гибкие автоматизированные производства: Управление технологичностью РЭА. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.

19. *Генкин В.Л., Ерош И.Л., Москалев Э.С.* Системы распознавания автоматизированных производств. – Л.: Машиностроение, 1988. – 246 с.

20. *Дмитриевский А.А. Лысенко Л.Н. Иванов Н.М. Богодистов С.С.* Баллистика и навигация ракет. – М.: Машиностроение, 1985. – 310 с.

21. *Емельянов С.В.* Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.

22. *Жаботинская Т.Н., Жаботинский Ю.Д.* Очувствление захватных устройств промышленных роботов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – N 5. – С. 98 – 108.

23. *Жаботинский Ю.Д., Исаев Ю.В.* Адаптивные промышленные роботы и их применение в микроэлектронике. – М.: Радио и связь, 1985. – 104 с.

24. *Ивахненко А.Г.* Техническая кибернетика. Киев. Тех. Литература, 1962. – 422 с.

25. *Клюев В.В., Легкобыт А.К., Колтовой Н.А.* Автоматизация и механизация на предприятиях с дискретным характером производства на основе системы технического зрения // Зрительные системы: Матер. Всесоюзн. симпоз.: «Зрение организмов и роботов. 1985 г. – Вильнюс: МВиССО ЛитССР, 1987. – С. 238 – 257.

26. *Козубовский С.Ф.* Корреляционно-экстремальные системы: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1973. – 224 с.

27. *Кориков А.М.* Корреляционно-экстремальные робототехнические системы // Корреляционно-экстремальные системы управления: Докл. 1-ой Всесоюзн. конф. по корреляционно-экстрем. системам. – Томск: ТГУ, 1979. – С. 198-202.

28. *Кориков А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Корреляционные зрительные системы роботов; Под ред. А.М. Корикова. – Томск: Радио и связь, Томск, отдел., 1990. – 264 с

29. *Кориков А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Корреляционные зрительные системы. Томск: Радио и связь. Томское отделение. 1990. – 264 с.

30. *Корреляционно-экстремальные* видеосенсорные системы для роботов/ Ю.А. Андреев, Н.Н. Белоглазова, А.М. Кориков, В.И. Сырямкин, В.П. Тарасенко. Томск: Изд-во Том. Ун-та, 1986. – 240 с.

31. *Корреляционно-экстремальные* системы и их проектирование. /Под ред. А.Г.Буймова. – Томск: ТГУ, 1988. – N10.

32. *Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П.* Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. – М.: Наука, 1979. – 448 с.

33. *Куафе Ф.* Взаимодействие робота с внешней средой: Пер. с франц. – М.: Мир, 1985. – 285 с.

34. *Кулешов В.С., Клевалин В.А., Дунин-Баровский И.И.* Применение и особенности проектирования систем технического зрения промышленных роботов // Станки и инструмент. – 1990. – N 2. – С. 34 – 35.

35. *Любченко В., Тяжлов Ю.* Осторожно: многоядерный процессор. – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.osp.ru/os/2007/06/4337893/ , свободный.

36. *Медведев Г.А., Тарасенко В.П.* Вероятностные методы исследования экстремальных систем. – М.: Наука, 1967. – 456 с.

37. *Мелик-Шахназаров А. М., Маркатун М. Г.* Цифровые измерительные системы корреляционного типа. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.

38. *Методы* робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.

39. *Митропольский Ю.И.* Суперсистемы - следующий этап развития супер-ЭВМ. Информационные технологии и вычислительные системы. – М.: ОИВТА РАН, ИВВС РАН, 1996.

40. *Нейронные* сети: история развития теории. Кн. 5: Учеб. пособие для вузов / Под общей ред. А.И. Галушкина и Я.З. Цыпкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 840 с.

41. *Нечеткие* множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

42. *Оптико-электронные* измерительные устройства и системы: Тез.докл. Всесоюз.конф./Под ред. И.Н.Пустынского, В.С.Титова, М.И.Курячего, В.И.Сырямкина. – Томск: Радио и связь. – 1989. – Ч. 1. – 222 с.

43. *Оптико-электронные* приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Материалы Международной конференции. – Курск: КПИ, 1993. – 238 с.

44. *Острем К.* Введение в стохастическую теорию управления. М.: Мир, 1973.

45. *Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1969. – 384 с.

46. *Попов Е.П.* Динамика систем автоматического регулирования. – М.: Гостехиздат, 1954. – 315 с.

47. *Простой* корреляционный орган зрения для промышленных роботов // Приборы и элементы автоматики и вычислительной техники: Экспресс-информация, – М.: ВИНИТИ, 1975. – N 48. – С. 10 – 18.

48. *Путятин Е.П., Аверин С.И.* Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990 – 320 с.

49. *Розенфельд А.* Распознавание и обработка изображений: Пер. с англ./ Под ред. Д.С.Лебедева. – М.: Мир, 1972. – 230 с.

50. *Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л.* Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974. – 248 с.

51. *Системы* очувствления промышленных роботов и гибких производственных систем: Сб. научн. тр. / Под ред. И.М.Макарова, Е.П.Попова. – М.: Наука, 1989. – 142 с.

52. *Системы* с переменной структурой и их применение в задачах автоматизации полета: Сб. статей / Под ред. Б.Н. Петрова и С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1968. – 324 с.

53. *Системы* технического зрения: Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю. Г. Якушенков и др. Под ред. В.И. Сырямкина, В.С Титова. – Томск: МГП «РАСКО» при изд. «Радио и связь», 1992. – 367 с.

54. *Советский* энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 1600 с.

55. *Тарасенко В.П.* Применение оптических функциональных преобразователей для целей опознавания двумерных геометрических образов // Вычислительная техника. Автоматика / Труды СФТИ. – Томск: ТГУ, 1964. – Вып. 44. – С. 118-121.

56. *Тарасенко В.П., Матушевский В.В., Пашнев С.Я.* Исследование корреляционно-экстремального алгоритма астроориентации // Методы оптимизации автоматических систем. – М.: Энергия, 1972. – С. 249 – 265.

57. *Тарасенко В.П., Рябышкин Б.С. Афримзон А.Ф.* Оптические корреляторы и их применение // Итоги исследований по кибернетике: Труды межвуз. научн. конф., посвящ. пятидесятилетию Великой Октяб. Социал. Революц. – Томск: ТГУ, 1968. – С.137 – 160.Азерб. ССР, 1989. – С. 74-79.

58. *Усков А.А., Кузьмин А.В.* Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. – 143 с.

59. *Фельдбаум А.А.* Теория оптимальных систем М.: Физмат-гиз, 1964.

60. *Фельдбаум А.А.* Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966. – 624 с.

61. *Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г.* Методы теории автоматического управления. – М.: Наука, 1971. – 744 с.

62. *Хорошевский В.Г.* Архитектура вычислительных систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 512 с.

63. *Хромов Л.И., Цыцулин А.К., Куликов А.Н.* Видеоинформатика: Передача и компьютерная обработка видеоинформации. – М.: Радио и связь, 1991. – 192 с.

64. *Цыпкин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.

65. *Цыпкин Я.З.* Основы теории обучающихся систем. – М.: Наука, 1970. – 252 с.

66. *Шалыто А.А.* SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука, 1998. – 628 с.

67. *Шидловский С.В.* Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры в системах с распределенными параметрами. – Томск: Томский госуниверситет, 2007. – 192 с.

68. *Шидловский С.В.* Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. – Томск: Томский госуниверситет, 2006. – 288 с.

69. *Шмидт Д., Шварц В.* Оптоэлектронные сенсорные системы: Пер. с нем. – М.: Мир, 1991. – 96 с.

70. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 688 с.

71. *Экстремальная* радионавигация / В.И.Алексеев, А.М. Кориков, Р. И. Полонников, В.П. Тарасенко; Под ред. Р.И. Полонникова и В.П. Тарасенко. – М.: Наука, 1978. – 279 с.

72. *Энциклопедия* кибернетики / Под ред. В.М. Глушкова и др. – Киев. 1975. – Т. 1, 2.

73. *Яглом А. М., Яглом И. М.* Вероятность и информация. – М.: Наука, 1973.

74. *A heuristic* approach to reinforcement learning control systems. // IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-10, no. 4,pp. 390-394, 1965.

75. *Artificial* intelligence and intelligent automata. // M.I.T. Project MAC, Cambridge, MA, Progr. Rep. 1968-1969,1969.

76. *Asai K., Kitajima S.* A method for optimizing control of multimodal systems using fuzzy automata. // Inform. Sci. vol. 39, no. 4, pp. 343-353, 1971.

77. *Bejczy A. K.* Remote manipulator system technology review. // Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, Tech. Rep. 760-77, July 1972.

78. *Branicky M.* Studies in Hybrid Systems: Modeling, Analysis, and Control, Sc.D. Dissertation, Electrical Engineering and Computer Science Dept., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, June 2005. – 198 p.

79. *Bush R. R., Estes W. K., Eds*. Studies in Mathematical Learning Theory. Stanford, CA: Stanford Univ. Press, 1959.

80. *Bush R.R., Mosteller F.* Stochastic Models for Learning Theory. New York: Wiley, 1955.

81. *Collective* behavior and control problems. // Machine Intelligence 3. Edinburgh, Scotland: Edinburgh Univ. Press, 1968.

82. *Eckman D.* Automatic Controls. New York: Wiley, 1958.

83. *Eveleigh V.W.* Adaptive Control and Optimization Techniques. New York: McGraw-Hill, 1967.

84. *Feigenbaum E.A., Feldman J.* Computers and Thought. New York: McGraw-Hill, 1963.

85. *Firschein O., Fischier M., Coles S.L., Tenenbaum J.H.* Forecasting and assessing the impact of artificial intelligence on society. // Stanford Res. Inst., Menlo Park, CA, Tech. Rep., Feb.1973.

86. *Fu K. S., Fung L.W.* Decision making in a fuzzy environment. // Purdue Univ., West Lafayette, IN, Tech. Rep. TR-EE 73-22, May 1973.

87. *Fu K.S., McLaren R.W.* An application of stochastic automata to the synthesis of learning systems. // Purdue Univ., West Lafayette, IN, Tech. Rep. TR-EE 65-17, Sept. 1965.

88. *Fu K.S., Swain P.A.* On syntactic pattern recognition // Software Engineering, vol. II, J. T. Tou, Ed. New York: Academic Press, Nov. 1971.

89. *Fu K.S., Tou J.T.* Learning Systems and Intelligent Robots. New York: Plenum Press, 1974.

90. *Fu K.S.* Learning control systems //Advances in Information Systems Science, J. T. Tou, Ed. New York: Plenum Press, 1969.

91. *Fu K. S., Gibson J. E., Hill J. D., Luisi J. A., Ralble R. H., Waltz M. D.* Philosophy and state of the art of learning control systems. Purdue Univ., West Lafayette, IN, Tech. Rep. TR-EE 63-7, Nov. 1963.

92. *Gibson J.E.* Non-linear Automatic Control. New York: McGraw-Hill, 1962, ch. 11.

93. *Hill J. W., Sword A.J.* Studies to design and develop improved remote manipulator systems. // Stanford Res. Inst., Menlo Park, CA, SRI Tech. Rep. 1587, Nov. 1972.

94. *Hill J.W., Bliss J.C.* A tactile perception studies related to teleoperator systems. // Stanford Res. Inst., Menlo Park, CA, Memo. Rep., Contract NAS2-5409, Final Rep. 2, June 1971.

95. *Identification* of Systems. New York: Van Nostrand Rein-hold, 1972.

96. *Jones L.E.* On the choice of subgoals for learning control systems // IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-13, no. 6, pp. 613-621, 1968.

97. *Kahne S.J., Fu K.S.* Learning system heuristics, correspondence and response. // IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-11, no. 4, pp. 611-612, 1966.

98. *Klinger A*. Natural language, linguistic processing, and speed understanding: Recent research and future goals. // Univ. California, Los Angeles, Tech. Rep. R-1377ARPA Rep., Dec. 1973.

99. *Kushner H*. Introduction to Stochastic Control. New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1971.

100. *Lainiotis D., Deshpande J. G., Upadhyay T. N.* Optimal adaptive control: A nonlinear separation theorem // Int. J. Contr., vol. 15, pp. 877-888, 1972.

101. *Learning* control systems // Computer and Information Sciences J. T. Tou and R. H. Wilcox, Eds. New York: Spartan Books, 1964.

102. *Learning* Control Systems and Intelligent Control Systems: An Intersection of Artificial Intelligence and Automatic Control // IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-16, no. 1, pp. 70-72, 1971.

103. *Learning* control systems—Review and outlook // IEEE Trans. Automat. Contr. vol. AC-15, no. 2, pp. 210-221, 1970.

104. *Learning* Machines. New York: McGraw-Hill, 1965.

105. *Learning* system theory for general system studies, in Proc. 3rd Annu. Meet., Society of General Systems Research (Univ. Maryland, College Park), Sept. 1974.

106. *Lyman J., Freedy A.* Summary of research activities on upper prosthesis control. // Butt. Prosthetic Res., Winter, 1973.

107. *McGee R.B.* Control of legged locomotion systems. // Proc. 1977 JACC, San Francisco, CA, June 1977.

108. *Mendel J.M., Fu K.S.* Adaptive, Learning, and Pattern Recognition Systems Theory and Applications. New York: Academic Press, 1970.

109. *Mendel J.M.* Discrete Techniques of Parameter Estimation. New York: Marcel Dekker, 1973.

110. *Mesarovic M.D.* On self-organization systems, in Self-Organizing Systems-1962, M. C. Yovtts, GT~T. lacobi, and G. D. Goldstein, Eds. New York: Spartan Books, 1962.

111. *Mesarovic M., Macko D., Takahara Y.* Theory of Hierarchical Multilevel Systems. New York: Academic Press, 1970.

112. *Minsky M.L., Papert S.A*. Research on intelligent automata. // M.I.T. Project MAC, Cambridge, MA, Status Rep. II, Sept. 1967.

113. *Minsky M.L.* Artificial Intelligence. New York: McGraw-Hill, 1972.

114. *Mowrer O.H.* Learning Theory and Behavior. New York: Wiley, 1960.

115. *Murphy W.J.* Optimal stochastic control of discrete linear systems with unknown gain // IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-13, no. 4, Aug. 1968.

116. *Nichols N.B.* Theory of Servomechanisms, H. M. James, N. B. Nichols, and R. J. Phillips, Eds. Cambridge, MA: M.I.T. Radiation Technology Lab. Publication, 1946.

117. *Norman M.F.* Mathematical learning theory. // Mathematics of the Decision Sciences, G. Dantzig B., Veinott A. F., Eds. New York: Amer. Math. Soc. Publications, 1968.

118. *Outline* of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. // IEEE Trans. Syst., Man, Cybem., vol. SMC-3, no. 1, pp. 28-44, 1973.

119. *Pattern* recognition and adaptive control // IEEE Trans.Appl. Industry, vol. 83 (74), p. 269, 1964.

120. *Peschon J.* Disciplines and Techniques of Systems Control. Boston, MA: Blaisdell, 1965.

121. *Pugachev V.S.* A Bayes approach to the theory of learning systems // presented at 3rd World Congr. of IF AC, June 1966.

122. *Robot* arm dynamics and control. // Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, Tech. Rep. 33-669, Feb. 1970.

123. *Rosen C.A., Nilsson N.J.* An intelligent automation. // 1967 IEEE Int. Conv. Rec., Part 9 (New York, NY), Mar. 1967.

124. *Sage A.P., Melsa J.L.* System Identification. New York: Academic Press, 1971.

125. *Sage A.Pr, Arafeh S.A*. On the multilevel hierarchical de-composition and co-ordination methods in large scale systems. // Proc. 3rd Milwaukee Symp. Automatic Computation and ControlMSAC-75 (Milwaukee, WI), Apr. 1975.

126. *Saridis G.N., Stephanou H.E*. A hierarchical approach to the control of a prosthetic arm. // IEEE Trans. Syst., Man, Cybem., vol. SMC-7, pp. 407-420, June 1977.

127. *Saridis G.N*. Self-Organizing Control of Stochastic Systems. New York: Marcel Dekker, 1977.

128. *Slagle J.R*. Artificial Intelligence; The Heuristic Programming Approach. New York: McGraw-Hill, 1971.

129. *State* space models of remote manipulation tasks. // Proc. 1969 Int. Joint Conf. Artificial Intelligence (Washington, DC), 1969.

130. *Survey* of learning control systems for space vehicle applications. // Preprints JACC, Aug. 1966.

131. *Sworder D.D*. Optimal Adaptive Control Systems. New York: Academic Press, 1966.

132. *Syntactic* Methods in Pattern Recognition. New York: Academic Press, 1974.

133. *The development* of systems engineering // presented at the 2nd Annu. Meet. General Systems Research Soc., Univ. Maryland, College Park, 1973.

134. *Wee W.G., Fu K.S.* A formulation of fuzzy automata and its application as a model of learning systems // IEEE Trans.SystemsSci. Cybem.,vol. SSC-5,no. 3,pp. 215-223, 1969.

135. *Whitney D.E*. Resolved motion control of manipulators and human prosthesis. // IEEE Trans. Man-Machine Syst., vol. MMS-10,no. 2, 1969.

136. *Zaborszky J., Berger R.L.* Self-optimalizing adaptive control // IEEE Trans. Appl. Industry, vol. 81 (63), p. 256,1962.

137. *Zadeh L.A., Desoer C.* Linear System Theory. New York: McGraw-Hill, 1963.

138. *Zadeh L.A*. Fuzzy sets. // Inform. Control, vol. 8, no. 3, pp. 338-355, 1965.

# Глава 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ СРАВНЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ И ЦВЕТНОСТЕЙ

## 2.1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке теории КЭС необходимо рассмотреть такие основные вопросы, связанные с синтезом и анализом этих зрительных систем, как разработка обобщенной схемы алгоритма корреляционного сравнения изображений, выбор параметров ЭИ (выбор «точки съемки» ЭИ), исследование помехоустойчивости КЭС, использующих точечные и протяженные изображения, синтез методов пространственной фильтрации помех в оптическом корреляторе. Кроме этого особую актуальность приобретают вопросы разработки корреляционных алгоритмов сравнения трехмерных и цветных изображений, применение которых значительно расширяет область использования КЭС. Изложению перечисленных вопросов и посвящена настоящая глава.

## 2.2. ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА АЛГОРИТМА КОРРЕЛЯЦИОННОГО СРАВНЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Известно, что в обобщенной форме процесс технического зрения содержит следующие основные этапы [35, 42]: формирование, предварительную обработку, сегментацию, описание и анализ изображения. Удельный вес каждого из этапов неодинаков в конкретных разработках систем технического зрения (СТЗ) и они, в свою очередь, разбиваются на различные подэтапы. Изложенное и опыт разработки КЭС приводят к схеме алгоритма корреляционного сравнения черно-белых и цветных изображений различной размерности, представленной на рис. 2.1 [25, 33, 36]. Данная схема является в определенном смысле обобщенной, и в действующих образцах КЭС отдельные подэтапы стадии обработки видеоинформации могут совмещаться или

вообще отсутствовать. Здесь важно подчеркнуть, и рассматриваемая обобщенная схема алгоритма корреляционного зрения это отражает, что для КЭС желательна обратная связь между этапами и подэтапами корреляционного сравнения изображений. Алгоритмы работы КЭС необходимо строить итеративно, так, чтобы в зависимости от результатов данного этапа (подэтапа) происходил либо переход к очередному этапу (подэтапу), либо возврат на какой-либо из предшествующих этапов (подэтапов), но уже с активным использованием полученной к этому моменту информации.

Рассмотрим кратко каждый из этапов обобщенной схемы.

Первый этап обработки зрительной информации – формирование ТИ – включает в себя автоматическую настройку (выбор поля зрения, фокусировка, установка диапазона (дальности действия)), ввод ТИ (запись изображения в накопитель ТИ) и разделение ТИ на основные цвета (красный, зеленый, синий).

На втором этапе корреляционного сравнения изображений осуществляется предварительная обработка ТИ, предназначенная для удаления шумов (сглаживание, фильтрация), улучшения контрастности, коррекции искажений и бинаризации изображения.

На третьем этапе корреляционного зрения реализуются алгоритмы сегментации и кодирования ТИ. Сегментацией называют процесс разбиения изображения рабочей сцены на составные части: объекты, их фрагменты или характерные особенности [34, 35, 42]. Под кодированием понимают сжатие видеоинформации для хранения в памяти КЭС [34, 36]. На этом этапе возможны следующие режимы работы КЭС:

1-й режим – без преобразования ТИ – использование обычных (полных) изображений;

2-й режим – преобразование полных изображений в контурные;

3-й режим – преобразование полных изображений в точечные (например, путем формирования точек изображения в местах перегиба контура, путем вычисления координат центра тяжести части или всего изображения);

4-й режим – выделение информативной части (частей) ТИ (инвертирование, выделение постояннонаблюдаемых частей – селекция элементов изображения);

5-й режим – преобразование изображения по заданному закону (перевычисление в другие системы координат);

6-й режим – фильтрация изображений от несовпадающих частей (экстраполяция смещения ТИ, использование режима микроплана ТИ).

Выбор режима работы КЭС естественно основывать на некоторых характеристиках ТИ и ВКФ [25, 26, 40]. При этом целесообразно использовать геометрические характеристики элементов полных изображений ($S_{GT}$ – площадь объекта, $l$ – длина (или ширина) объекта, $S_{\text{ти}}$ – ТИ, характеризующее площадь объекта и помехи) и кадра (экрана) накопителя ТИ ($S_{\text{Э}}$ – площадь, $l_{\text{Э}}$ – диаметр (ширина и высота)). Для изменения режима работы КЭС (т. е. накопителя ТИ) можно использовать следующие отношения:

$$K_S = S_{GT} / S_{\text{Э}};\ K_{\text{Э}} = l / l_{\text{Э}};\ K'_S = S_{GT} / S_{\text{ТИ}};\ \Delta S = S_{\text{ТИ}} - S_{GT}\,. \qquad (2.1)$$

Соотношения (2.1), легко реализуемые программно или аппаратно [25 – 27], следует использовать в качестве критериев для переключения некоторых режимов работы накопителя ТИ. При этом переход на другой режим необходимо осуществлять, если соблюдается одно (или несколько) из условий:

$$K_S < K_S^*;\ K_e \le K_e^*;\ K'_S < K_S^*;\ \Delta S \le \Delta S^*, \qquad (2.2)$$

где $K_S^*, K_e^*, \Delta S^*$ – критические (предельные) значения соответствующих величин $K_S, K_e, \Delta S$, превышение которых обусловит сбой в работе КЭС (величины $K_S, K_e, \Delta S$ получены экспериментально [24, 40]).

Ясно, что $K_S, K_e$ следует использовать при отсутствии, а $K'_S$, $\Delta S$ – при наличии помех на ТИ. Возможны также ситуации, когда режимами работы накопителя ТИ нужно управлять, используя два критерия: один – при отсутствии помех, другой - при их наличии. Таким образом, по величинам $K_S, K_e, K'_S, \Delta S$ принимается решение о выборе какого-либо режима работы накопителя ТИ.

Дадим примерную схему по выбору основных режимов работы накопителя ТИ [25, 26]:

1-й режим используется при $K_S \le K_S^*;\ K_e \le K_e^*;\ K'_S \le K_S'^*;\ \Delta S \le \Delta S^*$;

2-й режим применяется при $K_S > K_S^*;\ K_e > K_e^*;\ K'_S \le K_S'^*;\ \Delta S \le \Delta S^*$, при этом помехи не должны искажать контур объекта;

3-й режим используется при $K_S > K_S^*; K_e > K_e^*; K'_S > K'^*_S$; $\Delta S > \Delta S^*$;

4-й режим применяется в случае, когда использование предыдущих режимов не дает положительного эффекта, в частности, если элементы ТИ флуктуируют по яркости свечения и координатам, а информативная часть ТИ не воспринимается ДТИ;

5-ый режим применяется в случае, если необходимо обеспечить оценку угловой координаты с высокой точностью, не используя при этом механического вращения ЭИ;

6-ой режим используется, если $K_S > K_S^*; \Delta S > \Delta S^*$. Критические значения $K_S^*, K_e^*, K'_S, \Delta S$ выбираются на основе предварительных исследований с учетом желаемых точностных характеристик КЭС.

Четвертый этап обработки зрительной информации – формирование КФ – реализует следующие способы формирования корреляционных функций. Наиболее прост классический КА, вычисляющий ВКФ или интеграл свертки. КА в классическом варианте требует значительных вычислительных мощностей для осуществления операций умножения и интегрирования при всех сдвигах и разворотах ТИ и ЭИ [18, 25, 26, 30]. КА с фильтрацией обеспечивает фильтрацию (пространственную или иную) от помех ТИ, ЭИ и ВКФ [4 – 6, 25]. КА с совмещением ТИ и ЭИ по углу по сравнению с КА без углового совмещения изображений допускает разворот ТИ на любой угол и требует вращения ЭИ по углу [18, 25]. Безэталонный КА синтезирует ВКФ с помощью последовательной перезаписи ТИ и ЭИ и основан на использовании динамического коррелятора [14, 41]. КА, формирующий слагаемые ВКФ по заданному закону, характеризуется конструкцией коррелятора и определенным расположением элементов ТИ и ЭИ [1, 2, 12]. КА с разложением на цвета обеспечивает формирование ВКФ, соответствующих слагаемым цвета изображений [38]. Применение конкретного формирователя КФ обуславливается задачей, выполняемой КЭС. На этапе анализа КФ используется один из следующих алгоритмов, приведенных на рис. 2.1. При амплитудном КА необходимая информация извлекается на основе оценки амплитуды главного максимума ВКФ [26]. Это самый простой КА, однако он хуже других обеспечивает точностные характеристики КЭС.

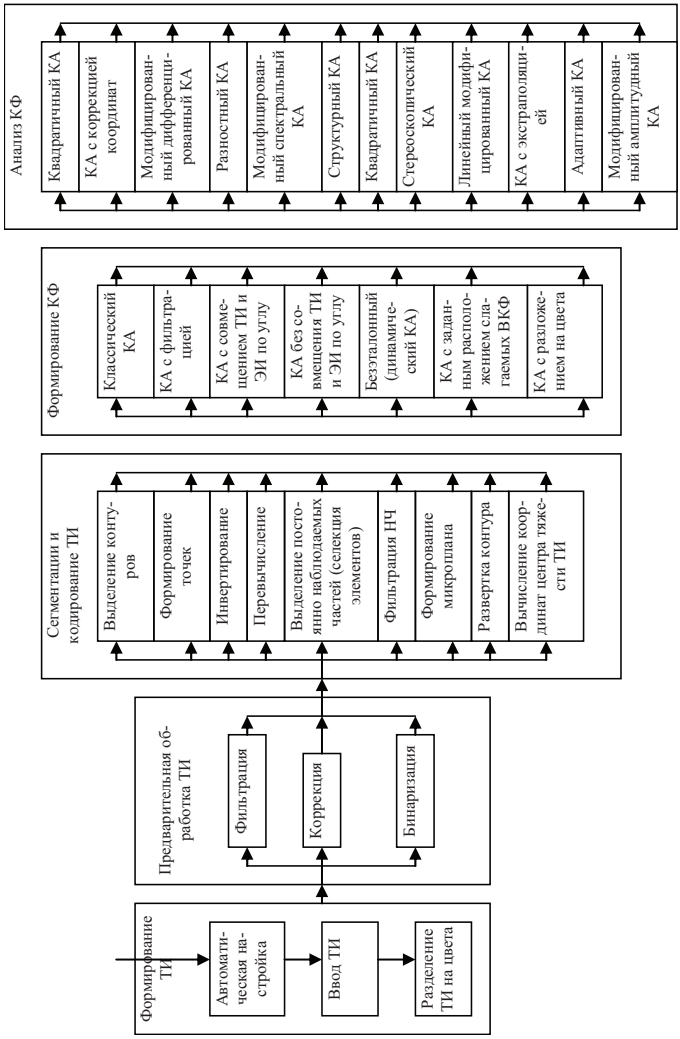


Рис. 2.1. Алгоритм корреляционной обработки

Более высокие точностные характеристики по сравнению с амплитудным КА обеспечивает модифицированный амплитудный КА, в котором необходимая информация извлекается на основе анализа параметров (ширина, крутизна) ВКФ [25]. КА с коррекцией координат допускает непрерывное вращение ЭИ при угловом совмещении изображений. При этом полученная грубая оценка координат уточняется [11, 25, 36].

В модифицированном дифференциальном КА также осуществляется угловое вращение ЭИ и коррекция координат путем коммутации соответствующих квадрантов фотоприемника анализатора КФ [3]. Разностный КА, основанный на поэлементном вычислении разностей интенсивности ТИ и ЭИ, по объему вычислений имеет преимущество перед классическим КА, требующим проведения операции умножения [19, 25]. Модифицированный спектральный алгоритм, определяющий угловую координату, основан на Фурье-преобразовании и вычисляет различие спектров ТИ и дискретно развернутых ЭИ [13]. Структурный (синтаксический или лингвистический) КА базируется на трех процедурах: выделении контуров ТИ, выделении дескрипторов (линий определенной формы, сегментов) и описании их параметров – синтаксический анализ с использованием грамматики (классификация). При реализации алгоритма производится сравнение признаков, а не полных изображений [19]. Это значительно снижает необходимый объем памяти КЭС и уменьшает объем вычислительных операций.

Квадратичный КА реализуется путем возведения в квадрат корреляционной функции, за счет чего увеличивается разница между главным и побочным (побочными) максимумами [25]. Это значительно повышает помехоустойчивость КЭС.

Стереоскопический и линейный модифицированный КА предназначены для сравнения трехмерных изображений (т. е. анализа трехмерных цен). При этом стереоскопический КА основан на корреляционной оценке параллакса, а линейный модифицированный – корреляционном сравнении проекций объекта (объектов) в рабочей зоне [19, 22]. Отметим здесь, что первый КА по сравнению со вторым КА менее громоздок и требует меньших вычислительных затрат.

КА с экстраполяцией осуществляет фильтрацию ТИ и ЭИ путем прогнозирования смещения ТИ. Однако такой КА требует априорной информации о смещении (видоизменении) объекта в рабочей зоне [7].

Адаптивный КА синтезирован на основе вышеописанных КА и осуществляет подстройку параметров КЭС (например, выделение информативных признаков ТИ, регулирование чувствительности анализатора КФ, фильтрацию ТИ, ЭИ и ВКФ и др.) при наличии помех на сравниваемых изображениях и изменении ситуации в рабочей зоне [4 – 10, 15].

Выбор конкретного алгоритма определяется задачей, выполняемой КЭС.

## 2.3. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭТАЛОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Под выбором параметров ЭИ будем понимать выбор размера и положения центра ЭИ на ТИ (при совмещении ТИ и меньшей части ЭИ). Представим функции, описывающие ТИ и ЭИ, в виде аддитивной смеси полезной информации и помех [17]:

$$F_1(x,y) = F_{1c} + F_{1H} + \eta_1;\ F_2(x',y') = F_{2c} + F_{2H} + \eta_2, \qquad (2.3)$$

где $\eta_1$, $\eta_2$ – случайные функции, описывающие реализации шума на ТИ и ЭИ; $F_{1c}$, $F_{2c}$ и $F_{1H}$, $F_{2H}$ – детерминированные функции, описывающие совпадающие и несовпадающие части. Пусть $F_1(x,y)$ есть реализация случайной функции, определенная в прямоугольной области $S$ размером $A$x$B$, а $F_2(x',y')$ – фиксированная реализация части ЭИ, определенная в области $\zeta$ размером $A_1$x$B_2$ , при этом с $\zeta$ $C$ $S$, $F_2(x',y') = 0$ вне $\zeta$. Причем $XOY$, $X'OY'$ – системы координат, связанные соответственно с ТИ и ЭИ. Пусть $\xi$, $\eta$ – поисковые сдвиги ЭИ относительно ТИ. Сформулируем требования к выбору положения точки 0 в системе координат $XOY$ и к выбору значений $A_1$, $B_1$, обеспечивающих нулевую систематическую ошибку определения координат.

ВКФ представим в виде трех слагаемых: сигнальной $g_s$, искажающей $g_H$ и шумовой $g_\eta$ функций:

$$J(\xi,\eta) = g_s + g_н + g_\eta.$$

Слагаемые ВКФ опишем следующими выражениями:

$$g_c(\xi,\eta) = \int_\xi F_{1c}F_{2c}d\zeta;$$
$$g_H(\xi,\eta) = \int_\xi (F_{1c}F_{2c} + F_{1H}F_{2c} + F_{1H}F_{2H})d\zeta;$$
$$g_\eta(\xi,\eta) = \int_\xi (\eta_2(F_{1c} + F_{1H}) + \eta_1(F_{2c} + F_{2H}))d\zeta. \qquad (2.4)$$

Рассмотрим три случая (для простоты при одномерных реализациях ТИ и ЭИ) [17].

**Случай 1.** $F_{1c}>0$, $F_{2c}>0$, $F_{1H}=F_{2H}=0$, $g_c>0$, $g_H=g_\eta=0$ (помехи и шумы отсутствуют на ТИ и ЭИ). Равенство $P$

$$F_{1e}\left(x+a, y+b\right)=F_{2e}\left(x+\xi, y+\eta\right)\Big|_{\substack{\xi=a\\ \eta=b}}.$$

Найдем из условий, при которых $g_c$ имеет максимум в окрестности $\{\xi=a, \eta=b\}$. Как известно [37], условие существования max $g_c(\xi)$ в окрестности точки $\xi=a$ есть $g_c(\xi)\,\big|\,\xi=a>g_c(\xi)$

или
$$\frac{\partial}{\partial\xi}g_c\left(\xi\right)\Big|\xi=a\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}g_c\left(\xi\right)\Big|\xi=a. \qquad (2.5)$$

Исследуем выражение $g_c\left(\xi\right)\big|\xi=a>g_c\left(\xi\right)\big|\xi\neq a$. Можно записать

$$\int_\xi\left(F_{2c}^{-2}+\tilde{F}_{2c}^2\right)\Big|_{\xi=a}d\varsigma>\int_\xi\left(\overline{F}_{1c}\overline{F}_{2c}+\tilde{F}_{1c}\tilde{F}_{2c}\right)d\varsigma\Big|_{\xi\neq a}, \qquad (2.6)$$

где $\overline{F}_{1c},\overline{F}_{2c}$ – среднее значение изображений; $\tilde{F}_{1c},\tilde{F}_{2c}$ – переменные составляющие изображений. Причем

$$F_{1c}=\overline{F}_{1c}+\tilde{F}_{1c},\quad F_{2c}=\overline{F}_{2c}+\tilde{F}_{2c}.$$

Положим, что функция, описывающая ТИ, достигает наибольшего значения в области некоторой точке $x$. Если поместить в точку $x$ центр ЭИ и уменьшить его размер, то, используя [20, 43], запишем

$$\lim_{a\to0}(\overline{F}_{2c}^2+\tilde{F}_{2c}^2)=F_2^2(x_0);\ \lim_{a_1\to0}(\overline{F}_{1c}\overline{F}_{2c}+\tilde{F}_{1c}\tilde{F}_{2c})=F_2(x_0)F_1(x).$$

Так как $F_2(x_0)$ является наибольшим значением $F_2(x)$ в $S$, то, используя в качестве ЭИ окрестность точки $x=x_0$, обеспечиваем работоспособность КЭС на всей области определения изображения.

Рассмотрим теперь частный случай, когда $F_2(x',y')$ имеет в области $\zeta$ несколько примерно равных локальных максимумов. В этой связи проведем анализ условия $\frac{\partial}{\partial\xi}g_c(\xi)\big|_{\xi=0}=0$ в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial\xi}-\int_\zeta F_{1c}(x)F_{2c}(x+\xi)dx\Big|_{\xi=a}=\int_\zeta F_{1c}(x)\frac{\partial}{\partial\xi}(x-\xi)dx\Big|_{\xi=0}=0. \qquad (2.8)$$

Для вычисления равенства (2.8) необходимо, чтобы функция $F_{2c}(x+\xi)$ имела экстремумы в области ζ. В качестве примера рассмотрим неравенство

$$\frac{\partial^2}{\partial\xi^2} g_c(\xi)\Big|_{\xi=0} = \frac{\partial^2}{\partial\xi^2}\int_{\zeta} F_{1c}F_{2c}dx\Big|_{\xi=0} = \\ = \int_{\zeta} F_{1c}\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}F_{2c}(x+\xi)dx\Big|_{\xi=0} < 0, \tag{2.9}$$

из анализа которого следует, что экстремальными точками функции $F_{2c}(x+\xi)$ являются точки максимумов. Это означает, что для выполнения правильной работы КЭС необходимо, чтобы центр ЭИ и его размеры обеспечивали существование таких участков, где функция *P* нарастает и спадает, пройдя свое наибольшее значение. Если $g_c(\xi,\eta) = g_c(\xi)g_c(\eta)$, а в точках $\{\xi = a\}$, $\{\xi = b\}$ функции $g_c(\xi), g_c(\eta)$ удовлетворяют условиям существования максимума

$$\left[g_c(\xi)\right]'_{\xi} = 0,\ \left[g_c(\xi)\right]''_{\xi\xi} < 0,\ \left[g_c(\eta)\right]'_{\eta} = 0,\ \left[g_c(\eta)\right]''_{\eta\eta} = 0, \tag{2.10}$$

то и в точке $\{\xi = a; \eta = b\}$ функция $g_c(\xi,\eta)$ достигает своего максимума.

Условие существования максимума $g_c(\xi,\eta)$ в точке $\{\xi = a; \eta = b\}$ будет

$$\Delta\left\{\left[g_c(\xi,\eta)\right]''_{\xi\xi}\left[g_c(\xi,\eta)\right]''_{\eta\eta} - \left[g_c(\xi,\eta)''\right]^2\right\}\Bigg|_{\substack{\xi=a\\ \eta=b}} > 0. \tag{2.11}$$

Анализ (2.11) показывает, что Δ>0, если в точке $\{\xi = a; \eta = b\}$ положительно произведение вторых частных производных $g_c(\xi,\eta)$ по ξ и η. Если $\left[g_c(\xi)\right]''_{\xi\xi} < 0,\ g_c(\eta)\ \Big|_{\eta=b} < 0$, то

$$\left[g_c(\xi,\eta)\right]''_{\xi\xi}\Bigg|_{\substack{\xi=a\\ \eta=b}} = \left[g_{c(\xi)}\right]''\Big|\xi =_a g_c(\eta)\Big|_{\eta=b} < 0. \tag{2.12}$$

Если $\left[g_c(\xi,\eta)\right]''_{\eta\eta}\Big|_{\eta=b} < 0$, $g_c(\xi)\Big|_{\xi=a} > 0$, то

$$\left[g_c(\xi,\eta)\right]''_{\eta\eta}\Big|_{\substack{\xi=a\\ \eta=b}} = \left[g_c(\eta)\right]''_{\eta\eta}\Big|_{\eta=b} g_c(\xi)\Big|_{\xi=a} < 0. \qquad (2.13)$$

Таким образом, приведенное доказательство позволяет распространить найденные требования к существованию максимума $g_c(\xi)$ в точке $\{\xi = a\}$ на всю функцию $g_c(\xi,\eta)$.

**Случай 2.** $F_{1c}$>0, $F_{2c}$>0, $F_{1H}$>0, $F_{2H}$>0, $g_c$>0, $g_H$>0, $g_\eta$>0 (на ТИ и ЭИ присутствуют несовпадающие части). Аддитивное взаимодействие $g_C(\xi)$ и $g_H(\eta)$ изменяет положение главного максимума ВКФ, вследствие чего координаты будут определяться из уравнения $\frac{\partial}{\partial\xi}\left[g_c(\xi)+g_H(\xi)\right]=0$. Определим систематические ошибки $\delta_{\Delta\xi}$, $\delta^H_{\Delta\xi}$ (смещения) оценки координат при различных видах функций $g_C(\xi)$ и $g_H(\xi)$ в области точки $\{\xi = a\}$). Зададим функцию $g_C(\xi)$ в виде параболы, а $g_H(\xi)$ – линейной функции $g_C(\xi)$ = $= C_1 - C_2(\xi-a)^2$; $g_H(\xi) = C_3 - C_4(\xi-a)$ ;, $C$=const, $i$=1,4. Тогда $\delta_{\Delta\xi} = -0{,}5C_4 / C_2$. Представим функцию $g_H(\xi)$ в виде параболы $g_H(\xi) = C_5 - C_6(a_H - \xi)$, $C_5 = C_6$ =const, $a_H$ =arg max $g_H(\xi)$.

В этом случае значение ошибки $\delta^H_{\Delta\xi}$ будет $\delta^H_{\Delta\xi}$ = $(aC_2+a_нC_2)(C_б+C_2)^{-1}-a$. Таким образом, точность совмещения изображений повышается по мере уменьшения абсолютного значения параметров $C_4 = \frac{\partial g}{\partial\xi}\eta\Big|_{\xi=a}$ $И$ $C_6 = \frac{\partial^2}{\partial\xi^2} g_H \Big|_{\xi=a}$, характеризующих изменение $g_H(\xi)$ в окрестности точки $\xi = a$. Определим условие выполнения требования $C_4$=0. Можно записать

$$C_4 = \frac{\partial}{\partial\xi} g_H(\xi)\Big|_{\xi-a} = \frac{\partial}{\partial\xi}\left\{\int_{\varsigma}\left[F_{1H}F_{2H}(x+\xi)+\right.\right.$$

$$\left.+F_{1H}F_{2H}(x+\xi)+F_{2H}(x+\xi)F_{1c}(x)\right]dx\Big|_{\xi=a} =$$

$$= \left\{ \int_{\varsigma} \left[ F_{1H} \frac{\partial}{\partial \xi} F_{2H}\left(x+\xi\right) + F_{1C} \frac{\partial}{\partial \xi} * F_{2H}\left(x+\xi\right) \right] dx \right\} \Big|_{\xi=a}$$

при

$$g_H = \int_{\xi} \left( F_{1H} F_{2C} + F_{1H} F_{2H} + F_{2H} F_{1C} \right) dx . \qquad (2.14)$$

Таким образом, если $F_{1\text{H}}$=о, $\frac{\partial}{\partial \xi} F_{2H}\left(x+\xi\right) = 0$, то $C_4$ =0. Физически это означает, что функция, описывающая ТИ, начинается с нулевого уровня, достигает максимума и спадает до нуля при всех значениях изображений.

Рассмотрим частный случай, когда на границе ЭИ $F_{1\text{c}}$ $(x)$, $F_{2\text{c}}$ $\left(x+\xi\right)$ отличны от нуля, причем

$$F_{1C}\left(x\right)\Big|_{x=x_0 \mp a_1/2} = F_{1H}\left(x\right)\Big|_{x=x_0 \mp a_1/2} ;$$

$$F_{2C}\left(x+\xi\right)\Big|_{x=x_0 \mp a_1/2} = F_{2H}\left(x+\xi\right)\Big|_{x=x_0 \mp a_1/2} . \qquad (2.15)$$

Пусть в начальном состоянии $\xi = a$ ($F_{1\text{c}}$ и $F_{2c}$ совмещены, причем $F_{1H}$ = 0 и $F_{2H}$ = 0). Так как $F_1$=0 не $\varsigma$, а $F_{1H}$ = 0, $F_{2H}$ = 0 на той части области $\varsigma$, где определены $F_{1c}$, $F_{2c}$, причем $F_{1H}$ = 0, если $F_{2H} \neq 0$, и $F_{2H}$ = 0, если $F_{1\text{H}} \neq 0$, то при достаточно малом смещении $\Delta\xi$ изображений значение $F_{1H}$ и $F_{2H}$ на границах области определяется следующими выражениями:

$$F_{1H}\left(x\right)\Big|_{x=x_0+a_1/2+\Delta\xi} = F_{2c}\left(x+\xi\right)\Big|_{x=x_0 \mp a_1/2} \xi = a + \left[F_{2c}\left(x+\xi\right)\right]'\Big|_{x=x_0+a_1/2} \xi = a \cdot \Delta\xi ;$$

$$F_{2H}\left(x+\xi\right)\Big|_{\substack{\xi=a+\Delta\xi \\ x=x_0 \mp a_1/2}} = F_{1c}\left(x\right)\Big|_{x=x_0-a_2/2} + \left[F_{1C}\left(x\right)\right]'\Big|_{x=x_0-a_1/2} * (-1)\,\Delta\xi . \qquad (2.16)$$

Если

$$\left[F_{2C}\left(x+\xi\right)\right]'_x\Big|_{\substack{\xi=a\\ x=x_0+a_1/2}} * F_{2c}\left(x+\xi\right)\Big|_{\substack{\xi=a\\ x=x_0+a_1/2}} = \\ = -\left[F_{2C}\left(x+\xi\right)\right]'_x\Big|_{\substack{\xi=a\\ x=x_0-a_1/2}} * F_{2C}(x+\xi)\Big|_{\substack{\xi=a\\ x=x_0-a_1/2}}, \tag{2.17}$$

то, подставляя $F_{1H}$, $F_{2H}$ в выражение для $C_4$, получим

$$\frac{\partial}{\partial\xi} g_H\left(\xi\right)\Big|_{\xi=0} = 0. \tag{2.18}$$

Анализ (2.17), (2.18) показывает, что ошибки в совмещении ТИ и ЭИ отсутствуют, если выполняется равенство произведений значений функций $F$ и ее производной на границах эталона. Например, этому требованию могут отвечать функции, имеющие на границах ЭИ равные значения и равные по абсолютной величине, но противоположные по знаку производные.

**Случай 3.** $F_{1C}>0$, $F_{2C}>0$, $F_{1H}>0$, $F_{2H}>0$, $g_C>0$, $g_H>0$, $g_\eta>0$ (на ТИ и ЭИ присутствуют несовпадающие части и шумы). Значение координаты $\xi_1$ =argmax $J_1(\xi)$ определяется из уравнения

$$\left[J_1\left(\xi\right)\right]'_\xi = \left(g_C\right)'_\xi + \left(g_H\right)'_\xi + \left(g_\eta\right)'_\xi = 0, \tag{2.19}$$

причем функция шума описывается следующим выражением:

$$g_\eta\left(\xi\right) = \int_\varsigma \Big\{\left[\eta_1\left(F_{2C}\left(\xi\right)+F_{2H}\left(\xi\right)\right)\right] + \eta_2\left(\xi\right)\left(F_{1C}+F_{1H}\right) + \\ +\eta_1\eta_2\left(\xi\right)\ \Big\}dx. \tag{2.20}$$

Из (2.20) следует, что если $g_\eta\left(\xi\right)$ представить в виде линейной функции или параболы, то точность совмещения изображений повышается по мере уменьшения абсолютных значений параметров $C_8 = \frac{\partial}{\partial\xi} g_\eta\left(\xi\right)$, $C_9 = \frac{\partial^2}{\partial\xi^2} g_\eta\left(\xi\right)$, характеризующих изменение $g_\eta\left(\xi\right)$ в окрестности точки $\{\xi=a\}$. Найдем условия, при которых $C_8 = 0$. Представим $\eta_1, \eta_2$ в следующем виде:

$$\eta_1 = \overline{\eta}_1 + \tilde{\eta}_1,\ \eta_2 = \overline{\eta}_2 + \tilde{\eta}_2, \tag{2.21}$$

где $\overline{\eta}_1\ \overline{\eta}_2$ и $\tilde{\eta}_1\ \tilde{\eta}_2$ – средние и переменные значения соответствующих величин $\eta_1, \eta_2$. Подставив $\eta_1, \eta_2$ в (2.20), получим выражение для $g_\eta(\xi)$, в котором отличны от нуля лишь составляющие, образованные произведением только переменных или только постоянных составляющих изображений, т. е.

$$\overline{g}_\eta(\xi) = \int_\varsigma \left[ \overline{\eta}_1 \left( \overline{F}_{2C} + \overline{F}_{2H} + \overline{\eta}_2 \right) + \overline{\eta} \left( \overline{F}_{1C} + \overline{F}_{1H} \right) \right] dx . \qquad (2.\ 22)$$

Рассмотрим сначала функции $\overline{g}_\eta(\xi)$. Из анализа этого выражения следует, что если значения $\overline{F}_{2C}, \overline{F}_{2H}, \overline{\eta}_2$ не зависят от $\xi$, а размеры ТИ и ЭИ соответствуют $A$-$a_1$ >|$a$|, то $g_\eta(\xi)$ представляет собой совокупность равнобедренных трапеций, причем $g_\eta(\xi)$ = const в окрестности точки $\xi = a$. Таким образом, $\left[ g_\eta(\xi) \right]'_\xi \big|_{\xi=0} = 0$, что обеспечивает нулевое значение ошибки совмещения изображений, обусловленной $\overline{g}_\eta(\xi)$.

Рассмотрим теперь функцию $g_\eta(\xi)$, образованную только переменными составляющими изображений, представляющую собой ВКФ между переменными составляющими шума и детерминированными составляющими изображений

$$\tilde{g}_\eta(\xi) = \int_\varsigma \left[ \tilde{\eta}_1 \left( \tilde{F}_{2C} + \tilde{F}_{2H} + \tilde{\eta}_2 \right) + \tilde{\eta} \left( \tilde{F}_{1C} + \tilde{F}_{1H} \right) \right] dx . \qquad (2.23)$$

В (2.23) величины $\tilde{\eta}_1\ \tilde{\eta}_2$ являются реализациями стационарных процессов с нулевым средним и радиусом корреляции $p_k$, причем $p_k$ <<$a$, поэтому $\tilde{g}_\eta(\xi)$ можно считать оценкой среднего значения переменной составляющей шумовой функции, математическое ожидание которой постоянно и равно нулю [43], а $\frac{\partial}{\partial \xi} g_\eta(\xi) \big|_{\xi=a} = 0$.

Таким образом, при наличии шумов на ТИ и ЭИ ошибка в оценке сдвигов изображений отсутствует, если различие в размерах ТИ и ЭИ превышает значение возможного сдвига изображений, а радиус корреляции шумовых функций много меньше размеров ТИ и ЭИ. Такие же результаты можно получить из условий

$$C_9 = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} g_\eta(\xi)\Big|_{\xi=a} = 0\,;\; C_6 = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} g_H(\xi)\Big|_{\xi=a} = 0\,,$$

выполняемых при нулевой кривизне или постоянном значении крутизны функций $g_\eta(\xi)$, $g_H(\xi)$ в окрестности точки $\{\xi = a\}$.

Для проверки аналитических исследований было проведено соответствующее моделирование на ЭВМ, которое подтвердило выработанные рекомендации по выбору ЭИ. Результаты исследований демонстрируются на рис. 2.2 и 2.3 [17].

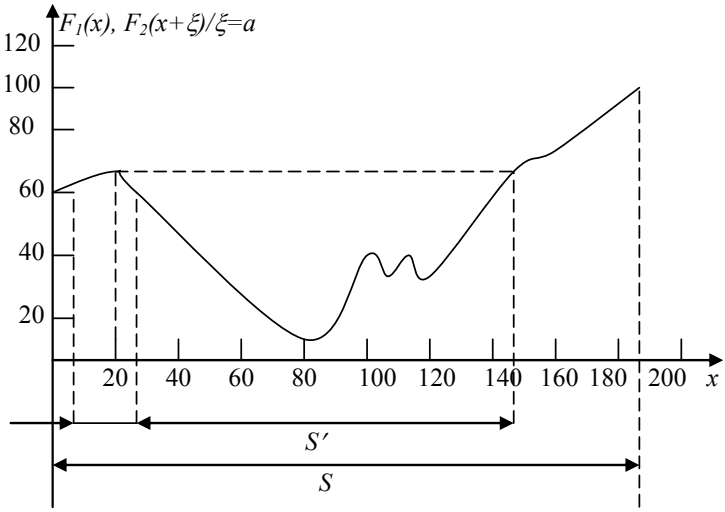


Рис. 2.2. Вид одномерных ТИ и ЭИ

На рис. 2.2 даны следующие обозначения: $F_1(x)$ – функция, описывающая ТИ; $\{x=x_0\}$ – координата локального экстремума на $S$, причем значение $F_1(x)$ является глобальным максимумом на области S', содержащейся в $S$; на этом рисунке в качестве ЭИ $F_1(x_0)$ принята окрестность точки $\{x=x_0\}$, причем на границах ЭИ значения $F_2(x)$ совпадают, а абсолютные значения крутизны являются близкими величинами. На рис. 2.3 приведена зависимость функционала $J(\xi) = \int_0 F_1(x) F_2(x+\xi)\, d\xi$ от значения сдвига изображений. Как видно, $J(\xi)$ в точке $\{\xi = a\}$ имеет локальный максимум, являющийся гло-

бальным на области сдвигов $S''$, близкой по размерам к области $S'$. Это обеспечивает правильную работу КЭС на большей части данной реализации ТИ.

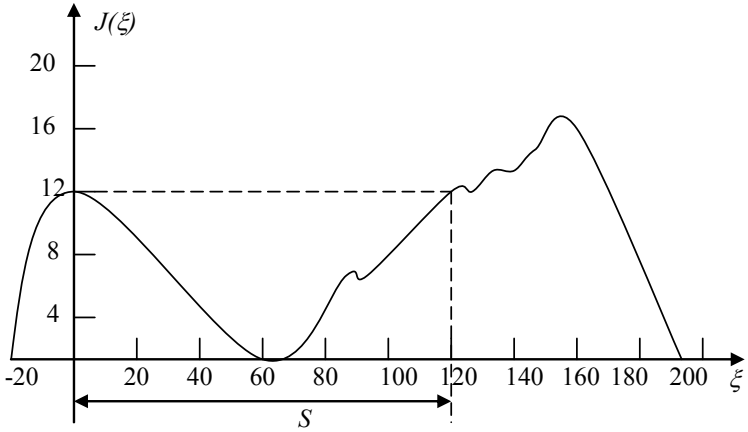


Рис. 2.3. Зависимость максимума ВКФ от сдвига изображений

В заключение отметим, что при выборе параметров ЭИ необходимо руководствоваться такими достаточными условиями работоспособности КЭС, как, во-первых, размеры ЭИ и положение его центра должны обеспечивать существование таких областей, на которых функция, описывающая ЭИ, возрастает, достигает максимума и убывает, а на границах ЭИ обеспечивается постоянство произведения значения функции эталона и ее частных производных; во-вторых, размеры ТИ и ЭИ должны быть много больше радиуса корреляции реализации шума, а различие в размерах изображений должно превышать максимальное значение сдвигов.

## 2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

### 2.4.1. Исследование помехоустойчивости КЭС, сравнивающей точечные изображения

Определим условие правильной работы КЭС [23]. Сбой в работе КЭС происходит тогда, когда выполняется неравенство

$$\max_{\nu} J_{\text{ГЛ}}(\nu) \langle \max_{\nu} \left[ J_{\text{ПОБ}}(\nu) + J_{H}(\nu) \right], \tag{2.24}$$

где $J_{\text{ГЛ}}(\nu)$, $J_{\text{ПОБ}}(\nu)$ – соответственно функции, описывающие главный и побочный максимумы ВКФ; $J_{H}(\nu)$ – функция, описывающая максимум, образованный несовпадающими частями изображений. Из выражения (2.24) следует, что при сбое в работе КЭС координаты объекта связываются со значением $v_1$, отличающимся от истинного $v_0$ . При случайном распределении несовпадающих элементов изображений на площади s вероятность $P$ сбоя КЭС определяется неравенством (2.24). Если число $N_{\text{СЭ}}$ совпадающих элементов изображений превышает число $N_{\text{НС}}$ несовпадающих элементов, то из (2.24) следует, что min $P$ достигается при идеальной форме ВКФ, сформированной совпадающими элементами ТИ и ЭИ (т. е. значение max $J_{ПОБ}(v)=J_1$ минимально, а отношение max $J_{\text{ГЛ}}(v)=J_2$ к $J_1$ максимально). Найдем условие образования $J_1$. После несложных преобразований известных выражений [18], связывающих координаты $\{\xi_i\ ;\eta_i\ \}$ наибольшего значения ВКФ между $i$-м элементом ТИ и $j$-м элементом ЭИ, получаем

$$\left[\xi_{ij} + \left(x_j + \xi\right)\right]^2 + \left[\eta_{ij} + \left(y_j + \eta\right)\right]^2 = \left(x_i - a\right)^2 + \left(y_i + b\right)^2, \tag{2.25}$$

из анализа которого следует, что точка $\{\xi_{ij}\ ;\ \eta_{ij}\}$ при вращении ЭИ относительно ТИ описывает окружность радиусом

$$R_{ij} = \left[\left(x_i - a\right)^2 + \left(y_i - b\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{2.26}$$

Аналогичное выражение $R_{ek}$ можно получить для точки ВКФ $\{\xi_{ek};\ \eta_{ek}\}$. Если расстояние между точками $\{\xi_{ij};\ \eta_{ij}\}$, $\{\xi_{ek};\ \eta_{ek}\}$ меньше $(R_{ij}+R_{ek})$, то траектории этих точек пересекутся. При этом побочный максимум $J_1$ образуется при выполнении условия

$$\xi_{ij}-\xi_{ek}=0,\ \eta_{ij}-\eta_{ek}=0,\ i\neq j,\ e\neq k \qquad (2.27)$$

хотя бы при одном значении $\nu=\nu_0$. Если подставить известные выражения [30] в (2.27), перенеся члены, не содержащие sin, cos влево, возведя в квадрат и сложив оба равенства, получим (2.27) в следующем виде:

$$(x_j-x_к)^2+(y_j-y_к)^2=(x_i-x_e)^2+(y_i-y_e)^2. \qquad (2.28)$$

Из анализа (2.28) можно сделать следующий вывод: совмещение точечных ТИ и ЭИ происходит по наибольшему числу совпадающих признаков – взаимных расстояний между элементами изображений. Причем при повторяющихся расстояниях будут формироваться побочные максимумы, конкурирующие с главным. Таким образом, для обеспечения min $P$ следует брать столько элементов и так их располагать, чтобы расстояния не повторялись. Очевидно, что побочный максимум $J_1$ будет образовываться любой парой элементов при относительном развороте изображений $\pm\pi$. Из этого следует, что наименьшее значение $\max\limits_{\nu} J_{поб}(\nu)=2J_0$ получается с помощью двух элементов на ТИ и ЭИ, а наименьшее значение $\max\limits_{\xi,\eta} J_{поб}(\nu)\big|_{\gamma}=J_0$ создается при корреляции по одному элементу на ТИ и ЭИ.

Определим расположение элементов ТИ и ЭИ, обеспечивающих идеальную форму ВКФ. Согласно [16] центр второго элемента необходимо располагать на окружности радиуса $d$, а центры каждого из следующих $m$ элементов ($m\neq 1,2$) должны располагаться в точках пересечения прямой, проходящей через центры первых двух элементов и окружностей таких радиусов, чтобы расстояние между любыми двумя элементами не повторялось. Причем наименьшее значение изменения расстояния между элементами равно $d/2$. Вычисленные значения расстояний приведены в табл. 2.1, в которой даны следующие обозначения: $r_i$ – ряд чисел, найденных эмпирическим путем и являющихся расстоянием между соседними элементами в значениях $d$; $\sum r_i$ –

суммарное расстояние в значениях $d$ между всеми предыдущими элементами; $N_r$ – число элементов, соответствующих $\sum r_i$ .

Таблица 2.1

**Значения расстояний между элементами изображения**

| $r_i$ | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5,5 | 6 | 8 | 8,5 | 10 | 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sum r_i$ | 1 | 2,5 | 4,5 | 7,5 | 11,5 | 17 | 23 | 31 | 39,5 | 49,5 | 60,5 |
| $N_r$ | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |

Определим теперь расположение элементов при наличии линейных смещений и нулевом угловом рассогласовании изображений. Из (2.28) и, используя известные выражения, запишем условие образования побочного максимума от элементов $i$, $j$ ТИ и элементов $l$, $k$ ЭИ в следующем виде:

$$(x_j-x_k)^2+(y_j-y_k)^2=(x_i-x_e)^2+(y_i-y_e)^2;\ \frac{x_j-x_e}{y_j-y_k}=\frac{x_i-x_e}{y_i-y_e}. \qquad (2.29)$$

Из (2.29) следует, что если два элемента ЭИ и два элемента ТИ лежат на параллельных прямых и на равных расстояниях друг от друга, то они могут образовывать побочный максимум. Таким образом, идеальная форма ВКФ при максимальном $N_{СЭ}$ достигается в случае равного, минимально возможного расстояния между элементами, расположенными на скрещивающихся прямых.

Найдем условие перекрытия элементов изображения [23]. При смещениях ТИ относительно ЭИ перекрытие элементов изображений обуславливается расстоянием $r_0$ (рис. 2.4).

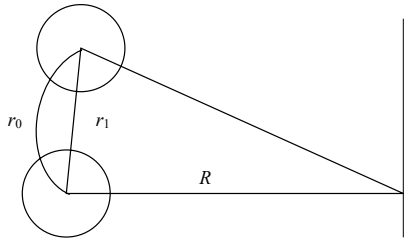


Рис. 2.4. К определению условия перекрытия элементов изображений

Из этого рисунка следует, что $r_0 = r_1^2 + d^2/4$. Необходимо выбрать такое $r_0$, при котором любое смещение изображений не приводило бы к перекрытию большему, чем *d/2*. Так как $r_1^2 = d\left(R - d/4\right)$, поэтому $r_0 = \left(Dd/2\right)^{\frac{1}{2}}$ (где $D$ – диаметр кадров ТИ и ЭИ).

Отсюда находим максимум $N_{СЭ}$:

$$N_{СЭ}^{\max} = \left(\frac{\pi D}{2} \cdot \frac{Dd}{2}\right)^{\frac{1}{2}} = 2{,}2\left(Dd\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (2.30)$$

Из (2.30) следует, что при ограниченном $d$ увеличение $N_{сэ}$ возможно за счет уменьшения $d$.

Определим теперь $N_{СЭ}$ для произвольного (недетерминированного) расположения элементов ТИ и ЭИ для двух случаев:

1) $N_{СЭ} > N_{НЭ}$; 2) $N_{СЭ} < N_{НЭ}$. Проведем анализ первого случая.

Если $N_{СЭ}$ случайным образом распределены на изображениях диаметром $D$, то плотность расположения элементов будет

$$\lambda_1 = \frac{4N_{СЭ}}{\pi D^2}. \qquad (2.31)$$

Причем расстояния $r$ между элементами распределены по закону Релея с плотностью распределения $f\left(r\right) = 2\pi\lambda_1 r l^{-\pi\lambda r^2}$ и математическим ожиданием $m_r = 1/2\lambda_1 \frac{1}{2}$. Определим $N_{СЭ}$ при условии, когда дальнейшее увеличение $N_{СЭ}$ с вероятностью большей 0,5 приводит к образованию побочного максимума вследствие повторения наиболее часто встречающего расстояния $m_r$. Как следует из рис. 2.5, при изменении расстояния $m_r$ между элементами изображений на величину $\pm d$ наибольшее значение ВКФ ТИ и ЭИ в виде этой пары элементов будет сравнимо с $J_0$ или превышать его. Это означает образование побочного максимума ВКФ.

При $r \in \left\{m_r - d; m_r = d\right\}$ выполняется условие образования побочного максимума, поэтому оценку $N_{СЭ}$ находим из уравнения

$$\left[f\left(r\right)\Big|_{r=m_r}\right]2d = 0{,}5.$$

Получаем

$$N_{СЭ} = \frac{0,02D^2}{d^2}. \qquad (2.32)$$

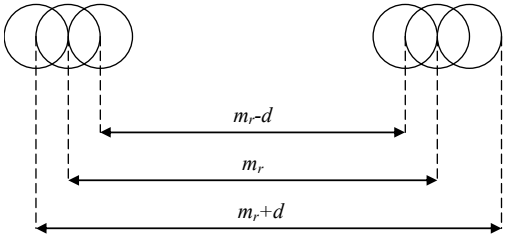


Рис. 2.5. К пояснению образования побочного максимума ВКФ

Эта формула достаточно хорошо согласуется с известной импирической формулой [30] $N_{СЭ}^{Э} = (0,014 + 0,02)D^2 / d^2$.

Определим теперь $N_{СЭ}$ в случае $N_{СЭ}<N_{НЭ}$. Из (2.24), фиксированном $N_{СЭ}$ и $N_{СЭ}<<N_{НЭ}$ следует, что наибольшая помехоустойчивость достигается при $N_{СЭ}$, обеспечивающем

$$\max_{N_{СЭ}}\left[\max_{\nu} J_{ГЛ}(\nu, N_{СЭ}) - \max_{\nu} J_{ПОБ}(\nu, N_{СЭ})\right]. \qquad (2.33)$$

Однако выражение (2.33) не обеспечивает идеальную форму ВКФ. Очевидно $\max_{\nu} J_{ГЛ}(\nu, N_{СЭ}) = N_{СЭ}J_0$, а $\max J_{ПОБ}(\nu, N)$ найдем, предполагая, что ЭИ является пуассоновым полем элементов. Используя [23], получаем наибольшее вероятное значение побочных максимумов, определяемых выражением

$$N_{ПОБ} = \frac{16N_{Э}J_0 de\frac{\pi}{4}}{\pi D^2}, \qquad (2.34)$$

где $N_{СЭ}$ – число элементов диаметром $d$ на изображениях площадью $\pi D^2 / 4$; $J_0$ – наибольшее значение ВКФ между ТИ и ЭИ с изображениями в виде единственного элемента. Подставляя значения в (2.33), беря производную по $N_{СЭ}$, приравнивая ее к нулю, получим

$$N_{СЭ} = \frac{0,214D^2}{d^2}. \qquad (2.35)$$

Представляет интерес сравнение экспериментального значения $N_{СЭ}$ [30] и теоретических значений $N_{СЭ}$. Эти величины приведены в табл. 2.2, которые вычислены для различных значений *D, d.* В этой таблице даны: $N_{СЭ}$ (2.30), $N_{СЭ}$ (2.32), найденные по формулам (2.30), (2.32); $N_r$, взятая из табл. 2.1; $S_c$ – площадь совпадающих элементов. Из сравнения столбцов $N_{СЭ}$ и $N_{СЭ}$ (2.30), $N_{СЭ}$ (2.32) следует вывод об адекватном математическом описании работы КЭС.

Таблица 2.2

**Характеристики изображений**

| $D$, 10м$^{-2}$ | $d$, 10 м$^{-2}$ | $D/d$ | $N_{СЭ}$ | $N_{СЭ}$ (2.32) | $N_{СЭ}$ (2.30) | $N_r$ | $\frac{S_c}{S}$,% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,0 | 0,2 | 25 | 9 – 11 | 12 | 11 | 8 – 9 | 1,5 – 2 |
| 3,4 | 0,16 | 23 | 5 – 7 | 10 | 10 | 8 | 1 – 2 |
| 2,0 | 0,1 | 20 | 3 – 5 | 8 | 10 | 7 – 8 | 1 – 2 |
| 5,0 | 0,4 | 12,5 | 6 – 9 | 3 | 8 | 6 – 7 | 2 – 5 |
| 3,0 | 0,4 | 7,5 | 5 – 8 | 1 | 6 | 5 | 2 – 15 |

В заключение укажем, что получены аналитические выражения, связывающие $N_{СЭ}$, $N_{НЭ}$, $D$ и $d$. Установлено, во-первых, если $N_{НЭ}<N_{СЭ}$, то min $P$ достигается при идеальной форме ВКФ, когда отношение значений главного к побочному максимуму максимально; во-вторых, если $N_{НЭ}>>N_{СЭ}$, то min $P$ достигается при $N_{СЭ}$, обеспечивающем наибольшее значение разности амплитуд главного и побочного максимумов. Получены аналитические выражения для $N_{СЭ}$, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными. Использование результатов исследования позволяет распределять элементы ТИ и ЭИ таким образом, чтобы они обеспечивали наименьшую вероятность сбоя КЭС [23].

### 2.4.2. Исследование помехоустойчивости КЭС, сравнивающей протяженные изображения

При исследовании протяженных элементов изображений несовпадающие части изображений возникают вследствие ухода ТИ за границы кадра при смещении объекта в рабочей зоне. Это искажает вид ВКФ и влияет на точность оценки координат. Для простоты рас-

смотрим ТИ в виде прямоугольника размером $m' \times m'$, причем соответствующая функция $F(x_1, y_1)$ бинарна, а стороны прямоугольника параллельны соответствующим осям $o_1x_1$, $o_1 y_1$ [21]. Если смещение объекта по оси $o_1x_1$ не приводит к уходу прямоугольника за границы кадра, то сечение ВКФ, например, по оси $o\xi$ в области главного максимума можно аппроксимировать модульной функцией $J_1(\xi) = I_1 m' |a = \xi|$, где $I_1 = J(\xi, \eta, \gamma, M)$ при $\xi = a, \eta = b, M = 1, \gamma = 0$. Если часть прямоугольника находится за границами кадра, то $2D \rangle m' \rangle D, n' \langle\langle D$ (где D – размер кадра), сечение ВКФ по оси $0\xi$ в области главного максимума аппроксимируется равнобедренной трапецией

$$J(\xi) = \begin{cases} I'_1\left[-(a-\beta-m')+\xi\right]/m', \text{если } \alpha-\beta-m' \le \xi \le \alpha-\beta; \\ I'_1, \text{ если } \alpha \ge \xi \ge \alpha-\beta; \\ I'_1(a+m'+\xi)/m', \text{если } \alpha+m' \ge \xi \ge a; \\ 0 \text{ при других } \xi, \end{cases} \tag{2.36}$$

где $\beta$ – длина скрывшейся за границы кадра части прямоугольника; $I'_1 = J(\nu)$ при $\nu = \nu_0$, причем $I_1 \rangle I'_1$.

Представляет интерес нахождение сечения ВКФ (2.36) на выходе оптико-электронного преобразователя, применяемого в оптическом корреляторе. Используя соответствующие выражения из [21] и на основе (2.36) после несложных преобразований находим функции, аппроксимирующие сечение ВКФ:

$$J'_1(\xi) = \begin{cases} I_{01} - g_1|\xi - a|, \text{если } |\alpha - \xi| > 1; \\ I_{01} - (\xi - a)^2, \text{ если } |\alpha - \xi| < 1; \end{cases}$$

$$J'_2(\xi) = \begin{cases} I'_{01}, \text{если } x_2 > \xi > x_1\text{-}1, x = 1, x_1 = a, x_2 = a\text{-}b; \\ I_{01}' - g'_1(\xi - x_j)^2, x_1 - 1 \le \xi \le x_1 + 1, j = 1,2; \\ I_{01} - g_1'(\xi - a)^2, \ \xi\text{-}1 > x_2, \xi + 1 < x_1, \end{cases} \tag{2,37}$$

где $I_{01}, I'_{01}, g_1, g'_0$ – постоянные интегрирования. Из анализа (2.37) видно, что положение наибольшего значения $J'_1(\xi)$ не изменяется, но функции становятся «гладкими», причем если $N^K_{БЗУ}$ и в качестве оценки $a$ принима-

ется координата центра тяжести $J'_1(\xi)$, то смещение координаты $\xi$ есть $\Delta\xi = \frac{\beta}{2}$. При исчезновении части ТИ сечение в области главного максимума перестает быть симметричным и определяется следующим выражением:

$$\Phi(\xi) = \begin{cases} S_0 - N_0 g_1(a-\xi), \text{если } \xi > a+1, x = 1; \\ S_0 - (N - N'_0) g_2(a-\xi), \text{если } \xi < a\text{-}1, \end{cases} \quad (2.38)$$

где $S_0$ – постоянная аппроксимации $\Phi(\xi)$.

Таким образом, в случае использования протяженных изображений при исчезновении части ТИ из-за движения объекта искажается ВКФ и вследствие этого возникает систематическая ошибка оценки координат, значение которой представлено в [21].

## 2.5. МЕТОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОМЕХ

Из теории корреляционно-экстремальных систем известно, что данные системы работоспособны, если значение главного максимума ВКФ $J_c(\xi,\eta,\alpha)$, образованного совпадающими частями ТИ и ЭИ, превышает значение побочных максимумов $J_H(\xi,\eta,\alpha)$, сформированных несовпадающими частями $F_{1H}, F_{2H}$ сравниваемых изображений. Отсюда следует необходимость синтеза алгоритмов, обеспечивающих уменьшение или устранение помех $F_{1H}, F_{2H}, J_H(\xi,\eta,\alpha)$, для чего требуется разрабатывать специальные методы пространственной фильтрации, устраняющие (уменьшающие) влияние указанных помех.

Для простоты рассмотрим действие отдельно каждого из указанных фильтров.

Пусть

$$\upsilon(x_1, y_1) = L'_1(x^o{}_1, y^o{}_1) = \begin{cases} 1, \text{если } x_1^o, y_1^o \in S^o \cup \Delta S^o; \\ 1, \text{если } x_1^o, y_1^o \notin S^o \cup \Delta S^o, \end{cases} \quad (2.39)$$

или

$$\upsilon(x_1, y_1) = L'_1(x_1, y_1)\begin{cases}1, \text{если } x_1, y_1 \in \mathrm{S} \cup \Delta\mathrm{S}\ ; \\ 0, \text{если } x_1, y_1 \notin \mathrm{S} \cup \Delta\mathrm{S}\ ,\end{cases} \qquad (2.40)$$

где $\{x_1, y_1\}$ – координаты центра тяжести любого элемента ТИ; $\{x_1°, y_1^0\}$ – координаты центра тяжести совпадающего элемента ТИ; $S°$ – область существования совпадающего элемента; $\Delta S°$ – приращение области $S°$.

Физически фильтр (2.39) представляет собой маску, в которой изображения элементов прозрачны, по форме и расположению идентичны ЭИ, а границы элементов изображения на маске расширены по сравнению с ЭИ на величину [4]

$$r^0 = \sum_{i=1}^{n=3} \delta_i^0\ ;\ \delta_2^0 = \frac{A_p\left|\cos\gamma_g\right|}{2} = \frac{B_p\left|\cos\gamma_g\right|}{2}\ ;\ \delta_3 = \left|\vartheta_k\right| t_{\text{ЦК}}, \qquad (2.41)$$

где $X_6^Э - F_{61}^O$ – допустимая ошибка определения координат ОР; $\delta_2^0$ – смещение элементов на границе экрана индикатора ТИ, имеющего соответствующие размеры растра по горизонтали и вертикали $A_p$ $B_p$, при относительном угле $\gamma_g$ разворота ДТИ и конвейера; $\delta_3^0$ – смещение элементов на экране, вызванное движением конвейера относительно ДТИ со скоростью $\vartheta_к$ за время $t_{ЦК}$ цикла работы системы.

Величины $X_6^Э - F_{61}^O$, , $\delta_2^0$, $\delta_3^0$ определяются в масштабах изображения.

Очевидно, что маска должна перемещаться синхронно движению изображения на экране индикатора ТИ.

Определим эффективность предложенного способа фильтрации помех. Помехозащищенность в данном случае определяется величиной

$$K = \frac{K_{\text{Н}}}{K_{\text{Ф}}}, \qquad (2.42)$$

где $K_{\text{Н}}$ – число несовпадающих элементов на исходном ТИ; $K_{\text{Ф}}$ – число несовпадающих элементов на отфильтрованном изображении (на выходе фильтра).

Если элементы ТИ распределены равномерно по экрану, то площадь, на которой могут оказаться несовпадающие элементы, уменьшается в $K_1$ раз:

$$K_1 = \begin{cases} S/[N_{сэ}(S^o + \Delta S^o)], S > N_{сэ}(S^o + \Delta S^o); \\ 1, S \le N_{сэ}(S^o + \Delta S^o), \end{cases} \qquad (2.43)$$

где $N_{СЭ}$ – число совпадающих элементов на ТИ.

Выражение (2.43) в случае прямоугольного растра индикатора ТИ и круговых элементов радиусом *r* изображения перепишется в виде

$$K_1 = \begin{cases} A_p B_p / [N_{сэ}\pi/(r + r_1)^2], A_p B_p > N_{сэ}(r + r_1)^2; \\ 1, A_p B_p \le N_{сэ}\, \pi(r + r_1)^2. \end{cases} \qquad (2,44)$$

Из (2.39) следует, что при большом числе элементов ТИ предложенный способ фильтрации может оказаться неэффективным, так как расширение границ элементов изображения на фильтре приведет к их слиянию и вся площадь фильтра будет прозрачной.

Определим величины несовпадающих частей изображений в случае, если несовпадающие части возникают из-за смещения ТИ относительно ЭИ, вызванного смещением рабочей зоны. Несовпадающие части тогда для равномерного распределения элементов изображения по экрану индикатора ТИ будут

$$F_{1H} = B_p \sum_{i=1}^{n} \Delta\upsilon t_{ЦК} \text{ или } F_{1H} = A_p \sum_{i=1}^{n} \Delta\upsilon t_{ЦК}\ ; \qquad 2.45)$$

$$F_{2H} = B_p \sum_{i=1}^{n} M'\Delta\upsilon t_{ЦК} \text{ или } F_{2H} = A_p \sum_{i=1}^{n} M'\Delta\upsilon t_{ЦК}\ ,$$

где $\Delta\upsilon t$ – скорость смещения изображения на экране индикатора ТИ; *n* - число циклов работы системы; *M'* – отношение масштабов ТИ и ЭИ.

То есть несовпадающие части определяются произведением соответствующего размера растра на величину смещения изображения, причем $F_{1H}, F_{2H}$ характеризуют соответственно исчезающие и появляющиеся части изображения.

Фильтр, описываемый выражением (2.40), представляет собой маску с прозрачной областью, равной размеру кадра ТИ [6]. При смещении этого фильтра синхронно смещению изображения на экране

индикатора будут фильтроваться несовпадающие части ТИ. Если ввести вторую аналогичную маску, фильтрующую несовпадающие части ЭИ, то существенно повысится эффективность фильтрации помех, попавших в поле зрения КЭС. Этот фильтр, смещаемый в направлении, обратном перемещению изображения на экране, должен удовлетворять условию

$$\upsilon_2(x_2, y_2) = L_2(x'_2, y'_2)\begin{cases}1, \text{если } x'_2, y'_2 \in \mathrm{S};\\ 0, \text{если } x'_2, y'_2 \notin \mathrm{S}.\end{cases} \qquad (2.46)$$

Если в КЭС используются фильтры $Z'_1(x_1, y_1)$, $Z'_2(x_2, y_2)$, то систематическая составляющая ошибки определения координат в худшем случае будет

$$\delta_\Phi = 0,5(\delta_1 + \Delta_1),\ \Delta_1 = \Delta\vartheta_\mathrm{K} t_\text{ЦК}, \qquad (2.47)$$

где $\Delta_1$ – ошибка в смещении фильтров; $\delta_1$ – случайная составляющая ошибки определения координат объекта; $\Delta\vartheta_K$ – изменение средней скорости движения рабочей зоны от цикла к циклу.

Аналогично предыдущим фильтрам представим фильтр $\vartheta_3$ следующим образом [5]:

$$\upsilon(\xi, \eta) = L'_3(\xi', \eta')\begin{cases}1, \text{если } \xi, \eta \in \mathrm{S}_1 \cup \Delta\mathrm{S}_1;\\ 0, \text{если } \xi, \eta \notin \mathrm{S}_1 \cup \Delta\mathrm{S}_1,\end{cases} \qquad (2.48)$$

где $S_1$ – область нахождения главного максимума ВКФ (площадь области $S_1$ задается точностными характеристиками системы); $\Delta S_1$ – приращение области $S_1$; площадь области $\Delta S_1$ обуславливается характеристиками технологического процесса.

Физически фильтр $L_3(\xi, \eta)$ представляет собой диафрагму, фильтрующую побочные максимумы ВКФ. Очевидно, что диафрагма должна перемещаться в корреляционной плоскости таким образом, чтобы главный максимум ВКФ находился в области $S_1 \bigcup \Delta S_1$. При использовании корреляторов Берджера и Майера – Эпплера радиус $r_g$ диафрагмы согласно условию (2.44) и в случае точечных изображений должен определяться следующими выражениями:

$$r_g = \frac{fA_p}{T\Delta x'_{\max}} \sum_{i=1}^{n=3} \delta'_i \text{ или } r_g = \frac{tB_p}{T\Delta y'_{\max}} \sum_{i=1}^{n=3} \delta'_i \,, \qquad (2.49)$$

где $f$, $T$ – параметры коррелятора; $\Delta x'_{\max}$, $\Delta y'_{\max}$ – величины, обуславливающие границу поля зрения КЭС.

Величины $\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3$, имеющие смысл, соответствующий величинам $\delta_1^0, \delta_2^0, \delta_3^0$, вычисляются следующим образом:

$$\delta'_1 = \left|\cos\gamma_g\right| \Delta x'_{\max} \,;\; \delta'_2 = \left|\cos\gamma_g\right| \Delta y'_{\max} \;\; \delta'_3 = \left|\Delta\nu_{\text{К}}\right| t_{\text{ЦК}} \,, \qquad (2.50)$$

где $\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3$ определяются в масштабах изображений.

Из (2.49), (2.50) следует, что для обеспечения работоспособности алгоритма необходимо задавать начальное значение $r_g$, пропорциональное $\delta'_1$ .

Помехозащищенность $K_2$ в данном случае определяется величиной, равной отношению площади $S_2$ возможного положения главного максимума ВКФ к значению площади диафрагмы, внутри которой находится главный максимум, т. е.

$$K_2 = \frac{S_2}{S_1 + \Delta S_1} \text{ или } K_2 = \frac{R_2^2}{r_g^2} \,, \qquad (2.51)$$

где $R_2$ – радиус круга площади $S_2$ .

Работоспособность предложенных способов фильтрации продемонстрирована на рис. 2.6 – 2.8. Здесь для простоты рассмотрена эффективность действия фильтров $L_1\left(x_1^0\right)$, $L_3(\xi)'$ раздельно, фильтров $L_1'(x'_1)$ и $L_2'(x'_2)$ совместно. Сечения ВКФ построены согласно методике, изложенной в [43]. Как следует из анализа рис. 2.6, 2.7, если ВКФ образованы между ТИ $F_1(x_1)$ и ЭИ $F_2(x'_2)$ без фильтрации несовпадающих частей ТИ (помечены *), то главные максимумы J( $\xi$ ) сравнимы по значению с побочными (помечены **); в случае применения фильтров $L_1\left(x_1^0\right)$ и $L_3(\xi)'$ вид ВКФ в области главного максимума уже может обеспечить определение координат с высокой точностью.

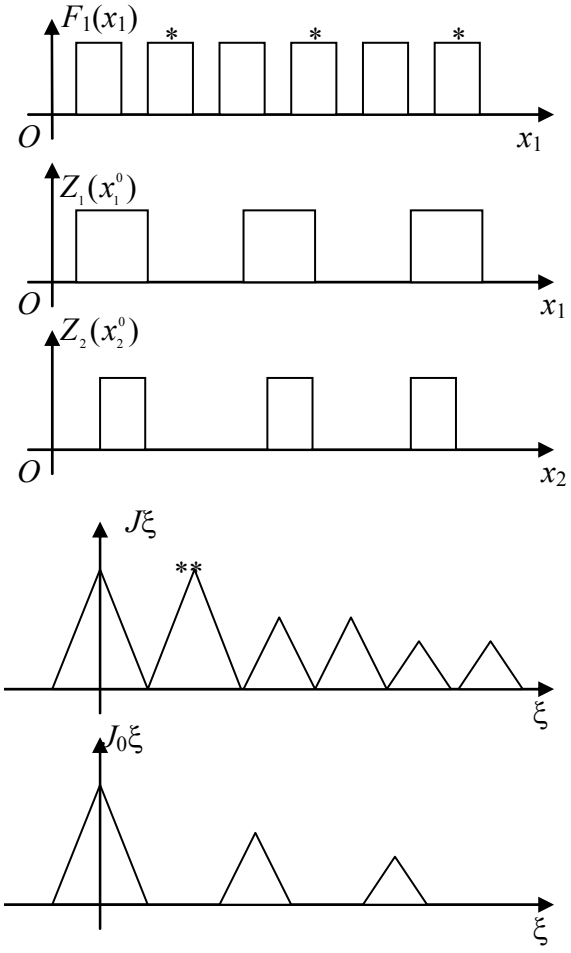


Рис. 2.6. Принцип действия фильтра $Z_1\left(x_1^{\circ}\right)$

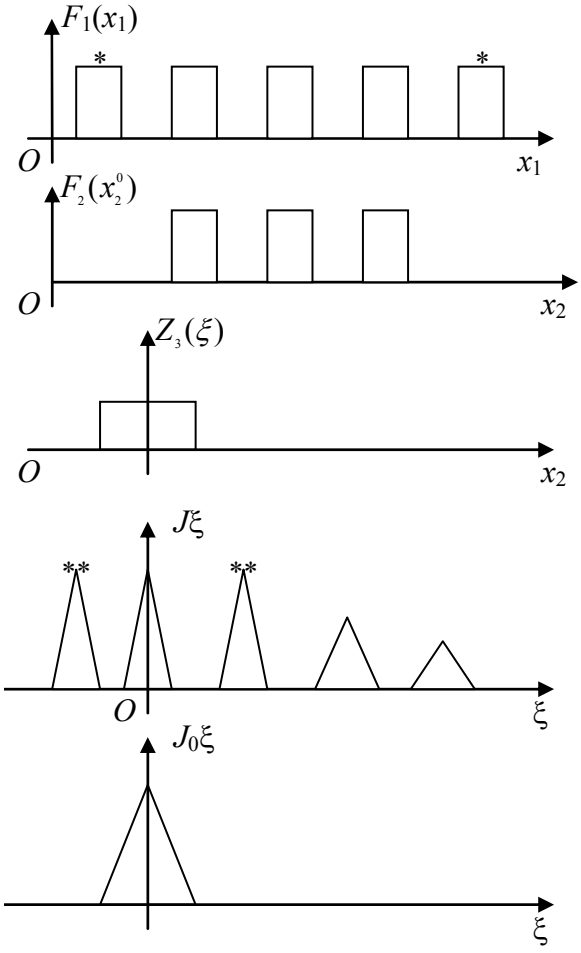


Рис. 2.7. Принцип действия фильтра $Z_3(\xi')$

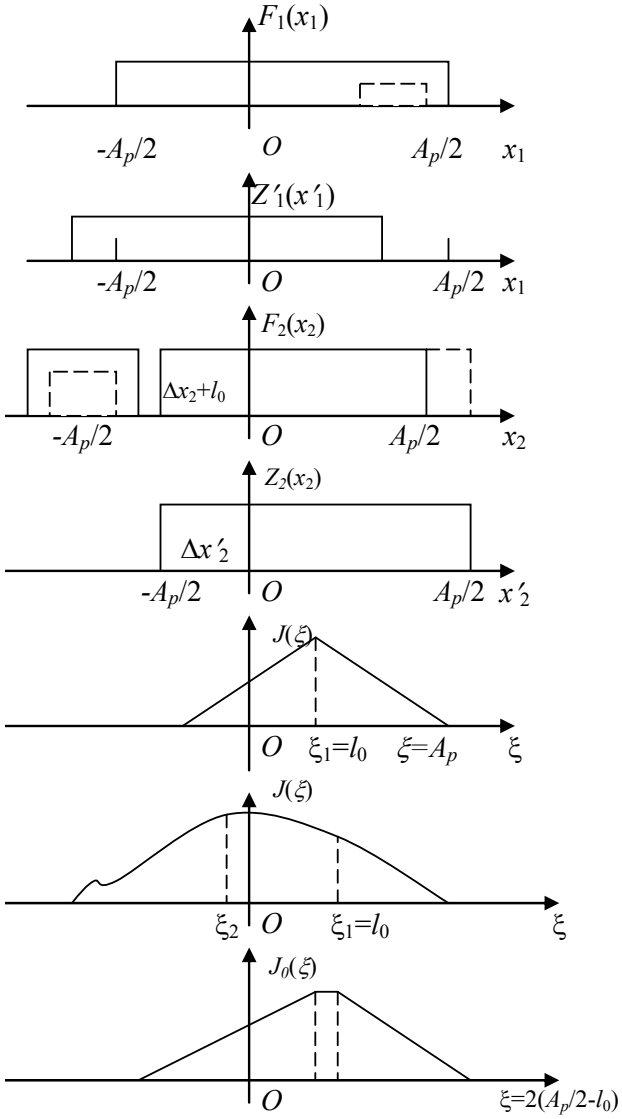


Рис. 2.8. Принцип действия фильтров $Z'\left(x_1'\right)$ и $Z_2\left(x_2'\right)$

На рис. 2.8 представлены: $F_1(x_1)$ – сечение функции, описывающей протяженный элемент ТИ, имитирующий движение по экрану с границами растра $+A_p/2$, причем одна из границ элемента имеет координату $\Delta x_1$; $L_1'(x'_1), L_2'(x'_2)$ – соответственно сечения функций, описывающих прозрачность второго и третьего фильтров, когда они смещены соответственно на величины $\Delta'_1 = A_p/2 - l_0 - \delta_1$, $\Delta'_2 = -A_p/2 - l_0 + \delta_1$ ($l_0$ – расстояние между центрами фильтров); $F_2(x_2)$ – сечение функции, описывающей прозрачность участков ЭИ (пунктиром на $F_1(x_1)$, $F_2(x_2)$ отмечены несовпадающие части изображений); $J_0(\xi)$ – сечение функции, описывающей ВКФ, образованную совпадающими частями $F_1(x_1)$, $F_2(x_2)$; $J(\xi)$ ) – сечение функции, описывающей ВКФ, образованную конкретными реализациями $F_1(x_1)$, $F_2(x_2)$; $J_0(\xi)$ – сечение функции, описывающей ВКФ в случае, когда ТИ и ЭИ отфильтрованы от помех. Как видно из рис. 2.8 , $J(\xi)$ достигает своего наибольшего значения в точке $\xi$, существенно отличной от точки $\xi_1$, характеризующей истинную координату. После фильтрации несовпадающих частей на ТИ и ЭИ ВКФ сохраняет свое наибольшее значение на участке размером $\delta_1, \delta_1 \langle\langle l_0$ . Так как с положением центра этого участка связываются координаты детали, поэтому из анализа $J_0(\xi)$ координаты определяются с большей точностью, чем из анализа $J(\xi)$ .

Выражение (2.39) окончательно можно переписать в следующем виде [25]:

$$J(\xi,\eta) = L_3(\xi',\eta')\int_S \left[\ L_1'(x'_1, y'_1) L_1'(x_1^0, y_1^0) F_1(x_1, y_1)\ \right] \times \\ \times \left[F_2(x_2, y_2) L_2(x'_2, y'_2)\right] ds. \tag{2.52}$$

На рис. 2.9 изображен оптический коррелятор, реализованный по выражению (2.52) и дающий пространственное представление об элементах коррелятора и введенных фильтрах. За основу взят модифицированный коррелятор Майера – Эпплера, который состоит из экрана 1, индикатора ТИ, фильтра $L_1(x'_2, y'_2)$ 2, фильтра $L_1'(x_1^0, y_1^0)$ 3,

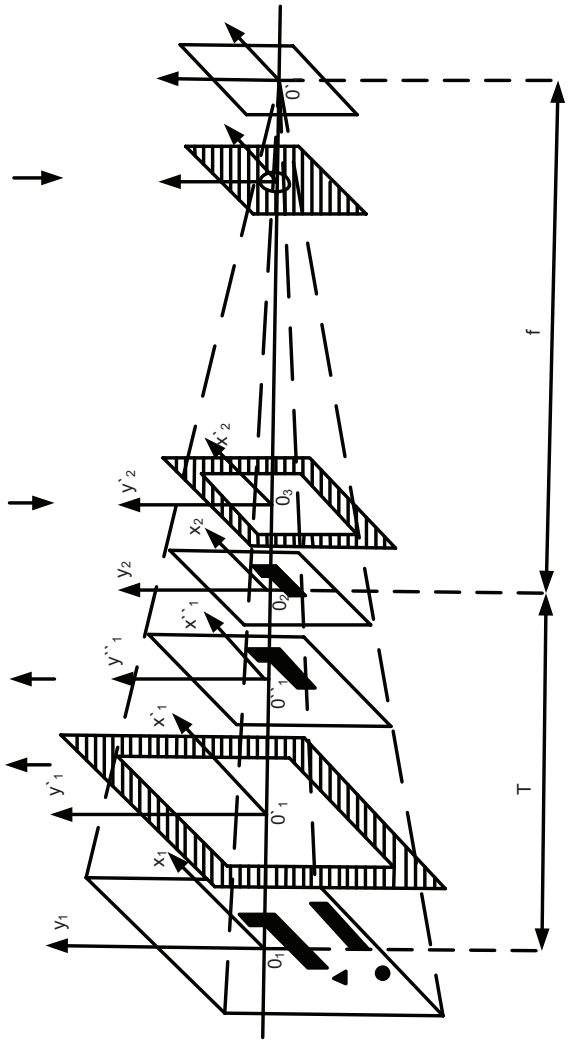


Рис. 2.9. Иллюстрация метода пространственной фильтрации помех

ЭИ 4, фильтра $L_2(x'_2, y'_2)$ 5, фильтра $L_3(\xi', \eta')$ 6 и плоскости регистрации ВКФ 7; совпадающие элементы ТИ и ЭИ обозначены соответственно цифрами 8 и 9, а несовпадающие – 10, причем 11 – изображение фильтра 3. Двойными стрелками показано направление перемещения фильтров в случае смещения ТИ по оси *oy*. Фильтр 6 изображен смещенным относительно плоскости 7, хотя для эффективной работы он должен быть установлен в плоскости регистрации ВКФ. Такое расположение фильтра на рисунке выбрано только из соображений удобства иллюстрации принципа его работы.

## 2.6. КОРРЕЛЯЦИОННОЕ СРАВНЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

### 2.6.1. Корреляционное сравнение стереоизображений

Положение ОР в пространстве на основе обработки изображений, снимаемых с двух телевизионных камер, оценивается известными выражениями. Одной из основных проблем при использовании подобных систем является обнаружение идентичных точек, для которых измеряется параллакс. В этой связи весьма перспективна корреляционная обработка стереоизображений. Введем системы координат (рис. 2.10) $X0YZ$, $X_1 0_1 Y_1 Z_1$, $X_2 0_2 Y_2 Z_2$, связанные соответственно с плоскостью рабочей зоны, с первым и вторым ДТИ (оси $O_1X_1$, $O_2X_2$ первого и второго ДТИ – параллельные базису съемки).

На рис. 2.10 показаны базисный профиль, базисные линии, базис и точки $Д_1$, $Д_2$ , между которыми измеряется базис. Одна и та же точка трехмерной сцены воспринимается первым (левым) ТИ с координатами $\Delta x_1$, $\Delta y_1$ и вторым (правым) ДТИ с координатами $\Delta x_2$, $\Delta y_2$. Связь между координатами этих точек находится известным выражением

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 - p(\Delta x_2, \Delta y_2), \qquad (2.53)$$

где $p(\Delta x_2, \Delta y_2)$ – функция продольных параллаксов, которая взаимно однозначно определяет поверхность трехмерной сцены $2(x,y)$. Восстановление $p(\Delta x_2, \Delta y_2)$ и составляет процесс стереоизмерений.

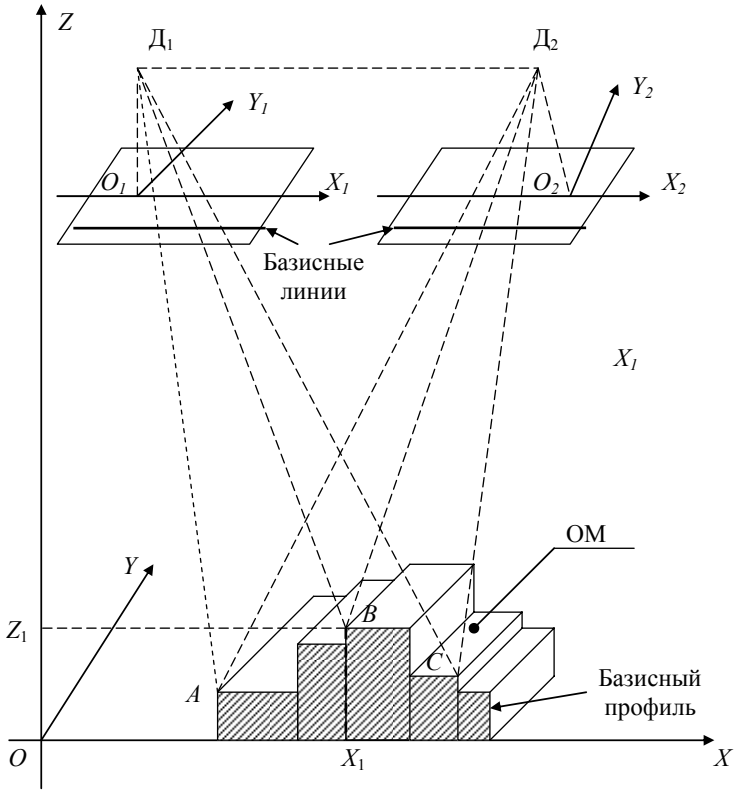


Рис. 2.10. Корреляционные основы стериоизмерений

Построение поверхности $p(\Delta x_2, \Delta y_2)$ по яркостной видеоинформации, снимаемой с ДТИ, сводится к задаче оптимизации

$$p = \arg \max_p J(p), \tag{2.54}$$

где $J(p)$ – целевая функция, синтезированная из оценок мер схожести сравниваемых участков первого и второго изображений. Функция $J(p)$ представляет корреляционную функцию

$$J(\overline{p}) = \int \tilde{\tilde{F}}_1 (x_1, y_1) \tilde{\tilde{F}}_2 (x_2, y_2, \overline{p}) dxdy, \tag{2.55}$$

где $\tilde{\tilde{F}}_1(x_1, y_1), \tilde{\tilde{F}}_2(x_2, y_2, \overline{p})$ – нормированные яркости первого и второго изображений; $\overline{p}$ – параметры, описывающие взаимные геометрические искажения изображений и определяемые из условия максимума $J(p)$ в опорных точках.

Таким образом, корреляционный анализ стереоизображения состоит из следующих операций: формирования первого и второго ТИ, формирования ВКФ, вычисления смещения первого ТИ относительно второго ТИ (вычисление параллакса). После этого определяются координаты положения ОР в пространстве.

Следует отметить, что геометрические искажения, обусловленные стереоизмерениями, вызваны такими факторами, как изменение формы или яркости (раскраски) объекта.

### 2.6.2. Корреляционные методы оценки пространственного положения объекта

Другим вариантом оценки положения ОР является использование трех ДТИ (рис. 2.11). Введем следующие системы координат: $XOYZ$ – система координат, связанная с рабочей зоной; $X_1O_1Y_1Z_1$, $X_2O_2Y_2Z_2$, $X_3O_3Y_3Z_3$ – системы координат, связанные соответственно с ДТИ$_1$, ДТИ$_2$, ДТИ$_3$. Положение ОР (центр тяжести, т. е. положение точки $A$) в этой системе координат определяется величинами $\Delta x_A$, $\Delta y_A$, $\Delta z_A$; введем следующие обозначения: $l_1, l_2, l_3$ – расстояния от соответствующих ДТИ$_1$, ДТИ$_2$, ДТИ$_3$ до ОР; $l'_1, l'_2, l'_3$ – расстояния от ДТИ$_1$, ДТИ$_2$, ДТИ$_3$ до соответствующих осей координат.

В общем виде положение ОР можно определить по анализу трех ВКФ, описываемых следующими выражениями:

$$\begin{cases} J_1, (\xi_1, \eta_1, \alpha_1) = \int\limits_{S_1} F_1(x_1, y_1) F_1(x_1', y_1') ds_1; \\ x_1 = (x_1' - \xi_1')\cos\alpha_1 + (y_1' - \eta_1)\sin\alpha_1; \\ y_1 = (y_1' - \eta_1)\cos\alpha_1 - (x_1' - \xi_1)\sin\alpha_1; \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_2,(\xi_2,\eta_2,\alpha_2)=\int\limits_{S_2} F_2(x_2,y_2)F_2(x_2',y_2')ds_2; \\ x_2=(x_2'-\xi_2')\cos\alpha_2+(y_2'-\eta_2)\sin\alpha_2; \\ y_2=(y_2'-\eta_2)\cos\alpha_2-(x_2'-\xi_2)\sin\alpha_2; \end{cases} \quad (2.56)$$

$$\begin{cases} J_3,(\xi_3,\eta_2,\alpha_3)=\int\limits_{S_3} F(x_3,y_3)F_2'(x_3',y_3')ds_3; \\ x_3=(x_3'-\xi_3')\cos\alpha_3+(y_3'-\eta_3)\sin\alpha_3; \\ y_1=(y_3'-\eta_3)\cos\alpha_3-(x_3'-\xi_3)\sin\alpha_3, \end{cases}$$

где $F_1(x_1, y_1)$, $F_1(x_2, y_2)$, $F_1(x_3, y_3)$ – ТИ, формируемые соответствующими ДТИ$_1$, ДТИ$_2$, ДТИ$_3$; $F'_2(x'_1, y'_1)$, $F'_2(x', y')$, $F'_2(x'_3, y'_3)$ – ЭИ, подготовленные при съемке с соответствующих ДТИ$_1$, ДТИ$_2$, ДТИ$_3$; $S_1$, $S_2$, $S_3$ – площади коррелируемых изображений. Следует отметить, что при совмещении ТИ и ЭИ не только по угловой и линейным координатам, но и по масштабу выражения (2.56) еще более усложняются.

Рассмотрим особенности оценки местоположения объекта при использовании различного числа и комбинации ДТИ (т. е. КЭС). Например, если используются три КЭС (ДТИ расположены так, как показаны на рис. 2.12), то координаты ОР определяются

$$\Delta X_A=\Delta\xi_2=\Delta\xi_3;\quad \Delta Y_A=\Delta\xi_1=\Delta\xi_3;\quad \Delta Z_A=\Delta\eta_1=\Delta\eta_2. \quad (2.57)$$

Если применяются только две КЭС (например, КСТ3$_1$ и КСТ3$_2$ и соответственно ДТИ$_1$ и ДТИ$_2$), то координаты ОР находятся

$$\Delta X_A=\Delta\eta_2;\quad \Delta Y_A=\Delta\xi_1;\quad \Delta Z_A=\Delta\eta_1=\Delta\eta_2. \quad (2.58)$$

При оценке КЭС величин только по одной координате, например $\Delta\xi_1$, $\Delta\eta_1,\Delta\eta_2$, искомые координаты из (2.57) определяются просто:

$$\Delta X_A=\Delta\eta_3;\quad \Delta Y_A=\Delta\xi_1;\quad \Delta Z_A=\Delta\eta_1=\Delta\eta_2.$$

При использовании двух других зрительных систем КСТ3$_1$ и КЭС$_3$ (с ДТИ$_1$ и ДТИ$_3$) искомые координаты определяются следующим образом:

$$\Delta X_A=\Delta\eta_3;\quad \Delta Y_A=\Delta\xi_1=\Delta\xi_3;\quad \Delta Z_A=\Delta\eta_1. \quad (2.59)$$

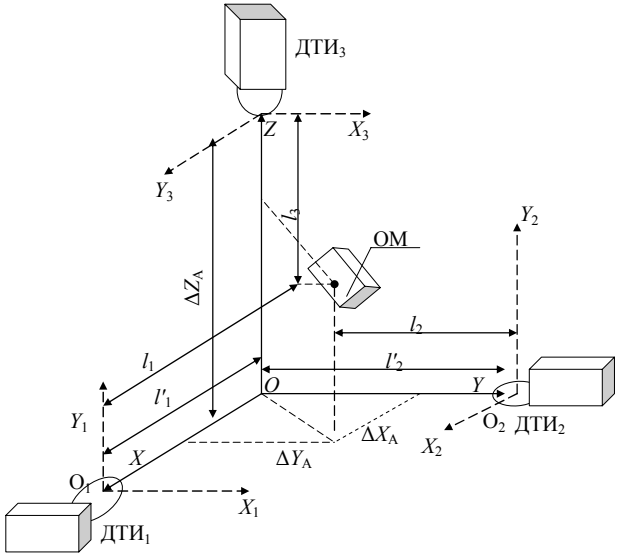


Рис. 2.11. Корреляционные основы измерения пространственного положения ОР с использованием трёх ДТИ

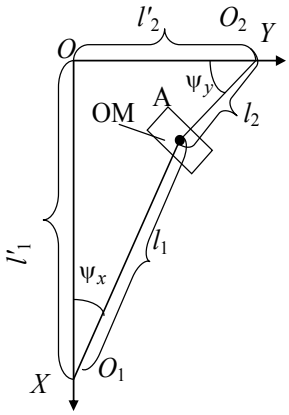


Рис. 2.12. Пример измерения положения ОР в плоскостях *XOY*

Если определяются КЭС только величины $\Delta\eta_1$, $\Delta\xi_2$, $\Delta\xi_3$, то выражения (2.59) упрощаются до вида

$$\Delta X_A = \Delta\eta_3; \quad \Delta Y_A = \Delta\xi_3; \quad \Delta Z_A = \Delta\eta_1.$$

В случае использования КЭС$_2$ и КЭС$_3$ (с ДТИ$_2$ и ДТИ$_3$) координаты ОР находятся

$$\Delta X_A = \Delta\xi_2 = \Delta\eta_3; \quad \Delta Y_A = \Delta\xi_3; \quad \Delta Z_A = \Delta\eta_2. \qquad (2.60)$$

В формулах (2.57), (2.58), (2.59) $\Delta\xi_1$, $\Delta\xi_2$, $\Delta\xi_3$, $\Delta\eta_1$, $\Delta\eta_2$, $\Delta\eta_3$ представляют собой координаты главного максимума соответствующих ВКФ.

Расстояния $l_1, l_2, l_3$ до ОР определяются следующими выражениями (см. рис. 2.12):

$$l_1 = \frac{l'_2 - \Delta x}{\cos\psi_x}; \quad l_2 = \frac{l'_2 - \Delta y}{\cos\psi_y}; \quad l_1 = \frac{l'_3 - \Delta z}{\cos\psi_z};$$

$$\psi_x = \arccos\frac{l'_1 - \Delta x}{l_1}; \psi_y = \arccos\frac{l'_2 - \Delta y}{l_2}; \psi_z = \arccos\frac{l'_3 - \Delta z}{l_3}, \quad (2.61)$$

где $\psi_x, \psi_y, \psi_z$ – угол между направлением на ОР и соответствующими осями системы координат $X_0Y_2$ (на рис. 2.12 не показаны). Причем $l_1 \sim \Delta M_y, l_2 \sim \Delta M, l_3 \sim M_x$, где $\sim$ – знак пропорциональности; $\Delta M_y, \Delta M_z, \Delta M_x$ – изменение масштаба ВКФ, пропорциональное изменению ТИ относительно исходного ЭИ.

## 2.7. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В общем виде цвет (Ц) изображения может быть описан следующим цветовым уравнением [28, 29]:

$$\text{Ц} = T_1[r_{ij}] + T_2[g_{ij}] + T_3[b_{ij}], \qquad (2.62)$$

где $T_1, T_2, T_3$ – координаты цвета; $r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}$ – единичные количества основных соответствующих цветов: красного ($r$), зеленого ($g$) и синего ($b$). Из анализа уравнения (2.62) следует, что для оценки цвета изображения необходимо разделить цвет на основные слагаемые $R$,

*G, B,* а затем путем оценки сочетания этих слагаемых определить цвет изображения.

Полный процесс сравнения цветных изображений в СТЗ содержит пять основных этапов: формирование, предварительную обработку, сегментацию, описание и анализ.

Сравнение цветных изображений рассматривается как динамическая система, промежуточные статические состояния которой определяются полем системы и ее характеристикой на каждом из последовательно рассматриваемых этапов обработки изображения. Поле системы представляет собой множество элементов изображения, образующих матрицу $z$ размером $N_{\text{П}} \times N_{\text{П}}$. Характеристика системы включает в себя совокупность массивов *R, G, B,* элементы которых $r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} (i, j = \overline{O, N_{\text{П}} - 1})$ характеризуют уровни красного, зеленого и синего (основных) цветов соответственно для каждого элемента массива $z_{ij}$. Множество, определяющее характеристику системы, включает в себя также набор $\{L\}$ промежуточных величин, используемых в процессе обработки изображения и вычисляемых с использованием значений элементов массивов *R, G, B. В* качестве элементов множества $L$ могут выступать цветовые, геометрические, структурные и другие признаки, характеристики положения объекта, гистограммы яркости и пр.

Таким образом, процесс сравнения цветных изображений в КЭС представим в виде последовательной смены статических состояний $A_k (k = 1,5)$ динамической системы $A$, каждое из которых определяется набором [31 – 33]

$$\{X, R, G, B, L\}_k, \tag{2.63}$$

где $X$ – поле системы; $\{R, G, B, L\}_k$ – характеристика системы.

В свою очередь, каждый из массивов *R, G, B* может быть представлен в виде многомерной векторной функции $f_r, f_g, f_b$ от параметров $1, m, n_{\text{Ш}}$:

$$R = f_r(1', m', n_{\text{Ш}});$$

$$G = f_g(1', m', n_{\text{Ш}}); \tag{2.64}$$

$$B = f_b(1', m', n_{\text{Ш}}),$$

где 1' – искомая характеристика; $m'$ – мешающий параметр; $n_{\text{Ш}}$ – случайный шум.

Величины 1', $m'$, $n_{\text{Ш}}$ в общем случае векторные. В качестве искомого параметра 1' может выступать символ класса или образа, а также различные другие характеристики системы.

Факторы, которые достаточно точно могут быть описаны каким-либо известным распределением вероятностей, могут быть представлены как случайные помехи или шум $n_{\text{Ш}}$. Воздействие компонент шума на отдельные компоненты сигнала характеризуется относительной независимостью.

В качестве мешающего параметра $m$ может быть представлена группа факторов, воздействующих на изображение в целом.

В случае монохромного изображения – красного, зеленого или синего – массивы $G$ и $B$, $R$ и $B$, $R$ и $G$ соответственно содержат лишь нулевые элементы. Так, например, для каждого элемента $z_{ij}$ монохромного красного изображения получаем

$$g_{ij} = [G]_{ij} = 0, b_{ij} = [B]_{ij} = 0, \tag{2.65}$$

т. е.

$$f_g(1', m', n_{\text{Ш}}) = 0; f_b(1', m', n_{\text{Ш}}) = 0; f_r(1', m', n_{\text{Ш}}) \neq 0.$$

В этом случае состояния $A_k$, $k = \overline{1,5}$, системы сравнения цветных изображений могут быть определены с помощью следующих наборов:

$$A_k = \{x, r, 0, 0, 1\}_k, \tag{2.66}$$

где 0 – массив, содержащий лишь нулевые элементы, т. е. $A_k = \{x, r, l\}_k$.

Аналогичным образом можно получить следующие соотношения, определяющие состояния $A_k$, $k = \overline{1,5}$, системы сравнения цветных изображений для монохромных зеленого и синего, а также черно-белого изображений соответственно:

$$A_k = \{X, 0, G, 0, L\}_k = \{X, G, L\}_k;$$

$$A_k = \{X, 0, 0, B, L\}_k = \{X, B, L\}_k; \qquad (2.67)$$

$$A_k = \{X, 0, 0, 0, L\}_k = \{X, L\}_k.$$

В соответствии с вышеизложенным конкретизируем процесс обработки видеоинформации, который состоит из этапов: фильтрации, предварительной обработки, сегментации, описания, анализа.

Рассмотрим основные этапы корреляционного сравнения цветных изображений. Процедуры предварительной обработки в общем случае могут быть представлены в виде системы уравнений

$$A_1[R_0] = R_1; \;\; A_1[G_0] = G_1; \;\; A_1[B_0] = B_1, \qquad (2.68)$$

где $A_1$ - оператор функций $R_0, G_0, B_0$; $R_0, G_0, B_0$ – массивы уравнений красного, зеленого и синего основных цветов; $R_1, G_1, B_1$ – комплексные массивы, полученные в результате предварительной обработки цветных изображений для методов пространственной области запишем следующим образом:

$$r_{1,ij} = A_1[r_{0,ij}]; \; g_{1,ij} = A_1[g_{0,ij}]; \; b_{1,ij} = A_1[b_{0,ij}], \qquad (2.69)$$

где $i, j = n'$, $r_{1,ij}$, $g_{1,ij}$, $b_{1,ij}$ – элементы, находящиеся, пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца соответствующего массива $R$, $G$, $B$; $n'$ – целое число, характеризующее количество элементов массива изображения.

Если ввести обозначение элемента массива соответствующего цвета

$$R_1(i, j) = r_{1,i,j}; \; G_1(i, j) = g_{1,i,j}; \; B_1(i, j) = b_{1,i,j}, \qquad (2.70)$$

то соотношения (2.70) можно переписать в следующем виде:

$$r_{1,ij} = [A'_1(R_0)]_{i,j}; \; g_{1,ij} = [A'_1(G_0)]_{i,j}; \qquad (2.71)$$

$$b_{1,ij} = [A'_1(B_0)]_{i,j}, \; i, j = n', \qquad (2.72)$$

где $A'$ – соответственно операторы функций $R_0, G_0, B_0$, определенные в некоторой окрестности пиксела $i, j$ или на множестве массивов, характеризующих цвет. В соответствии с вышеизложенным представим некоторые известные алгоритмы предварительной обработки изображений [35, 42] применительно к обработке цветных изображений. Например, алгоритм усреднения изображения по окружности будет

$$g_{1,i,j} = \sum_{(l,m)\in S(i,j)} \alpha_{l,m} g_{0,l,m};$$

$$r_{1,i,j} = \sum_{(l,m)\in S(i,j)} \alpha_{l,m} r_{0,l,m}; \qquad (2.73)$$

$$b_{1,i,j} = \sum_{(l,m)\in S(i,j)} \alpha_{l,m} b_{0,l,m}; \; l,m = n'' .$$

$S(i,j)$ – множество координат точек в окрестности пиксела $(i,j)$; $n''$ – положительное число, $\alpha$ – диаметр окружности.

Обозначив через $N_0$ общее число точек в окрестности пикета $(i, j)$ и приняв $\alpha_{l,m} = \frac{1}{N_0} \forall_{l,m} \in S(i,j)$, получим алгоритм скользящего среднего для цветных изображений

$$r_{1,i,j} = \frac{1}{N_0} * \sum_{r_0(l,m)\in S(i,j)} r_{0,l,m};$$

$$g_{1,i,j} = \frac{1}{N_0} * \sum_{r_0(l,m)\in S(i,j)} g_{0,l,m}; \qquad (2.74)$$

$$b_{1,i,j} = \frac{1}{N_0} * \sum_{r_0(l,m)\in S(i,j)} b_{0,l,m}.$$

Варьируя значениями коэффициентов $\alpha_{l,m}$, а также формой окрестности $S$, получим различные варианты масок для фильтрации цветных изображений. Например, алгоритм ранговой фильтрации цветных изображений, используя (2. 71), запишем в следующем виде:

$$r_{1,i,j} = \max_n \; r_{0,l,m} \; ;$$
$$(l,m)\in s(i,j)$$

$$g_{1,i,j} = \max_n \; g_{0,l,m} \; ;$$
$$(l,m)\in s(i,j)$$

$$b_{1,i,j} = \max_n \; b_{0,l,m} \; ,$$
$$(l,m)\in s(i,j)$$

где $\max_n(\bullet)$ – операция определения по величине какого-либо элемента среди элементов окрестности. Общий вид алгоритма усреднения

цветного неподвижного изображения, искаженного некоррелированным шумом с нулевым средним значением, будет

$$r_{1,i,j} = A_1[r(0,i,j).....r(0,i,j)_k];$$

$$g_{1,i,j} = A_1[g(0,i,j).....g(0,i,j)_k]; \qquad (2.75)$$

$$b_{1,i,j} = A_1[b(0,i,j).....b(0,i,j)_k]$$

или

$$r_{1,i,j} = \frac{1}{k}\sum_{l=1}^{k} r(o,i,j)l\ ;\ g_{1,i,j} = \frac{1}{k}\sum_{l=1}^{k} g(o,i,j)l\ ;\ b_{1,i,j} = \frac{1}{k}\sum_{l=1}^{k} b(o,i,j)l\ ,$$

где $k$ – число изображений.

В (2.76) при увеличении числа $k$ используемых изображений массивы $k$, $R_1$, $G_1$, $B_1$ приближаются к неискаженным массивам $R$, $G$, $B$.

При использовании логических операций для предварительной обработки цветных изображений оператор $A_1$ представляет собой булеву функцию 3-го множества элементов предварительно бинаризированных массивов $R$, $G$, $B$, содержащихся в некоторых окрестностях $S(i, j)$ пиксела $(i, j)$. Предположим, что изображение представляет собой совокупность нулей и единиц. Тогда соотношения, определяющие совокупность логических операций процедуры предварительной обработки изображения, получим в следующем виде:

$$r_{1,i,j} = E\left\{r_{0,l,m} \in S(i,j)\right\};$$

$$g_{1,i,j} = E\left\{g_{0,l,m} \in S(i,j)\right\}; \qquad (2.76)$$

$$b_{1,i,j} = E\left\{b_{0,l,m} \in S(i,j)\right\},$$

где $E$ – оператор, описывающий логические операции обработки изображений. Разработаны алгоритмы сглаживания бинаризированных цветных изображений путем использования булевой алгебры.

На этапе формирования корреляционных функций формируются три цветные ВКФ, соответствующие красному, зеленому и синему цвету. Эти слагаемые ВКФ описываются следующими выражениями [38, 39]:

$$J_R(\xi,\eta) = K_n \int_S F_1^c(x_{1,} y_1) F_2^R(x_2^{'}, y_2^{'}) dxdy\,;$$

$$J_G(\xi,\eta) = K_n \int_S F_1^c(x_{1,} y_1) F_2^G(x_2^{''}, y_2^{''}) dxdy\,; \qquad (2.77)$$

$$J_B(\xi,\eta) = K_n \int_S F_1^c(x_{1,} y_1) F_2^B(x_2^{'''}, y_2^{'''}) dxdy\,,$$

где $F_1^c(x_{1,} y_1)$ – функция, описывающая цветное ТИ; $F_2^R(x_2^{'}, y_2^{'})$, $F_2^G(x_2^{''}, y_2^{''})$, $F_2^B(x_2^{'''}, y_2^{'''})$ – функции, описывающие соответственно красную, зелёную и синюю компоненты цвета; $K_n$ – коэффициент пропорциональности; $S$ – площадь коррелируемых изображений.

Положение и цвет объекта оцениваются по анализу положения и сочетания слагаемых ВКФ. При распознавании цвета возможны два подхода (алгоритма). В первом случае определяется цвет объекта, окрашенного в какой-либо тон. Используя [28], запишем следующее решающее правило:

$Ц_К$=1, при $Ц_З$=$Ц_С$=$Ц_П$=$Ц_Ж$=$Ц_Г$=$Ц_б$=0 или $J_R = 1,\ J_G = J_B = 0;$

$Ц_З$=1, при $Ц_К$=$Ц_С$=$Ц_П$=$Ц_Ж$=$Ц_Г$=$Ц_б$=0 или $J_G = 1,\ J_R = J_B = 0;$

$Ц_С$=1, при $Ц_К$=$Ц_З$=$Ц_П$=$Ц_Ж$=$Ц_Г$=$Ц_б$=0 или $J_B = 1,\ J_R = J_G = 0;$

$Ц_П$=1, при $Ц_К$=$Ц_С$=1, $Ц_З$=$Ц_Ж$=$Ц_Г$=$Ц_б$=0 или $J_R = J_B = 1,\ J_G = 0;$ (2.78)

$Ц_Ж$=1, при $Ц_К$=$Ц_З$=1, $Ц_С$=$Ц_П$=$Ц_Г$=$Ц_б$=0 или $J_R = J_G = 1,\ J_B = 0;$

$Ц_Г$=, при $Ц_С$=$Ц_З$=1, $Ц_К$=$Ц_П$=$Ц_Ж$=$Ц_б$=0 или $J_G = J_B = 1,\ J_R = 0;$

$Ц_б$=, при $Ц_К$=$Ц_З$=$Ц_С$=1, $Ц_П$=$Ц_Ж$=$Ц_Г$=0 или $J_R = J_G = J_B = 1,$

где $Ц_к$, $Ц_З$, $Ц_С$, $Ц_П$, $Ц_Ж$, $Ц_Г$, $Ц_б$ - соответственно уровни красного, зеленого, синего, пурпурного, желтого, голубого и белого цветов. Таким образом, по сочетанию $Ц_к$, $Ц_г$, $Ц_з$ можно определить любой цвет объекта. Во втором случае при определении цвета объекта, имеющего сложный цветовой окрас (например, областей различного цвета на общем изображении), используется дополнительное поле, несущее информацию об уровне серого цвета, по которому оценивается положение объекта, а по цветовым слагаемым ВКФ определяются необходимые цвета согласно (2.78).

## 2.8. ВЫВОДЫ

1. Предложена обобщенная итеративная схема корреляционного сравнения черно-белых и цветных изображений различной размерности, содержащая следующие этапы: формирование ТИ (автоматическая настройка, ввод ТИ, разделение ТИ на цвета), предварительную обработку ТИ (фильтрация, коррекция, бинаризация), сегментацию и кодирование ТИ (выделение контуров, формирование точек, вычисление координат центра тяжести, инвертирование, перевычисление в другие системы координат, селекция элементов, фильтрация несовпадающих частей (помех), формирование микроплана, развертка контура), формирование КФ (алгоритмы: классический, с фильтрацией, с совмещением или без совмещения ТИ и ЭИ по углу, безэталонный (динамический), с заданным расположением слагаемых ВКФ, с разложением на цвета), анализ КФ (алгоритмы: амплитудный, модифицированный амплитудный, с коррекцией координат, модифицированный дифференциальный, разностный, модифицированный спектральный, квадратичный, стереотелевизионный, линейный модифицированный, адаптивный); показано, что критерием подхода от обычных к преобразованным (контурным, точечным и другим) изображениям могут служить коэффициенты, характеризующие отношение площади изображения объекта к площади накопителя ТИ или отношение линейных размеров указанных элементов.

2. Выработаны рекомендации по выбору параметров ЭИ исходя из таких достаточных условий работоспособности КЭС, как, во-первых, размеры ЭИ и положение его центра должны обеспечивать существование областей, на которых функция, описывающая ЭИ, возрастает, достигает максимума и убывает, а на границах ЭИ обеспечивается постоянство произведения значения функции эталона и ее частных производных; во-вторых, размеры ТИ и ЭИ должны быть много больше радиуса корреляции реализаций шума, а различие в размерах изображений должно превышать максимальное значение сдвигов.

3. Исследована помехоустойчивость КЭС, сравнивающей ТИ и ЭИ, представленных в виде точечных или протяженных элементов. Получены аналитические выражения для точечных изображений, связывающих совпадающие и несовпадающие элементы изображений, размеры элементов и кадров ТИ и ЭИ; установлено, во-первых, если

число несовпадающих элементов меньше числа совпадающих элементов, то минимум вероятности сбоя КЭС достигается, когда отношение значений главного к побочному максимуму максимально; во-вторых, если число несовпадающих элементов много больше числа совпадающих элементов, то минимум вероятности сбоя КЭС достигается при числе совпадающих элементов, обеспечивающем наибольшее значение разности амплитуд главного и побочного максимумов. Установлено, что в случае использования протяженных изображений возникают несовпадающие части ТИ, искажающие ВКФ, вследствие чего возникает систематическая ошибка оценки координат.

4. Разработаны методы пространственной фильтрации несовпадающих частей (помех) ТИ, ЭИ и ВКФ путем введения в коррелятор четырех фильтров, причем для ТИ используются два фильтра, а для ЭИ и ВКФ – по одному фильтру; показано, что для эффективной работы фильтров они должны быть выполнены в следующем виде: первый фильтр ТИ представляет собой маску, в которой изображения элементов прозрачны, по форме и расположению идентичны ЭИ, а границы элементов изображения на маске расширены по сравнению с ЭИ на величину, характеризуемую погрешностью КЭС и скоростью движения объекта в рабочей зоне; второй фильтр ТИ и фильтр ЭИ выполнены в виде маски, содержащей прозрачную область, равную размеру соответственно кадров ТИ и ЭИ; фильтр ВКФ реализован в виде диафрагмы, размер и положение которой устанавливаются в зависимости от величины помех и координат объекта.

5. Применен корреляционный алгоритм сравнения стереоизображений, позволяющий оценивать пространственные координаты объекта. Разработан модифицированный линейный корреляционный алгоритм оценки пространственного положения объекта на основе сравнения изображений проекций; рассмотрены особенности применения этого алгоритма при использовании различного числа и комбинаций ДТИ.

6. Обоснован процесс сравнения цветных изображений в КЭС, представленный в виде последовательной смены статистических состояний динамической системы, каждое из которых определяется набором параметров, соответствующих полю системы и характеристикам системы. Показана особенность применения алгоритмов предварительной обработки и сегментации цветных изображений, разрабо-

тан корреляционный алгоритм сравнения цветных изображений, характеризующийся формированием и сопоставлением трех ВКФ, соответствующих основным слагаемым цвета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *А.с. 113096* СССР, М. кл. G 01 s 9/00 /А.К.Виноградов, Л.П.Каменский, В.М.Свиридов, М. П. Ангелов, В. И. Сырямкин, В.А.Катышев, В.И.Лысенко (СССР). 8 с.: ил. 1.

2. *А.с. 123315* СССР М.кл. G 01 S 5/00, G 01 S 9/00. Устройство для определения координат объекта / М.П. Ангелов, А.К. Виноградов, Ю.К. Любавский, В.А. Катышев, М.П. Милованов, С.Я. Пашнев, В.М. Свиридов, В.И. Сырямкин (СССР). – 17 с.: ил. 5.

3. *А.с. 172936* СССР, М. кл. G 01 S 5/00, G 01 S 9/00, Устройство для определения координат объекта / М.П.Ангелов, М.П. Милованов, А.М. Луканидин, В.И. Сырямкин, В.В. Штыхно (СССР). – 7 с.: ил. 3.

4. *А.с. 532283* СССР, М. КЛ. G 01 C 21/14, G 01 S 7/22. УСТРОЙСТВО для определения координат объекта / М.П.Ангелов, А. Г. Карпов, В. А. Катышев, В.М. Мохов, О.М. Раводин, В.И. Сырямкин (СССР). – 6 с.: ил.1. ДСП.

5. *А.с. 574982* СССР, М. кл. G 01 s 5/02. Устройство для определения координат объекта /М.П. Ангелов, В.А. Катышев, Л.К. Максимов, М.П. Милованов, В.М. Мохов, В.И. Сырямкин, В.П. Тарасенко (СССР). – 9 с.: ил:1.ДСП.

6. *А.с. 592229* СССР, М. кл. G 01 C 21/14, G 01 S7/22. Устройство для определения координат движущегося объекта/ М. П. Ангелов, В.А.Катышев В. Г. Резник, В. И. Сырямкин (СССР) – 6 с.: ил.1.ДСП.

7. *А.с. 644192* СССР, М. кл. G 01 s 5/02. Устройство для определения координат объекта / М.П. Ангелов, В.А. Катышев, М.П. Милованов, В.И. Сырямкин (СССР). – 7 с.: ил. 2.ДСП.

8. *А.с. 687937* СССР, М. кл. G 01 s 5/02. Устройство для определения координат объекта /М.П.Ангелов, В.А.Катышев, М. П. Милованов, В. И. Сырямкин (СССР). – 10 с.: ил. 3. ДСП.

9. *А.с. 692373* СССР, М. кл. G 01 s 5/02. Устройство для определения координат объекта / М.П.Ангелов, В.А.Катышев, М.П. Милованов, В.И. Сырямкин (СССР). – 6 с.: ил.2.ДСП.

10. *А.с. 955802* СССР, М. кл. G 05 D1/08. Устройство для управления движущимся объектом / М.П.Ангелов, М.П. Милованов, В. И. Сырямкин (СССР). – 10с.: ил. 2.

11. *А.с. 114503* СССР, М. кл. G 01 s 5/оо, g 01 s 9/оо. Устройство для определения координат объекта /М. П.Ангелов, Ю.А.Андреев, В. А. Катышев, М. П.Милованов, В. И. Сырямкин, Н.И.Юрга (СССР). – 13 с.: ил. 7.

12. *А.с. 143539* СССР, М. кл. F 41 G 7/14. / М. П.Ангелов, А.К.Виноградов, Л.П.Каменский, В.А.Катышев, А.М. Кориков, Ю.К. Любавский, М.П. Милованов, В.М. Свиридов, В.И. Сырямкин (СССР). – 20 с.: ил. 5.

13. *А.с. 160301* СССР, М.КЛ. G 01 S 5/00, G 01 S 9/00. Устройство для определения координат объекта / М.П. Ангелов, М.П. Милованов, Т.В. Мышкина, В.И. Сырямкин, Н.И. Юрга (СССР), – 10с.: ил. 3.

14. *А.с. 728496* СССР, М. кл. G 01 S 5/02. Устройство для определения координат движущегося объекта / М.П.Ангелов, В. А. Катышев, М.П. Милованов, С.Я. Пашнев, В.И. Сырямкин, В.П. Тарасенко (СССР). – 17 с: ил. 2. ДСП.

15. *А.с.650441* СССР, М. кл. G 05 D 1/08. Устройство для управления движущимся объектом / М.П. Ангелов, М.П. Милованов, В.И. Сырямкин, В.С. Фофонов (СССР). – 10: ил. 4. ДСП.

16. *Ангелов М.П.* О связи точности работы КЭСН с распределением, структурой и формой элементов изображения на сравниваемых картах // Корреляционно-экстремальные системы обработки информации и управления. – Томск: ТГУ. – 1975. – С. 164 – 174.

17. *Ангелов М.П., Мышкина Т.В., Сырямкин В.И.* Рекомендации по выбору параметров изображений, обеспечивающих правильную работу КЭС // Корреляционно-экстремальные системы управления. – Томск: ТГУ, 1980 – Вып. 5. – С. 201 – 217.

18. *Белоглазов И.Н., Тарасенко В. П.* Корреляционно-экстремальные системы. – М.: Сов. радио, 1974., – 392 с.

19. *Бочкарев А.М.* Корреляционно-экстремальные системы навигации // Зарубежная радиоэлектроника, 1981, N9. – С. 28 – 53.

20. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике /Под ред. Г.Гроше и В. Циглера. – М.: Наука, 1980. – 976 с.

21. *Влияние* параметров изображений и параметров КЭС на точностные характеристики КЭС / М.П.Ангелов, В.А.Катышев, М.П. Милованов, В.В. Скрыльников, В.И. Сырямкин // Корреляционно-экстремальные системы обработки информации и управления. – Томск: ТГУ, 1977. – С. 84 – 113.

22. *Журавлев Г.А., Загорский М.Ю., Пивоваров В.Т.* Процедура согласования стереоизображений // Техника средств связи: техника телевидения. – 1989. – N 1. – С. 84 – 89.

23. *Зависимость* помехоустойчивости КЭС от расположения и числа точечных ориентиров/М.П.Ангелов, В.А.Катышев, М.П. Милованов, В.И. Сырямкин // Корреляционно-экстремальные системы обработки информации и управления. – Томск: ТГУ, – 1977. – С. 74 – 83.

24. *Кориков А.М., Сырямкин В.И., Ангелов М.П.* Исследование корреляционно-экстремального сенсорного устройства для промышленных роботов // Корреляционно-экстремальные системы управления. – Томск: ТГУ, 1980. – С. 218 – 229.

25. *Кориков А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Корреляционные зрительные системы роботов; Под ред. А.М. Корикова. – Томск: Радио и связь, Томск, отдел., 1990. – 264 с.

26. *Корреляционно-экстремальные* видеосенсорные системы для роботов / Ю.А. Андреев, Н.Н. Белоглазов, А.М.Кориков, В.И. Сырямкин, В.П. Тарасенко; Под ред. А.М. Корикова и В.П. Тарасенко. – Томск: ТГУ, 1986. – 240 с.

27. *Корреляционно-экстремальные* видеосенсорные системы промышленных манипуляционных роботов / В.А. Десятов, А.М. Кориков, С.Я. Пашнев, Б.И. Савинков, В.И. Сырямкин и др. // Корреляционно-экстремальные системы и их проектирование. – ТОМСК: ТГУ. – 1988. – N10. С. 9 – 17.

28. *Крыжановский В.Д., Костыков Ю.В.* Телевидение цветное и черно-белое. – М.: Связь. 1980. – 336 с.

29. *Мартинес Ф.* Синтез изображений: Принципы, аппаратное и программное обеспечение. – М.: Радио и связь, 1990. – 192 с.

30. *Медведев Г.А. Тарасенко В.П.* Вероятностные методы исследования экстремальных систем. – М.: Наука, 1967. – 456 с.

31. *Никитина Ю.А., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Адаптивные алгоритмы классификации объектов по цвету в телевизионных СТЗ // Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов: Тез. докл. 2-ой Всесоюз. конф. – Барнаул: АЛИ, 1991. – Ч.2. – С. 106 – 107.

32. *Никитина Ю.А., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Комплекс алгоритмов обработки цветных изображений в телевизионных системах машинного видения // Распознавание образов и анализ изображений. Новые информационные технологии: Тез. докл. 1-ой Всесоюз. конф. Минск: ин-т техн. кибер. АН БССР, 1991. – Ч.3. – С. 135 – 137.

33. *Никитина Ю.А., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Особенности обработки цветных изображений в телевизионных системах технического зрения. – Томск, 1991. – 36 с. Деп. ВИНИТИ 05.08.91, N3335-В91.

34. *Петров А.А.* Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем адаптивных роботов (алгоритмы технического зрения роботов // Итоги науки и техники: Сер. Техническая кибернетика. М.: ВНИИТИ, 1984. – Т.17. – С. 251 – 293.

35. *Системы* технического зрения / А.Н.Писаревскии, А.Ф.Черняховский, Г.К.Афанасьев и др. – Л.: Машиностроение, 1988. – 424 с.

36. *Системы* технического зрения: Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю. Г. Якушенков и др. Под ред. В.И. Сырямкина, В.С Титова. – Томск: МГП «РАСКО» при изд. «Радио и связь», 1992. – 367 с.

37. *Смирнов С.А.* Стереоперспектива в фотограмметрии. – М.: Недра, 1982. – 142 с.

38. *Сырямкин В.И.* Корреляционная обработка цветных изображений в оптико-электронных системах // Оптико-электронные методы и средства в контрольно-измерительной технике. – М.: МДНТМ им. Ф.Э.Дзержинского. – 1991. – С. 20 – 24.

39. *Сырямкин В.И.* Корреляционные системы технического зрения анализа изображений различной размерности и цветности // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Тез. докл. Междун. конф. – Курск: КПИ, 1993.– С. 99.

40. *Сырямкин В.И.* Разработка и исследование аналоговых корреляционно-экстремальных сенсорных систем для промышленных роботов // Корреляционно-экстремальные системы управления. – Томск: ТГУ, 1982. – С. 117 – 120.

41. *Тарасенко В.П., Рябышкин Б.С. Афримзон А.Ф.* Оптические корреляторы и их применение // Итоги исследований по кибернетике: Труды межвуз. научи, конф., посвящ. пятидесятилетию Великой Октяб. Социал. Революц. – Томск: ТГУ, 1968. – С.137 – 160.Азерб. ССР, 1989. – С. 74.

42. *Техническое* зрение роботов / В.И.Мокшин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков / – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

43. *Тихонов В.И.* Статистическая радиоэлектроника. – М.: Сов. радио, 1966. – 677 с.

# Глава 3. СТРУКТУРНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

## 3.1. ВВОДНЫЕ ПОНЯТИЯ

Теория адаптивного управления базируется на различных эвристических или полуэвристических концепциях. Она открывает другой путь решения задачи управления в условиях неопределенности. Трудность заключается в том, что эти системы очень разнообразны, не однотипны и порой необязательны [8].

Без преувеличения можно сказать, что сегодня процессы возникновения регуляторных механизмов исследованы недостаточно. Во всех случаях появление нового метода синтеза скорее обязано изобретению, чем теории [3]. Поэтому современная теория управления движется в области поиска общих принципов синтеза, позволяющих в конкретных обстоятельствах как бы автоматически получать требуемый закон управления.

Приближением к решению этой проблематики может стать теория систем с переменной структурой [8]. Дело в том, что при создании управляющего устройства, базирующегося на принципах перестраиваемости, существует возможность наделить его динамической библиотекой алгоритмов управления. Здесь можно провести аналогию с классическим регулятором, схема которого изображена на рис. 3.1, который имеет фиксированную структуру, закладываемую проектировщиком на соответствующей стадии создания системы автоматического управления исходя из характеристик объекта, полученных тем или иным образом.

В устройствах управления с перестраиваемой структурой (рис. 3.2), имеется несколько фиксированных алгоритмов $A_i$ ($i = 1, 2, ..., n$), выбор которых происходит по определенному набору

правил о состоянии объекта, при непосредственном функционировании всей автоматической системы регулирования.

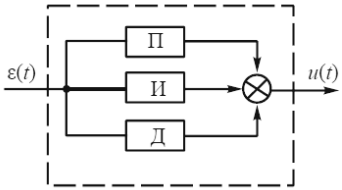


Рис. 3.1. Обобщенная внутренняя структура ПИД-регулятора

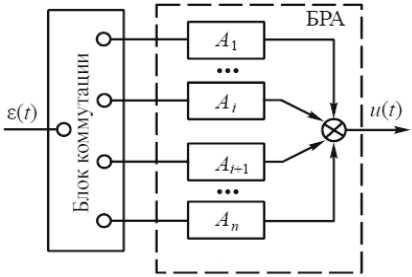


Рис. 3.2. Обобщенная внутренняя структура регулятора с перестраиваемой структурой

Как видно из рис. 3.2, управляющее устройство с перестраиваемой структурой может без труда перестроиться в классический регулятор при соответствующих наборах правил (например, $A_1 \to k_П$, $A_2 \to \frac{k_И}{p}$, $A_3 \to k_Д \cdot p$, ошибка регулирования подается на первые три канала одновременно), но существует также и возможность получения новых свойств, не присущих ни одной из фиксированных структур.

Таким образом, возможность относительно простыми средствами улучшить динамику систем автоматического регулирования, используя принципы перестраиваемых структур, объясняет растущий интерес к этому классу систем, которые является, по-видимому, очень перспективным направлением [8].

## 3.2. ПОНЯТИЕ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Значительные дополнительные возможности улучшения процессов регулирования дает нелинейное управление работой объекта путем изменения структуры управляющего устройства в зависимости от размеров и знаков входных величин, поступающих в управляющее устройство от измерительного устройства [8].

При этом могут использоваться комбинации линейных законов регулирования (их достоинства, обходя недостатки). Например, если известно, что при одном законе регулирования получается быстрое начальное изменение регулируемой величины, но с большим перерегулированием (рис. 3.3, *а*, кривая *1*), а при другом – медленное изменение, но плавный подход к новому установившемуся режиму (рис. 3.3, *а*, кривая *2*), то можно, включив сначала первый закон, переключить затем систему на второй закон в некоторой точке *A*, когда отклонение *y* достигнет определенного значения $y_A$. В результате процесс регулирования приобретет форму кривой, изображенной на рис. 3.3, *б*, объединяющей оба качества – быстроту и плавность процесса. Используя данный подход, мы получаем процесс регулирования без характерных для ПИ- и ПИД-регуляторов колебаний и перерегулирования при малом времени регулирования [8].

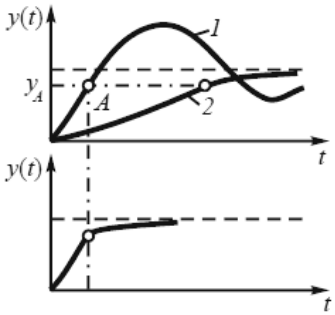


Рис. 3.3. Принцип работы системы с переменной структурой

Подобные системы относятся к классу нелинейных, даже если все звенья системы линейны. Обусловлено это тем, что в процессе работы происходят автоматические переключения между звеньями. Та-

кую работу можно сравнить с тем, как получается нелинейная статическая характеристика из отрезков прямых линий. Но в данном случае имеет место нелинейная динамическая характеристика, составляемая из последовательности разных линейных дифференциальных уравнений, соответствующих первому и второму законам регулирования.

В дальнейшем под системами с переменной структурой будем понимать системы, в которых связи между функциональными элементами меняются тем или иным образом в зависимости от состояния системы [2].

На рис. 3.4 представлена общая схема системы с переменной структурой.

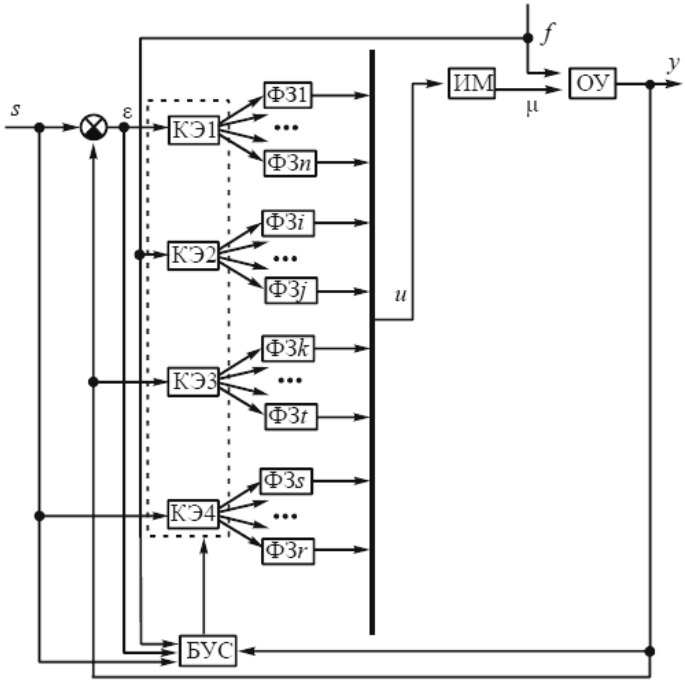


Рис. 3.4. Общая структурная схема системы с переменной структурой

В зависимости от того, какие координаты системы и внешние воздействия доступны для измерения, на вход управляющего устрой-

ства (УУ) может поступать информация о величине ошибки $\varepsilon$, выходной координате исполнительного устройства $\mu$, задающем и возмущающем воздействиях $s(t)$ и $f(t)$, регулируемой величине $y$, промежуточных координатах объекта $y_1,...,y_i$ и исполнительного устройства $\mu_1,...,\mu_k$. Управляющее устройство содержит ряд функциональных звеньев, причем оператор каждого из них обозначен на рис. 3.4 аббревиатурой ФЗ с соответствующими индексами.

Любая из входных величин управляющего устройства может поступать на входы только «своих» звеньев. Управляющее воздействие $u$ является суммой выходных величин всех звеньев. В УУ содержатся ключевые элементы (КЭ). Любой КЭ замыкает один из предусмотренных каналов передачи информации. Разнообразные сочетания положений контактов КЭ определяют совокупность имеющихся в распоряжении фиксированных структур. Блок управления структурой (БУС) на основе анализа всей поступающей на УУ информации дает команду на изменение структуры системы. Вопрос синтеза такой системы сводится к выбору операторов всех звеньев и логических законов, в соответствии с которыми изменяется структура системы.

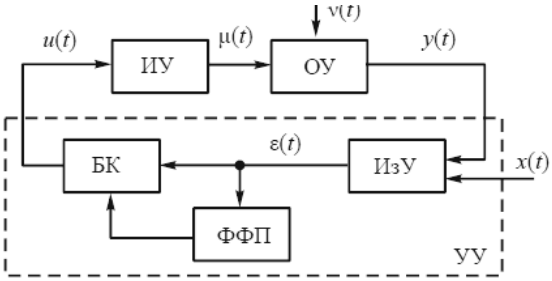


Рис. 3.5. Схема автоматического регулирования с переменной структурой

На рис. 3.5 представлена обобщенная схема автоматического регулирования с переменной структурой. В нее входит блок измерения, или измерительное устройство (ИзУ), которое производит непрерывную оценку регулируемой величины и вычисляет величину сигнала рассогласования, который подается на блок формирователя функции переключения (ФФП), осуществляющий анализ и переключение

сигнала отклонения регулируемой величины $\varepsilon(t)$ на необходимый закон регулирования посредством блока коммутируемых коэффициентов (БК). После чего сигнал управления посылается на исполнительное устройство (ИУ)

## 3.3. ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СРЕДЫ

### 3.3.1. Общие понятия

Автомат – управляющая система, являющаяся конечным автоматом или некоторой его модификацией, полученной путем изменения компонент или функционирования. Основное понятие – конечный автомат – возникло в середине XX в. в связи с попытками описать на математическом языке функционирование нервных систем, универсальных вычислительных машин и других реальных автоматов. Характерной особенностью такого описания является дискретность соответствующих математических моделей и конечность областей значений их параметров, что приводит к понятию конечного автомата.

Математическое понятие автомата – математическая модель реально существующих или принципиально возможных систем, осуществляющих преобразование дискретной информации. Абстрактно автомат можно представить как некоторое устройство («черный ящик»), имеющее конечное число входных и выходных каналов и некоторое множество внутренних состояний. На входные каналы автомата извне поступают сигналы, и в зависимости от их значения и от того, в каком состоянии он находился, автомат переходит в следующее состояние и выдает сигналы на свои выходные каналы. С течением времени входные сигналы изменяются, соответственно изменяются и состояние автомата, и его выходные сигналы. Таким образом, автомат функционирует во времени [1].

В настоящее время существуют различные подходы к определению понятия конечного автомата, которые могут быть разбиты на группы макроподхода и микроподхода. При макроподходе интересуются внешним поведением устройства, тем, как оно осуществляет переработку входной информации в выходную информацию и последовательность состояний, отвлекаясь от внутреннего его состояния. На этом пути приходят к понятию абстрактного конечного автомата.

Тем самым абстрактный конечный автомат может быть задан с помощью набора отображений, описывающих его «внешнее» функционирование. При микроподходе учитывается структура устройства, функционирование и связь между собой его частей. На этом пути приходят к понятию структурного конечного автомата, называемого также автоматной схемой, логической сетью либо многофункциональным логическим модулем (МЛМ). Структурный конечный автомат задается конечным множеством абстрактных автоматов, конечной схемой их соединения и указанием влияния частей схемы друг на друга. Понятия конечного абстрактного и конечного структурного автоматов можно считать составляющими понятия конечного автомата.

Обобщение понятия конечного автомата получается путем обобщения понятий конечных абстрактного и структурного автоматов.

Абстрактный автомат получается в результате выбора произвольных (необязательно конечных) множеств входных и выходных сигналов, множеств состояний, а также при расширении понятия зависимости состояния и выходного сигнала от входного сигнала и состояния. Структурный автомат получается в результате выбора произвольных множеств автоматов и схем их соединений.

По количеству выполняемых преобразований информации все множество автоматов можно разделить на два класса: неперестраиваемые, или монофункциональные, автоматы; перестраиваемые, или многофункциональные, автоматы (М-автоматы).

Монофункциональный автомат имеет жесткую структуру и всегда реализует одно и то же преобразование $\{X\} \to \{Y\}$. Для такого автомата величина его функциональности $L = 1$.

К М-автоматам относятся все управляемые автоматы, реализующие путем их настройки некоторое множество $D_A = \{A_i\}, i = \overline{1, L}$, автоматных преобразований $\{X_i\} \to \{Y_i\}$, где $L > 1$.

Если функции переходов $\delta$ и выходов $\lambda$ задаются на конечных множествах $D_\delta \subseteq \{X\} \times \{Z\}$ и $D_\lambda \subseteq \{X\} \times \{Z\}$ и М-автомат реализует любые автоматные преобразования (путем его настройки), определяемые парами функций $\delta^{(i)}$ и $\lambda^{(i)}$ и задаваемые на конечных множествах $D_\delta$ и $D_\lambda$, то такой автомат называется универсальным, или У-автоматом.

Выполнение в М-автомате требуемого автоматного преобразования $A_i \in D_A$ осуществляется соответствующей его настройкой. По принципу настройки М-автоматы делятся на три класса: с функциональной, структурной и программной настройкой.

Под функциональной настройкой М-автомата будем понимать такую настройку, при которой код настройки $Z_i$ не изменяется в течение всего времени выполнения преобразования $A_I$. При этом связи между функциональными элементами структурной схемы М-автомата могут оставаться прежними или изменяться в зависимости от реализуемого преобразования. В последнем случае изменение связей в структурной схеме М-автомата по существу эквивалентно преобразованию самой его структуры.

Настройка автомата, в результате которой его структурная схема претерпевает соответствующие изменения (за счет изменения связей), называется структурной настройкой.

В программно настраиваемом автомате преобразования $A_I$ выполняются за некоторое число $n_{\tau i}$ шагов, при этом код настройки на каждом шаге преобразования меняется.

Функциональная настройка является наиболее простым видом настройки и характерна для простейших М-автоматов. Структурная настройка является более сложной и характерна для автоматов с более сложной структурной организацией, представляющей собой композицию некоторых функциональных элементов (автоматов) и элементов (автоматов) коммутации или связи. Код настройки такого М-автомата состоит из двух частей: кодов настроек функциональных автоматов и кодов настроек коммутационных автоматов. При этом сами функциональные и коммутационные автоматы могут быть функционально или структурно-перестраиваемыми.

Под перестраиваемым автоматом понимают модель широкого класса дискретных устройств, называемых иногда многофункциональными и универсальными логическими модулями, настраиваемыми логическими устройствами и т.п. Перестраиваемым называется автомат, для которого задано множество реализуемых им автоматных отображений и определен алгоритм настройки на реализацию каждого из этих автоматных отображений. Перестраиваемый автомат можно представить как множество автоматов с одними и теми же

выходами, причем настройка определяет тот автомат, выходы которого считаются при этой настройке выходами всего перестраиваемого автомата. Поэтому перестраиваемый автомат ничего, кроме автоматных отображений, реализовать не может. В случае, если перестраиваемый автомат при любых настройках формирует значение сигналов на его выходах, зависящих только от значений сигналов на его входах, он называется комбинационным перестраиваемым автоматом, или многофункциональным логическим модулем. Если же для некоторых настроек значения сигналов на выходах автомата зависят от его состояния, то он называется перестраиваемым автоматом с памятью [8].

### 3.3.2. Работа перестраиваемых автоматов

Перестраиваемый автомат состоит из множества логических элементов, реализующих функции {И, ИЛИ, НЕ}, а также имеет определённое число настроечных входов, информационных входов и несколько выходов.

Элемент ИЛИ – «дизъюнкция» – представляет собой логическое сложение входных сигналов и обозначается знаками $\vee$ или $+$, а элемент И – «конъюнкция» – логическое произведение и обозначается $\cdot$ или $\&$. Таблица 3.1 является таблицей истинности для функций ИЛИ и И.

Таблица 3.1

**Таблица истинности для функций ИЛИ и И**

| $X$ | $Y$ | $X \vee Y$ | $X \& Y$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

На входы логического элемента поступают сигналы, идущие от настроечных $z$ или информационных ($y$, $x$) входов автомата, а выходной сигнал $f$ элемента поступает на один из входов следующего логического элемента. Таким образом, структура каждого автомата описывается системой булевых формул. При разных настроечных кодах система принимает различные значения, а сам автомат – соответствующие структурные схемы.

На основе автоматов могут выстраиваться однородные структуры (ОС) путём их последовательного соединения. Также встречается такие названия, как однородная среда, однородная вычислительная среда. Единообразие технического решения на основе ОС позволяет свести к минимуму затраты на разработку, удешевить стоимость системы благодаря массовому производству ОС, расширить диапазон возможных структур при реализации конкретных систем управления.

Одной из важнейших областей применения ОС является область автоматизации научных исследований, с которой тесно связана разработка информационно-измерительных систем.

Основные принципы, заложенные в основу построения ОС, оказываются полезными и при создании сложных устройств телемеханики, где также в связи с возрастанием сложности управления объектом и объёмом получаемой и передаваемой информации возникает необходимость в построении систем с переменной структурой.

Таким образом, применение ОС в области автоматики, телемеханики и в информационно-измерительных системах представляется перспективным. [3]

### 3.3.3. Понятие однородной вычислительной среды

Однородные среды относятся к одному из важнейших видов управляющих систем. Они представляют собой дискретную математическую модель широкого класса реальных систем вместе с протекающими в них процессами [8].

Однородными средами называются структуры, состоящие из функциональных ячеек и соединений между ними, которые отвечают следующим основным требованиям:

1) структура представляет собой геометрически правильную решетку, имеющую не менее двух осей симметрии, в узлах которой расположены функциональные ячейки (автоматы);

2) все функциональные ячейки структуры однотипны;

3) каждая функциональная ячейка соединена геометрически одинаковым образом с соседними, причем каждую из ячеек можно условно считать центром симметрии относительно связей ее с окружающими ячейками структуры;

4) функциональная ячейка структуры может быть настроена на выполнение в данный момент любой одной функции хотя бы одного

полного базиса и функции канала передачи сигналов в заданном направлении, т. е. ячейка должна обладать функциональной и соединительной полнотой;

5) сигнал от любой ячейки *A* может быть передан к любой ячейке *B* структуры (хотя бы при помощи других ячеек);

6) изотропность структуры, вытекающая из предыдущих требований, позволяет реализовать любую заданную функцию на любом участке или области структуры.

Перечисленным признакам может отвечать большое количество разнообразных структур, отличающихся друг от друга геометрией решетки, функциональной схемой ячейки, количеством и характером связей, способом настройки и т.п.

Структуры, характеризующиеся не всеми указанными признаками, а лишь частью их, называются не полностью однородными.

Однородные структуры могут быть условно классифицированы по многим признакам, отражающим их особенность. Так, например, однородные структуры могут быть классифицированы:

1) по размерности пространства: одно-, двух- и трехмерные;

2) временным параметрам изменения состояний структуры: синхронные, асинхронные и смешанные;

3) характеру выбора направления передачи сигналов: на структуры с индивидуальным выбором и структуры с коллективным выбором;

4) числу возможных направлений передачи сигналов и числу связей с окружающими ячейками: структуры с двумя, тремя, четырьмя и бóльшим числом связей и направлений передачи сигналов;

5) способам настройки ячеек структуры: сигналами извне (непосредственный, координатный, пошаговый, адресный способ и др.) или сигналами от соседних ячеек;

6) способам подачи входных сигналов и отбора выходных сигналов: по краям или изнутри структуры;

7) функциональной способности ячейки структуры (набор функций, реализуемых ячейкой);

8) степени универсальности структур: универсальные и специализированные [6].

В начальном состоянии однородная среда является недетерминированной относительно реализации в ней заданной функции. Для реализации заданной функции в структуру должна быть введена

некоторая информация, однозначно определяющая реализацию требуемой функции. Таким образом, настройка есть введение в структуру информации, которая обеспечивает перекоммутацию ячеек структуры для реализации схемы, реализующей заданную функцию.

Однородная среда называется настраиваемой, если функциональные ячейки среды могут быть настроены на реализацию той или иной функции только один раз, например путем выжигания отдельных соединений. Если однородная среда построена на основе многократно настраиваемых функциональных ячеек, она называется перестраиваемой [6]. В дальнейшем будем рассматривать только перестраиваемые однородные структуры, также известные как перестраиваемые вычислительные среды (ПВС).

### 3.3.4. ПВС как средство построения управляющего устройства в системах с переменной структурой

В общем случае закон управления для систем с перестраиваемой структурой выглядит следующим образом:

$$u = \psi \cdot \varepsilon , \qquad (3.1)$$

где $\varepsilon$ – сигнал ошибки регулирования; $\psi$ – логический закон, принимающий определенное значение в зависимости от типа объекта управления и его текущего состояния [8].

Устройство управления, реализующее закон (3.1), можно представить в виде заданного класса динамических корректирующих звеньев $A_i$ ($i = 1, 2, ..., n$), логического устройства $M$ и вспомогательных блоков формирования входных аргументов $x$ и настройки структуры $z$. Последние блоки служат для вырабатывания логических переменных, зависящих от состояния системы в фазовом пространстве и настройки логического устройства $M$ на требуемый логический закон управления. Структурная схема логического устройства управления изображена на рис. 3.6.

В качестве логического устройства $M$ в данной структуре выступает перестраиваемая вычислительная среда.

Перестраиваемые вычислительные среды позволяют создавать универсальные устройства управления, которые могут эффективно решать задачи различного назначения за счет гибкой программной настройки и перестройки алгоритмов управления как перед началом

работы, так и в процессе функционирования системы управления, т. е. приобретают свойства как статической, так и динамической реконфигурации своей структуры.

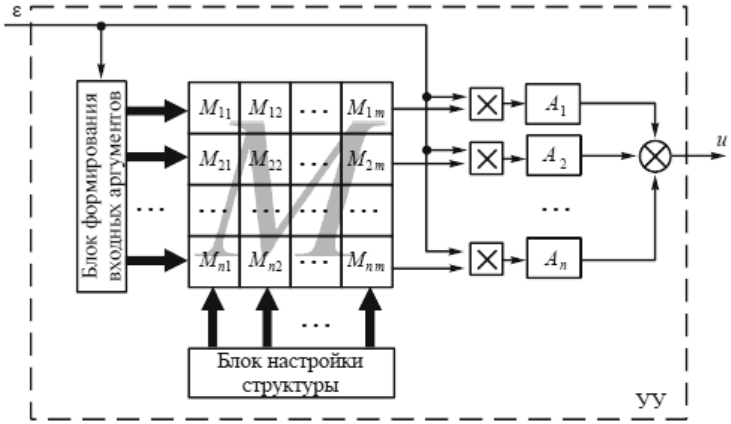


Рис. 3.6. Структурная схема логического устройства управления

Таким образом, рассматривается система автоматического регулирования (см. рис. 1.7) с объектом управления, описываемым передаточной функцией $W_{об}(p)$. Суть вопроса сводится к выбору, на основании информации только о знаке ошибки регулирования и знаке ее производной, такой последовательности значений $f_i$ во времени, из множества {0, 1}, при котором выходное значение $y$ объекта управления совпадало бы с задающим значением $s$ или их разница лежала бы в допустимых пределах при изменении внешнего возмущающего воздействия координатного и параметрического типов.

Для решения поставленных задач и синтеза структурно-перестраиваемых систем автоматического управления в работе предлагается использовать идеологию модели коллектива вычислителей в качестве базовой составляющей управляющего устройства.

Ключевой составляющей рассматриваемого устройства управления, как уже было сказано, является перестраиваемая вычислительная среда. Под ПВС будем понимать набор ($Z^k$, $V$, $Q$), где $Z^k$ – множество $k$-мерных векторов с целыми координатами, задающих узлы $k$-мерной целочисленной решетки; $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_{(m+p)}\}$ – перестраиваемый

автомат, помещенный в каждый узел решетки, у которого $n + p$ входных каналов, $m + p$ выходных каналов ($m$ основных, $p$ боковых):

$$\begin{cases} v_1 = \bigvee_{i=1}^{R} a_i f_i^1\left(x_1,...,x_{(n+p)}\right); \\ \quad \vdots \\ v_{(m+p)} = \bigvee_{i=1}^{R} a_i f_i^{(m+p)}\left(x_1,...,x_{(n+p)}\right). \end{cases} \tag{3.2}$$

Здесь $a_i = \bigwedge_{j=1}^{t} z_j^{\sigma_{i,j}}$, где $\sigma_{i,j} \in \{0,1\}$ ($j = 1,...,t$), $z_j^0 = \overline{z}_j$, $z_j^1 = z_j$, $t = \log_2 R$; $f_i^j$ – $i$-я функция алгебры логики ($i$ = 1, 2, …, $R$), реализуемая на $j$-м выходе автомата ($j$ = 1, 2, …, $m + p$); $x_1,...,x_{(n+p)}$ – информационные входы; $z_1,...,z_t$ – дополнительные входы, используемые для настройки автомата на требуемую структуру; $Q = \{\upsilon_1, \upsilon_2, ..., \upsilon_p\}$, где $\upsilon_i \in Z^k$, $i$ = 1, …, $p$, – шаблон соседства: каждый вектор $\upsilon_i \in V$ для автомата с координатами $\upsilon$ определяет автомат с координатами $\upsilon + \upsilon_i$, с $i$-м боковым выходным каналом которого соединен $i$-й боковой вход автомата в узле $\upsilon$, $i$ = 1, …, $p$.

Таким образом, постановка рассматриваемой задачи управления заключается в стабилизации регулируемой величины, с заданным качеством переходного процесса, при неполной информации об объекте управления и получении свойств автоматической системы регулирования, инвариантных к внешним возмущающим воздействиям, без введения в канал управления значений ошибки регулирования и ее производной, с конечным коэффициентом усиления обратной связи и возможностью перестройки внутренней структуры регулятора [8].

Результаты применения теории многофункциональных автоматов при разработке элементной базы для всевозможных устройств управления показали неоспоримые преимущества данного направления: сокращение типового состава элементной базы; расширение функциональных возможностей элементной базы; уменьшение сложности цифровых систем; сокращение объема резервных комплектов.

## 3.4. СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ПВС

Большинство устройств логического управления построено непосредственно по словесному описанию их работы без использования формализованных методов (автоматные таблицы, графы переходов и т.п.) и применяются лишь в некоторых наиболее сложных случаях, как правило, для построения и минимизации отдельных небольших подсистем.

Сложность описания при использовании упомянутых формализованных подходов определяется числом входов и состояний синтезируемого автомата и почти не зависит от сложности алгоритма и соответственно от сложности предстоящей схемной реализации. Так, размер таблицы состояний автомата, имеющего $n$ и содержащего $s$ триггеров, будет $2^n \cdot 2^s$, причем он одинаков как для самого простого, так и для самого сложного устройства.

Идеальным представляется случай, когда сложность описания алгоритма пропорциональна сложности его предстоящей реализации. Отметим, что логические формулы обладают именно таким свойством: число букв в них линейно связано с числом элементов, требующихся для реализации этих формул.

Высокая стоимость разработки топологии интегральных схем диктует необходимость применения повторяющихся модульных структур, т. е. небольшого числа разных типов простых элементов. Задача состоит в определении набора элементарных ячеек (МЛМ), реализуемых наиболее эффективно и позволяющих оптимально использовать потенциальные возможности технологии изготовления новых устройств [8].

### 3.4.1. ПЛИС

Программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС, англ. programmable logic device PLD) — электронный компонент, используемый для создания цифровых интегральных схем. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования (проектирования). Для программирования используются отладочные среды, позволяющие задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы. Альтернативой ПЛИС являются заказные БИС, которые существенно

дороже, и микроконтроллеры, которые из-за программного способа реализации алгоритмов медленнее ПЛИС.

ПЛИС широко используется для построения различных по сложности и возможностям цифровых устройств. Это приложения, где необходимо большое количество портов ввода-вывода (бывают ПЛИС с более чем 1000 выводов («пинов»)), цифровая обработка сигнала (ЦОС), цифровая видео-аудиоаппаратура, высокоскоростная передача данных, криптография, проектирование ASIC, в качестве мостов (коммутаторов) между системами с различной логикой и напряжением питания.

Основными современными типами ПЛИС являются CPLD и FPGA.

CPLD (англ. complex programmable logic device — сложные программируемые логические устройства) содержат относительно крупные программируемые логические блоки — макроячейки (англ. macrocells), соединённые с внешними выводами и внутренними шинами. Функциональность CPLD кодируется в энергонезависимой памяти, поэтому нет необходимости их перепрограммировать при включении.

FPGA (англ. field-programmable gate array) содержат блоки умножения - суммирования (DSP), которые широко применяются при обработке сигналов, а также логические элементы (как правило, на базе таблиц истинности) и их блоки коммутации. FPGA обычно используются для обработки сигналов, имеют больше логических элементов и более гибкую архитектуру, чем CPLD. Программа для FPGA хранится в распределённой памяти, которая может быть выполнена как на основе энергозависимых ячеек статического ОЗУ – в этом случае программа не сохраняется при исчезновении электропитания микросхемы, так и на основе энергонезависимых ячеек Flash-памяти или перемычек antifuse – в этих случаях программа сохраняется при исчезновении электропитания. Если программа хранится в энергозависимой памяти, то при каждом включении питания микросхемы необходимо заново конфигурировать ее при помощи начального загрузчика, который может быть встроен и в саму FPGA. Альтернативой ПЛИС FPGA являются более медленные цифровые процессоры обработки сигналов [11].

Одна микросхема ПЛИС, содержащая несколько миллионов логических вентилей, заменяет тысячи дискретных компонентов. На

рис. 3.7 архитектура ПЛИС показана в виде матрицы конфигурируемых логических блоков (configurable logic blocks – CLBs), окруженных горизонтальными и вертикальными линиями межсоединений. По периметру размещены блоки ввода-вывода (input/output blocks – IOBs). Состояние межсоединений и логических блоков определяется при конфигурировании, тем самым задается логика работы ПЛИС [10].

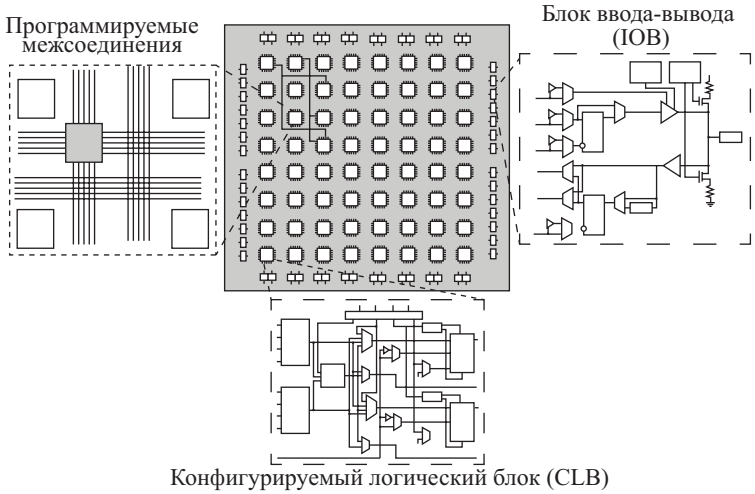


Рис. 3.7. Структура ПЛИС

ПЛИС можно сравнить с монтажной платой, на которой имеется огромное количество несоединенных блоков. На плате блоки соединяются при помощи проводов или проводящих дорожек. Физические соединения трудно изменять. В случае ПЛИС наличие или отсутствие соединения зависит от состояния полупроводникового элемента, которое контролируется программно. Таким образом, расположение соединений на ПЛИС определяется динамически при загрузке скомпилированного кода. Поскольку архитектура ПЛИС обеспечивает параллельность выполнения на аппаратном уровне, добавление параллельных контуров не снижает производительность системы.

Истинная параллельность — одно из главных преимуществ ПЛИС. На ПЛИС отсутствует операционная система и планировщик, делящий процессорное время между параллельными задачами. На

рис. 3.8 условно показана параллельная реализация вычислений на ПЛИС. Для вычисления выражений $(A + B)C$ и $X + Y + M$ используются независимые логические вентили.

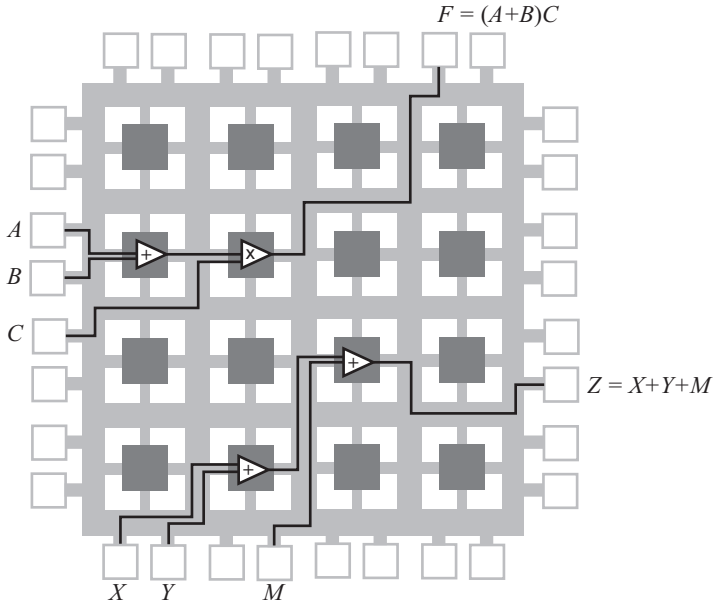


Рис. 3.8. Истинно параллельная реализация операций на ПЛИС

Трудностью в проектировании систем с использованием технологий интегральных схем зачастую становится необходимость освоения специализированных языков разработки БИС. Существует множество различных САПР электронных устройств и языков программирования, применяемых для конфигурирования структур на ПЛИС, но все они специфичны и довольно сложны в изучении. Именно сложность программирования ПЛИС привела к тому, что многие инженеры отказываются от использования данной технологии в приложениях измерений, автоматизации, управления и сбора данных [9].

Языки VHDL и Verilog (Verilog HDL) относятся к языкам описания аппаратуры. Они предназначены не для написания программ для FPGA и др. СБИС, а для проектирования логики самих этих устройств. Эти языки предназначены для моделирования электронных

схем на уровнях вентильном, регистровых передач, корпусов микросхем. Поэтому эти языки можно назвать языками сквозного функционально-логического проектирования.

Оба языка поддерживаются в качестве стандартов большим количеством программных продуктов, в том числе и open source, в области САПР. Имеются и компиляторы, и симуляторы для обоих языков, в том числе, например, и с первого языка на второй. Именно эти языки обычно используются при проектировании [11].

Основными производителями ПЛИС являются такие фирмы, как Atmel, Altera, Lattice semiconductor, Xilinx, Actel.

### 3.4.2. NI CompactRIO

Еще один способ реализации ПВС может быть предложен на интегрировании аппаратной платформы CompactRIO компании NI.

National Instruments CompactRIO представляет собой надежную промышленную компактную систему управления и сбора данных, возможности которой расширены благодаря ПЛИС технологии реконфигурируемого ввода/вывода (reconfigurable input/output – RIO). Продукты линейки CompactRIO отличаются высокой производительностью и гибкостью настройки, а также позволяют создавать пользовательские контрольно-измерительные системы [10].

NI CompactRIO (рис. 3.9) сочетает в себе процессор реального времени и реконфигурируемую ПЛИС, позволяющие создавать автономные встраиваемые и распределенные приложения, а также промышленные модули ввода/вывода со встроенным согласованием сигналов, возможностью прямого подключения датчиков и поддержкой горячего подключения.

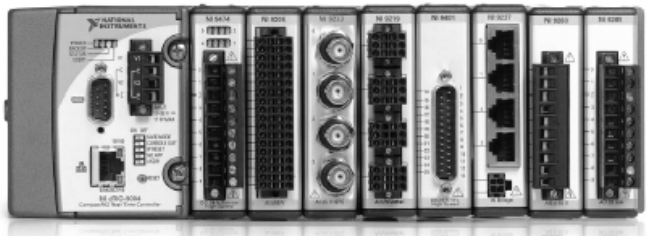

Рис. 3.9. Система NI CompactRIO

Платформа CompactRIO представляет собой недорогую архитектуру с открытым доступом к низкоуровневым аппаратным ресурсам. Системы на базе CompactRIO разрабатываются с использованием инструментов высокопроизводительной графической среды разработки приложений LabVIEW. Используя CompactRIO, становится возможным в кратчайшие сроки создавать контрольно-измерительные системы, способные конкурировать по производительности и оптимизации с оборудованием ведущих фирм [10].

*3.4.2.1. Области применения*

Возможность реконфигурирования CompactRIO особенно важна, поскольку гибкость платформы позволяет охватить широкий круг задач, от сбора и хранения данных и сложных алгоритмов анализа до высокоскоростного управления в масштабе наносекунд.

На основе CompactRIO могут быть созданы встраиваемые системы для таких задач, как бортовой сбор данных, шумовой и виброакустический анализ, управление оборудованием. Автономность CompactRIO оказывается востребованной во многих промышленных проектах.

Управление оборудованием:

- сборка/обработка — высокоскоростное управление перемещениями, управление периодическими процессами, дискретное управление;
- управление комплексным оборудованием — обработка сигналов в реальном времени и управление силовой электроникой и гидравлическими системами, приводами;
- полупроводниковая и биомедицинская промышленность – специфичное управление перемещениями и обработка изображений, контроль подачи сырья.

Мониторинг состояния оборудования:

- мониторинг состояния промышленного оборудования (турбины, двигатели, станки, вращающиеся механизмы) – анализ износа, контроль охлаждения и наличия смазки, отсутствия возгорания и т.д.;
- мобильные/портативные системы шумового и виброакустического анализа — анализ шумов, вибраций, динамический анализ сигналов;

- распределенный сбор данных — центральный контроллер с распределенными узлами ввода-вывода, подключенными по проводным или беспроводным сетям.

Портативные системы сбора данных:

- мобильные системы для проведения комплексных испытаний на ходу различных транспортных средств: самолетов, поездов, автомобилей, мотоциклов и т.д.;
- портативные системы сбора и анализа информации для применения в мобильных лабораториях и измерительных станциях.

Распределенные системы сбора данных:

- распределенный мониторинг, диагностика и управление технологическими процессами. Системы сбора данных объединены в проводные и беспроводные сети;
- распределенные системы, синхронизованные при помощи GPS.

Благодаря автономности, небольшому размеру и весу, а также возможности работать в жестких условиях, CompactRIO подходит практически для любой задачи, где требуется компактность и мобильность, так как сочетает в себе надежность встраиваемых систем и поддержку ряда промышленных сертификатов соответствия работе в жестких условиях. Системы на базе CompactRIO могут использоваться в диапазоне температур от -40 до +70 °С в потенциально опасном и взрывоопасном окружении (Class I, Div 2) и выдерживают ударные нагрузки до 50 g. Большинство модулей имеют изоляцию до 2300 В по напряжению. Каждый из компонентов поставляется вместе с набором международных сертификатов безопасности, электромагнитной совместимости (EMC) и рядом климатических и имеющих отношение к окружающей среде сертификатов. Более детально с промышленными сертификатами и спецификациями для устройств семейства CompactRIO можно ознакомиться в соответствующем руководстве по их использованию.

Линейка CompactRIO разработана для использования в жестких условиях и в ограниченном пространстве. В приложениях такого рода критическими параметрами являются размеры оборудования и его вес. Используя преимущества в производительности и размерах, предоставляемые устройствами ПЛИС, CompactRIO сочетает в ком-

пактном и сверхнадежном исполнении беспрецедентные возможности по управлению и сбору данных. Четырехслотовая система со встроенным контроллером реального времени обладает размерами 179,6 x 88,1 x 88,1 мм и весит 1,58 кг.

*3.4.2.2. Компоненты*

Металлическое многослотовое реконфигурируемое шасси, показанное на рис. 3.10, включает ядро ПЛИС с одним или тремя миллионами вентилей, слоты для контроллера и модулей ввода-вывода, а также шину PCI для передачи данных между ПЛИС и контроллером реального времени.

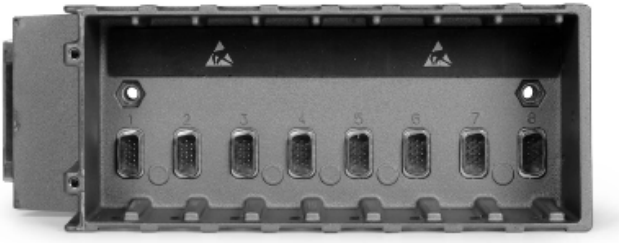


Рис. 3.10. Шасси NI CompactRIO

Логика, функции ввода-вывода, тактирование, триггеринг и синхронизация реализуются в ПЛИС на аппаратном уровне и полностью определяются пользователем при конфигурировании. Микросхема ПЛИС в такой системе расположена внутри шасси, служащего для установки модулей ввода/вывода, и соединена с ними по топологии звезда, что обеспечивает возможность прямого доступа к каждому из модулей, как показано на рис. 3.11. Модули ввода-вывода содержат встроенные средства предварительной обработки сигналов, преобразователи ЦАП или АЦП, иногда контуры изоляции. Данные между ПЛИС и модулями передаются в цифровом виде [9].

На шасси может быть установлен контроллер реального времени с промышленным процессором, поддерживающим вычисления с плавающей точкой (рис. 3.12). Контроллер имеет порт Ehternet 10/100 Мбит/с и встроенные Web (HTTP) и FTP-серверы. На контроллере также имеется последовательный порт, дублированный вход питания 11 – 30 В постоянного тока, пользовательский DIP-

переключатель и светодиод, таймер реального времени и программируемый сторожевой таймер.

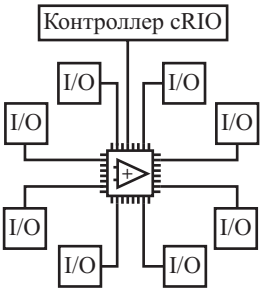


Рис. 3.11. Топология соединений

Рис. 3.12. Контроллер NI CompactRIO

В табл. 3.2 указаны типичные объемы памяти контроллеров. Энергонезависимая память предназначена для долговременного хранения данных и самого приложения. Динамическая оперативная память (DRAM) используется программным модулем LabVIEW Real-Time во время выполнения приложения. Поскольку оперативная память намного быстрее энергонезависимой, в ней находится копия запущенного приложения. В оперативной памяти также находятся переменные, массивы и другие данные, а также частично операцион-

ная система и программный модуль LabVIEW Real-Time. Когда контроллер отключают от питания, все содержание оперативной памяти теряется.

Таблица 3.2

**Объемы памяти микроконтроллеров**

| Контроллер | Энергозависимая память, Мб | Оперативная память DRAM, Мб |
|---|---|---|
| N19002 | 64 | 32 |
| N19004 | 512 | 64 |
| N19012 | 128 | 64 |

К модулям ввода-вывода CompactRIO подключаются внешние устройства, например датчики или приводы (рис. 3.13). Сами модули напрямую подключаются к ПЛИС. Данные из ПЛИС передаются на контроллер реального времени по встроенной шине PCI.

- Модули ввода-вывода CompactRIO соединяются с внешним устройством при помощи винтовых терминалов, разъемов BNC или DSUB, которыми для упрощения подключения комплектуются все модули. Модули ввода-вывода изображены на рис. 3.14. Датчики и приводы обычно подключаются напрямую, так как модули поддерживают широкий диапазон входных напряжений и других сигналов. Контуры предварительной обработки сигналов находятся между входами и преобразователями АЦП, ЦАП и контурами цифрового ввода-вывода.

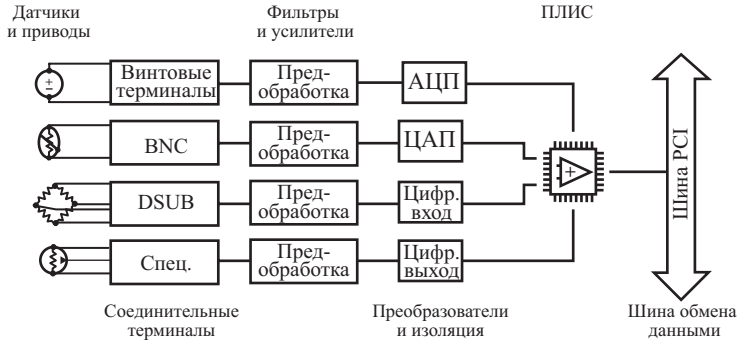


Рис. 3.13. Модульная архитектура ввода-вывода

Рис. 3.14. Модули ввода-вывода

Существует множество различных модулей ввода-вывода National Instruments и других производителей. Ниже перечислены некоторые типы модулей:

- модули ввода с термопар ±80 мВ;
- многоканальные модули синхронного аналогового ввода-вывода ±10 В;
- промышленные модули цифрового ввода-вывода: 24 В, ток до 1 А;
- дифференциальные/TTL модули цифрового ввода с регулируемым выходом питания (5 В) для датчиков положения;
- универсальные модули цифрового ввода 250 В.

## 3.5. СРЕДСТВА ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПВС

Рассмотренная в разд. 3.4.2 аппаратная платформа функционирует совместно с программным комплексом LabVIEW. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – среда разработки лабораторных виртуальных приборов) является средой программирования, с помощью которой можно создавать приложения, используя графическое представление всех элементов алгоритма, что отличает ее от обычных языков программирования, таких как C, C++ или Java, где программируют, используя текст [7]. Однако LabVIEW представляет собой значительно больше, чем просто алгоритмический язык. Это среда разработки и исполнения приложений, предназначенная для исследователей – ученых и инженеров, для которых программирование является лишь частью работы. LabVIEW функ-

ционирует на компьютерах, работающих под управлением всех распространенных операционных систем: Windows, MacOS, Linux, Solaris и HP-UX.

Мощный графический язык программирования LabVIEW позволяет в сотни раз увеличить производительность труда. Создание законченного приложения с помощью обычных языков программирования может отнять очень много времени – недели или месяцы, тогда как с LabVIEW требуется лишь несколько часов, поскольку пакет специально разработан для программирования различных измерений, анализа данных и оформления результатов. Так как LabVIEW имеет гибкий графический интерфейс и прост для программирования, он также отлично подходит для моделирования процессов, презентации идей, создания приложений общего характера и просто для обучения современному программированию.

Измерительная система, созданная в LabVIEW, имеет большую гибкость по сравнению со стандартным лабораторным прибором, потому что она использует многообразие возможностей современного программного обеспечения. И именно проектировщик, а не изготовитель оборудования определяет функциональность создаваемого прибора. Компьютер, снабженный встраиваемой измерительно-управляющей аппаратной частью, и LabVIEW составляют полностью настраиваемый виртуальный прибор для выполнения поставленных задач. С помощью LabVIEW допустимо создать необходимый тип виртуального прибора при очень малых затратах по сравнению с обычными инструментами. При необходимости можно внести в него изменения буквально за минуты.

LabVIEW создан для облегчения работы по программированию задач. Для этой цели имеется расширенная библиотека функций и готовых к использованию подпрограмм, которые реализуют большое число типичных задач программирования и тем самым избавляют от рутинной работы с указателями, распределением памяти и прочего, присущего традиционным языкам программирования. В LabVIEW также содержатся специальные библиотеки виртуальных приборов для ввода/вывода данных со встраиваемых аппаратных средств (data acquisition – DAQ), для работы с каналом общего пользования (КОП, General Purposes Interface Bus – GPIB), для управления устройствами через последовательный порт RS-232, программные компоненты для анализа, представления и сохранения данных, взаимодействия через

сети Internet. Библиотека анализа (Analysis) содержит множество полезных функций, включая генерирование сигнала, его обработку, различные фильтры, окна, статистическую обработку, регрессионный анализ, линейную алгебру и арифметику массивов.

Приложения, созданные на LabVIEW, качественно улучшают работу во многих сферах деятельности человека – как в автоматизации технологических процессов, так и в биологии, сельском хозяйстве, химии, физике, образовании и множестве других.

### 3.5.1. Графическое программирование

Разработка приложений в среде LabVIEW отличается от работы в средах на основе C или Java одной очень важной особенностью. Если в традиционных алгоритмических языках программирование основано на вводе текстовых команд, последовательно образующих программный код, в LabVIEW используется язык графического программирования, где алгоритм создается в графической иконной форме (pictorial form), образующей так называемую блок-диаграмму (block-diagram), что позволяет исключить множество синтаксических деталей.

В LabVIEW используется терминология, рисунки иконок и основные идеи, знакомые ученым и инженерам. Этот язык базируется на графических символах, а не на тексте для описания программируемых действий. Основополагающий для LabVIEW принцип потока данных (dataflow), согласно которому функции выполняются лишь тогда, когда они получают на вход необходимые данные, однозначно определяет порядок исполнения алгоритма.

Программы LabVIEW называются виртуальными приборами (ВП, virtual intruments – VI), так как они функционально и внешне подобны реальным (традиционным) приборам. Однако они столь же подобны программам и функциям на популярных языках программирования, таких как C или Basic. Здесь и далее мы будем называть программы LabVIEW виртуальными приборами причем вне зависимости от того, соотносится их вид и поведение с реальными приборами или нет.

Виртуальный прибор состоит из двух основных частей:

– лицевая панель (Front Panel) представляет собой интерактивный пользовательский интерфейс виртуального прибора и названа так потому, что имитирует лицевую панель традиционного прибора. На

ней могут находиться ручки управления, кнопки, графические индикаторы и другие элементы управления (controls), которые являются средствами ввода данных со стороны пользователя, а элементы индикации (indicators) — выходные данные из программы. Пользователь вводит данные, используя мышь и клавиатуру, а затем видит результаты действия программы на экране монитора;

– блок-диаграмма (Block Diagram) является исходным программным кодом ВП, созданным на языке графического программирования LabVIEW, G (Джей). Блок-диаграмма представляет собой реально исполняемое приложение. Компонентами блок-диаграммы являются: виртуальные приборы более низкого уровня, встроенные функции LabVIEW, константы и структуры управления выполнением программы. Для того чтобы задать поток данных между определенными объектами или, что то же самое, создать связь между ними, нужно нарисовать соответствующие проводники (wires). Объекты на лицевой панели представлены на блок-диаграмме в виде соответствующих терминалов (terminals), через которые данные могут поступать от пользователя в программу и обратно.

Лицевая панель и блок-диаграмма ВП представлены на рис. 3.15 и 3.16 соответственно.

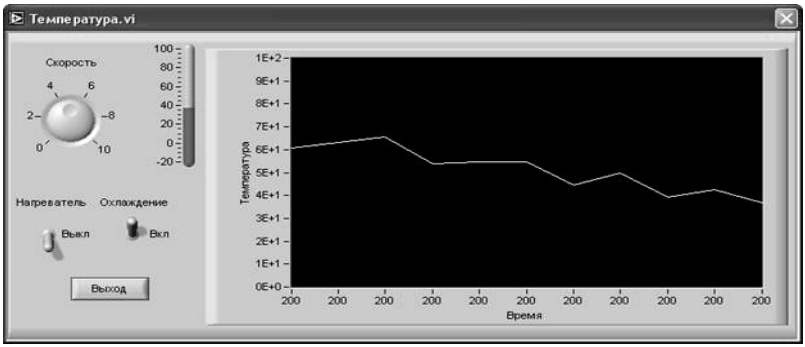


Рис. 3.15. Лицевая панель ВП

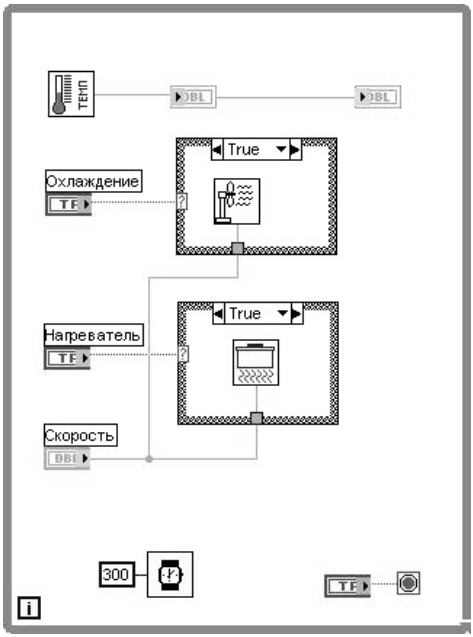


Рис. 3.16. Блок-диаграмма ВП

Для того чтобы использовать некоторый ВП в качестве подпрограммы (подприбора) в блок-диаграмме другого ВП, необходимо определить его иконку (icon) и соединительную панель (connector). Виртуальный прибор, который применяется внутри другого ВП, называется, виртуальным подприбором (ВПП, SubVI), который аналогичен подпрограмме в традиционных алгоритмических языках. Иконка является однозначным графическим представлением ВП и может использоваться в качестве объекта на блок-диаграмме другого ВП. Соединительная панель представляет собой механизм передачи данных в ВП из другой блок-диаграммы, когда он применяется в качестве подприбора – ВПП. Подобно аргументам и параметрам подпрограммы, соединительная панель определяет входные и выходные данные виртуального прибора.

Виртуальные приборы являются иерархическими и модульными (modular). Можно использовать их как самостоятельные приложения (top-level programs), так и в качестве виртуальных подприборов.

Согласно этой логике LabVIEW следует концепции модульного программирования (modular programming). Вначале необходимо разделить большую прикладную задачу на ряд простых подзадач. Далее создать виртуальные приборы для выполнения каждой из подзадач, а затем объединить эти ВП на блок-диаграмме прибора более высокого уровня, который выполняет прикладную задачу в целом.

### 3.5.2. Программирование логики ПЛИС в LabVIEW

ПЛИС является аппаратной средой для выполнения приложений LabVIEW. Для задания логики работы ПЛИС вместо специализированного языка VHDL используются виртуальные приборы LabVIEW. Пакет LabVIEW FPGA Module позволяет создавать программы с синхронными и асинхронными параллельными циклами, выполняющимися на аппаратном уровне и обеспечивающими детерминированный по времени сбор и анализ данных.

Программный пакет LabVIEW FPGA Module полностью берет на себя многоступенчатый процесс преобразования виртуального прибора LabVIEW в бинарный код ПЛИС. Сначала виртуальный прибор конвертируется в текстовый код на языке VHDL. Затем код VHDL компилируется стандартным промышленным компилятором Xilinx ISE в бинарный код ПЛИС. В процессе компиляции происходит оптимизация кода по скорости выполнения и по задействованным ресурсам ПЛИС.

Результатом компиляции является бинарный файл (bitstream file), полностью определяющий конфигурацию ПЛИС. При запуске приложения бинарный файл загружается на ПЛИС, т. е. происходит процесс конфигурирования ПЛИС. Бинарный файл может записываться во встроенную флеш-память и автоматически загружаться на ПЛИС при включении системы. На ПЛИС отсутствует операционная система как таковая. Тем не менее на ПЛИС реализуется логика, позволяющая запускать и останавливать выполнение кода.

Когда запускается FPGA VI или выполняется команда Build (собрать) из меню Tools, блок-диаграмма виртуального прибора конвертируется в промежуточные файлы, которые затем передаются на сервер компиляции (рис. 3.17). Сервер возвращает бинарный файл в среду разработки LabVIEW, где он сохраняется вместе с виртуальным

прибором. Конечный бинарный файл уникален для каждого устройства ПЛИС. Виртуальный прибор может быть скомпилирован для нескольких устройств ПЛИС, при этом все бинарные файлы будут сохранены вместе с виртуальным прибором. Бинарный файл загружается на ПЛИС автоматически при нажатии на кнопку Run.

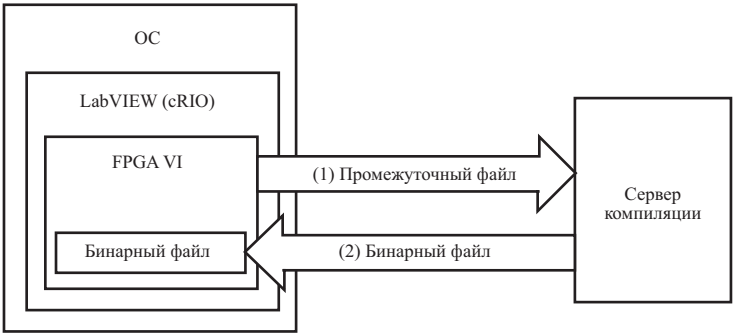


Рис. 3.17. Процесс компиляции

При отключении питания конфигурация ПЛИС не сохраняется. После включения системы бинарный файл должен быть загружен заново. При соответствующей настройке бинарный файл может загружаться автоматически из флеш-памяти устройства ПЛИС или программно, при помощи контроллера. Одно из преимуществ загрузки из флеш-памяти — быстрый запуск после включения питания, так ПЛИС может не ждать загрузки контроллера.

Виртуальные приборы FPGA VI могут выполняться полностью независимо от других компонентов системы и сохранять работоспособность даже при сбое контроллера. Более того, на ПЛИС может быть организован буфер, который предотвратит потерю данных в случае сбоя контроллера.

## 3.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ LABVIEW

### 3.6.1. Моделирование перестраиваемых автоматов

В практике проектирования и моделирования используется множество моделей и языков, описывающих поведение дискретных

систем. Среди признанных методов исследования сложных систем особое место занимает имитационное моделирование.

На данном этапе работы необходимо создать модель структуры М-автомата в среде графического программирования LabVIEW в FPGA Module, чтобы в дальнейшем использовать возможности логических операций и преобразований ПЛИС.

Для этого первоначально необходимо сконфигурировать проект, добавить в него целевое устройство CompactRIO, включив его в список удаленных устройств и назначив для него соответствующие настройки, затем добавить узлы ввода-вывода ПЛИС. LabVIEW предоставляет возможность разрабатывать приложения для системы CompactRIO, не имея в наличии самого оборудования. Так как реальное устройство отсутствует, в данной работе используем его имитационную модель. Затем нужно создать новый FPGA ВП в проекте LabVIEW таким образом, чтобы созданный FPGA ВП располагался в иерархии целевого устройства ПЛИС. После добавления в проект нового ВП появляется лицевая панель и блок-диаграмма, которая на данном этапе пуста, а также палитры функций, посредством которых созданный ВП будет наполняться функциональностью.

Первым делом реализуем структуру перестраиваемого автомата М-структуры. Автомат имеет три настроечных входа – $z_1$, $z_2$ и $z_3$; три информационных входа – $x$, $y_1$ и $y_2$; два выхода – $f_1$ и $f_2$, а состоит из двадцати логических элементов: девяти элементов, реализующих функцию ИЛИ, и одиннадцати элементов, реализующих функцию И. Его структурная схема представлена на рис. 3.18.

Структура М-автомата описывается следующей системой булевых формул:

$$\begin{cases} f_1 = y_1\left(\overline{z_1}z_2 \vee z_3\right)\left(z_1 \vee \overline{z_2} \vee \overline{z_3}\right) \vee \left(y_1 \vee z_1 \vee z_2\right)x\overline{z_3} \vee y_2\overline{z_1}z_2z_3; \\ f_2 = \left(y_1z_1 \vee x\overline{z_1}z_3\right)z_2\left(z_1 \vee \overline{z_2} \vee \overline{z_3}\right) \vee \\ \quad \vee\left[y_1 \vee \left(\overline{z_1} \vee z_2\right)\left(z_1 \vee \overline{z_2} \vee \overline{z_3}\right)\right]\left(y_2 \vee \overline{z_1}z_2z_3\right). \end{cases} \tag{3.3}$$

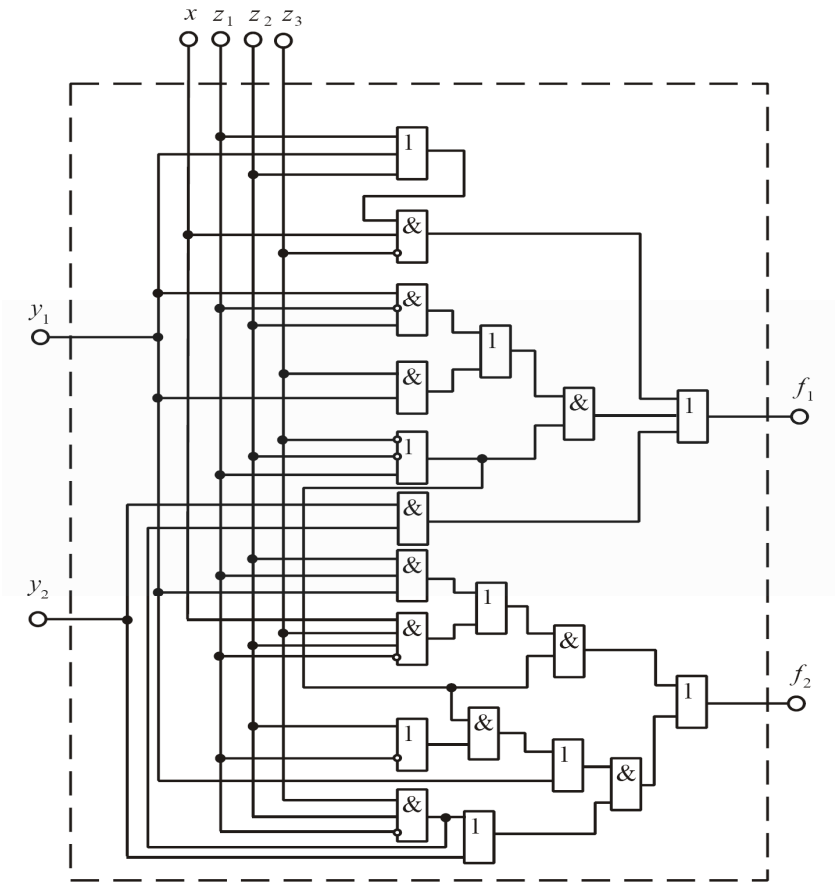


Рис. 3.18. Ячейка М-структуры

Ячейка путём настройки реализует автоматные отображения, изображенные на рис. 3.19, которые описываются следующими системами формул:

а) при $z_1 = 0$, $z_2 = 0$, $z_3 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = y_1 x, \\ f_2 = y_2; \end{cases}$$

б) при $z_1 = 0$, $z_2 = 0$, $z_3 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = y_2; \end{cases}$$

в) при $z_1 = 0$, $z_2 = 1$, $z_3 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = y_1 \vee x, \\ f_2 = y_2; \end{cases}$$

г) при $z_1 = 0$, $z_2 = 1$, $z_3 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = y_2, \\ f_2 = y_1; \end{cases}$$

д) при $z_1 = 1$, $z_2 = 0$, $z_3 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1 y_2; \end{cases}$$

е) при $z_1 = 1$, $z_2 = 0$, $z_3 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = y_1 y_2; \end{cases}$$

ж) при $z_1 = 1$, $z_2 = 1$, $z_3 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1 \vee y_2; \end{cases}$$

з) при $z_1 = 1$, $z_2 = 1$, $z_3 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = y_1 \vee y_2. \end{cases}$$

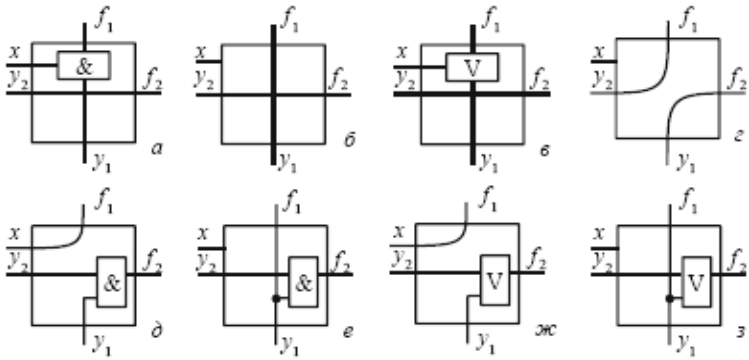


Рис. 3.19. Структурные схемы, полученные путём настройки

Воспроизведем ячейку М-автомата, изображенную на рис. 3.18, на блок-диаграмме ВП посредством палитры логических функций FPGA Module. Настроим соответствующие связи между логическими элементами, назначим регулирующие и отображающие органы для информационных и настроечных входов и выходов ячейки. Блок-диаграмма полученного виртуального прибора представлена на рис. 3.20.

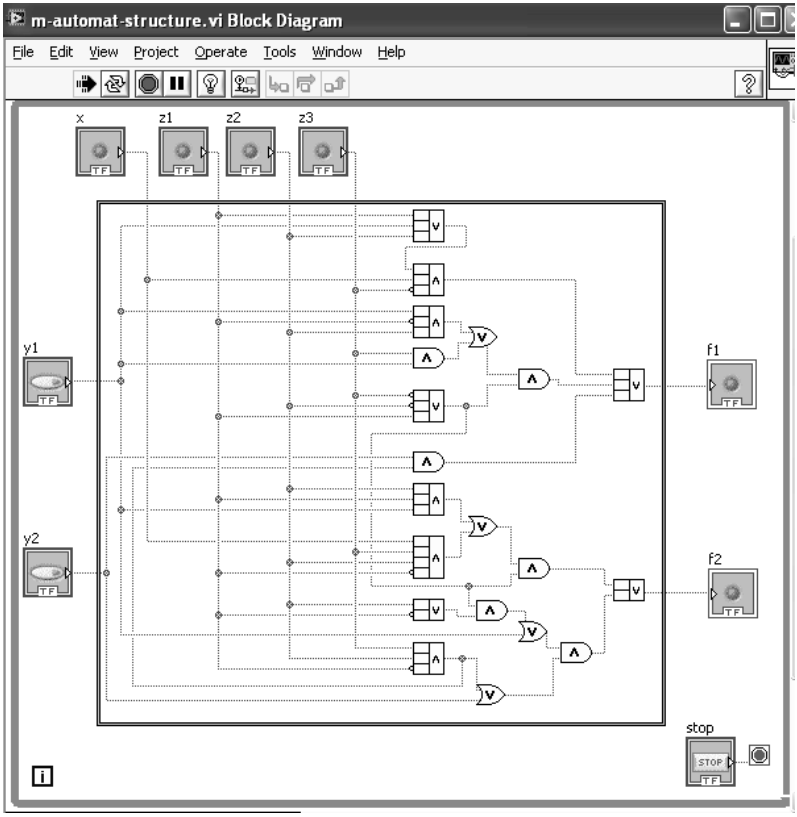


Рис. 3.20. Блок-диаграмма ВП ячейки М-автомата

Настроим лицевую панель ВП посредством палитры функций – создадим интерфейс пользователя. Внутреннее устройство автомата для удобства скроем, оставив линии входов, настроечных и информационных, сигналы которых изменяются путем нажатия в диапазоне (0,1), выходные сигналы автомата изменяются соответственно в том же диапазоне. Лицевая панель виртуального прибора представлена на рис. 3.21.

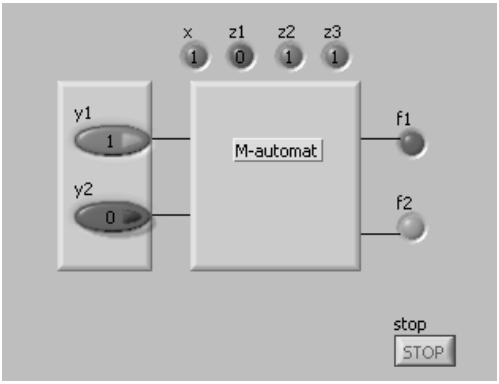


Рис. 3.21. Лицевая панель ВП ячейки М-автомата

Для проверки работы М-структуры подаём на входы различные сигналы и смотрим значения выходных сигналов, изменяя значения настроечного кода. Результаты проверки работы автомата представлены в табл. 3.3, из которой видно, что полученные значения выходных сигналов при соответствующих входных сигналах и настроечных кодах обеспечивают решение системы (3.3) при тех же значениях.

Таблица 3.3

**Таблица значений функций $f_1$ и $f_2$ при разных значениях входных сигналов и настроечных кодов**

| z1, z2 ,z3 | x, y1 ,y2 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 000 | 001 | 010 | 011 | 100 | 101 | 110 | 111 |
| | f1, f2 | f1, f2 | f1, f2 | f1, f2 | f1, f2 | f1, f2 | f1, f2 | f1, f2 |
| 000 | 00 | 01 | 00 | 01 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 001 | 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 010 | 00 | 01 | 10 | 11 | 10 | 11 | 10 | 11 |
| 011 | 00 | 10 | 01 | 11 | 00 | 10 | 01 | 11 |
| 100 | 00 | 00 | 00 | 01 | 10 | 10 | 10 | 11 |
| 101 | 00 | 00 | 10 | 11 | 00 | 00 | 10 | 11 |
| 110 | 00 | 01 | 01 | 01 | 10 | 11 | 11 | 11 |
| 111 | 00 | 01 | 11 | 11 | 00 | 01 | 11 | 11 |

### 3.6.2. Моделирование однородной перестраиваемой вычислительной среды на базе М-автомата

Рассмотрим систему автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 3.22.

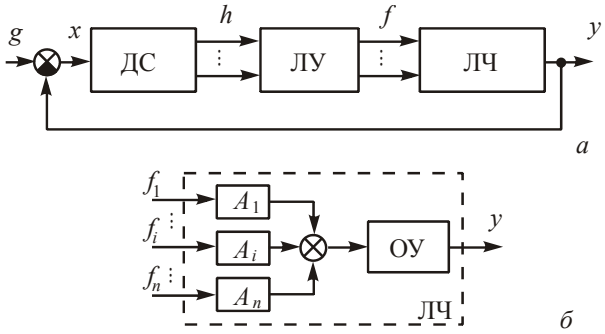


Рис. 3.22. Структурная схема: ЛЧ – линейная часть; ЛУ – логическое устройство (однородная вычислительная среда); ДС – детектор состояния; ОУ – объект управления; $A_i$ – заданный класс динамических корректирующих звеньев ($i$ = 1,2,...,$n$)

ОУ представлен в виде

$$W_{об}(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{k}{Tp+1}, \tag{3.4}$$

где $T$ – постоянная времени объекта управления.

Динамику рассматриваемого класса систем (рис. 3.22) относительно ошибки регулирования, когда $n$ = 2, можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -a_2 x_2(t) - a_1 \Psi, \end{aligned}\right\} \; a_i > 0, \; (i = 1,2), \tag{3.5}$$

$$\Psi = \alpha f_1 + \beta f_2, \quad f_i \in [0,1], \; (i = 1,2),$$

где $x_1$, $x_2$ – фазовые координаты; $a_i$, α, β – постоянные коэффициенты; Ψ – разрывной коэффициент.

Величины $f_i$ могут принимать значения либо «0», либо «1» и формируются однородной вычислительной средой (рис. 3.23) на основе информации о знаке $x_1(t)$ и о знаке линейной комбинации $x_1(t)$ и $x_2(t)$ по формулам:

при $h_2h_4 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = a, \\ f_2 = b, \end{cases}$$

при $h_2h_4 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = b, \\ f_2 = a. \end{cases}$$

Здесь

$$a = h_1h_3 \vee h_2h_4, \;\; b = h_2h_3 \vee h_1h_4;$$

$$\overline{h}_1 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(x_1) - 1), \;\; \overline{h}_2 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(x_1) + 1);$$

$$\overline{h}_3 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(s) - 1), \;\; \overline{h}_4 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(s) + 1);$$

$$s = x_2(t) + c\,x_1(t)\,, \tag{3.6}$$

где $h_j$ ($j = 1, 2, \ldots, 4$) – входные переменные ОС; $s$ – прямая переключения; $\mathrm{sgn}(A)$ – функция от аргумента $A$, принимающая следующие значения:

$$\mathrm{sgn}(A) = \begin{cases} 1 \text{ при } A > 0, \\ 0 \text{ при } A = 0, \\ -1 \text{ при } A < 0. \end{cases}$$

Величину $\Psi$ можно представить в виде

$$\Psi = \begin{cases} \alpha \text{ при } s > 0,\ x_1 > 0, \\ \beta \text{ при } s < 0. \end{cases} \tag{3.7}$$

Вычислительная среда представляет собой матрицу размером $m \times n$ ($m = 6$ – количество строк, $n = 7$ – количество столбцов), образованную коллективом вычислителей на основе $M$-автоматов (см. рис. 3.18). Она построена из таких требований, что на ПВС должна одновременно поступать необходимая информация о параметрах процесса ($h_k$, $k = 1, 2, \ldots, 4$), а также в зависимости от состояния всей системы управления ПВС должна обеспечить изменение

алгоритма управления в процессе работы системы (без ее остановки – динамическая реконфигурация).

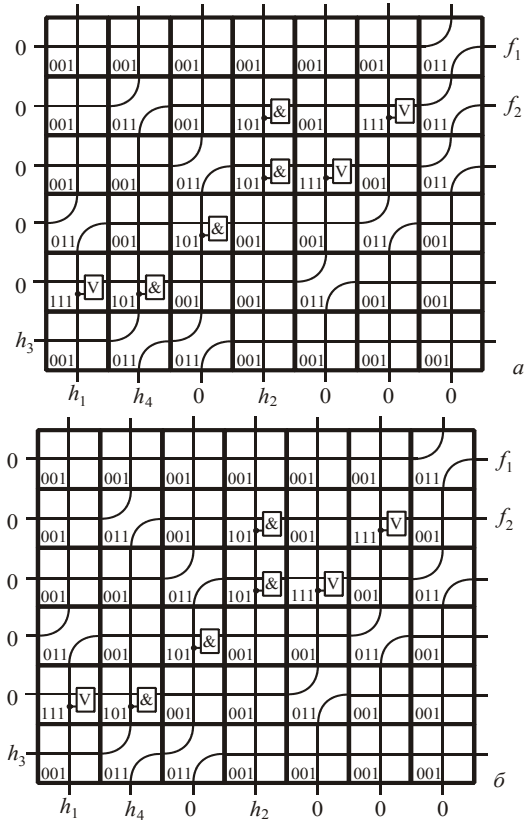


Рис. 3.23. Однородная вычислительная среда на базе М-автомата

Создадим в проекте в иерархии устройства ПЛИС новый ВП. Используя ранее созданную структуру М-автомата, создадим виртуальный подприбор в виде иконки прибора с контактами входов и выходов. Составим однородную вычислительную среду, подобно рис. 3.23, помещая в узлах решетки ВПП М-структуры и соединяя их между собой определенным образом с помощью линий связи. Поместим соответствующие регулирующие и отображающие органы для

входов и выходов вычислительной среды. Фрагмент блок-диаграммы ВП вычислительной среды представлен на рис. 3.24.

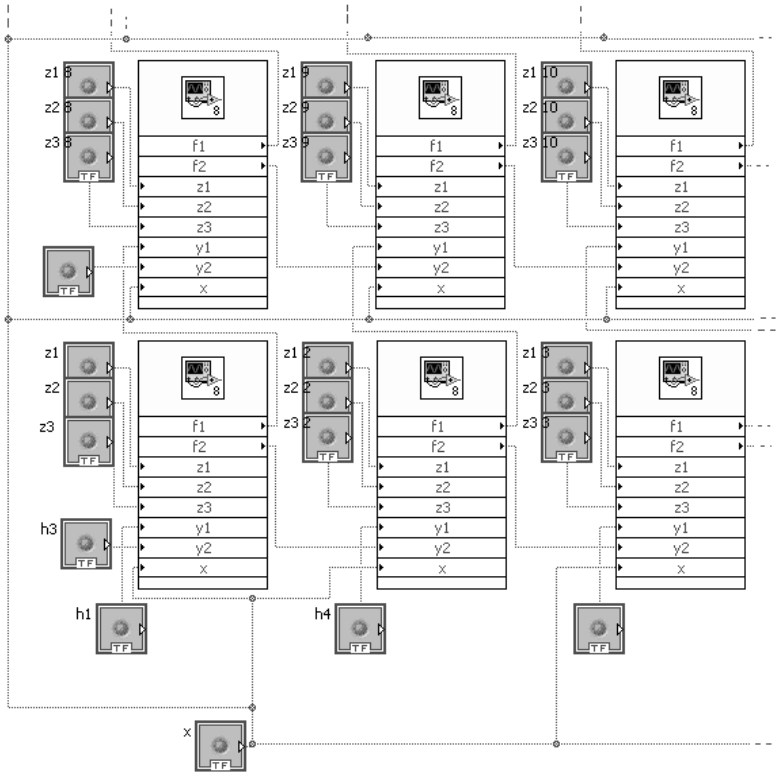


Рис. 3.24. Фрагмент блок-диаграммы ВП ПВС

Создадим для ВП лицевую панель в виде блока ячеек с настроечными кнопками для каждой ячейки, путем нажатия которых изменяются структурные схемы автоматов, составляющих вычислительный блок, непосредственно во время рабочего режима, и линиями входных сигналов $h_1$, $h_2$, $h_3$ и $h_4$, которые являются информационными сигналами о состоянии системы, и выходных сигналов $f_1$ и $f_2$. Лицевая панель ВП вычислительной среды представлена на рис. 3.25.

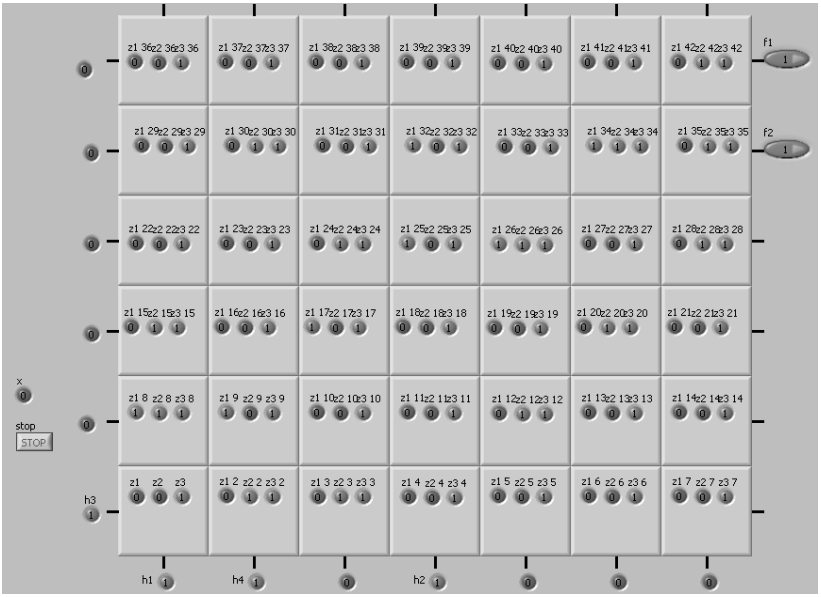


Рис. 3.25. Лицевая панель ВП ПВС

В табл. 3.4 приведены значения выходных сигналов $f_1$ и $f_2$ однородной вычислительной среды в зависимости от значений входных сигналов $h_1$, $h_2$, $h_3$ и $h_4$.

Таблица 3.4

**Таблица истинности однородной вычислительной среды на базе М-автоматов**

| Вход/ выход | Значение | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $h_1$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $h_2$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $h_3$ | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| $h_4$ | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| f1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| f2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Данная ПВС имеет свойство бесконечной наращиваемости. Во-первых, в плане расширения коллектива вычислительных блоков, что

в итоге обеспечит высокую надежность и возможность реализовывать сколь угодно сложные логические вычисления выходных величин ПВС путем настройки. Надежность повышается за счет избыточности элементов, и в случае неисправности какого-либо узла передать сигнал, обойдя неисправный узел, не составит сложности. Во-вторых, сколь угодное увеличение количества входных информационных и выходных сигналов предоставляет возможность использовать данную ПВС в системах управления СПС любой сложности, организовывая сложнейшие логические операции над входными переменными состояния системы, делая их непересекающимися, если это необходимо.

Созданную в LabVIEW FPGA Module ПВС можно использовать для построения реальных систем управления СПС на базе платформы CompactRIO в качестве переключающего элемента законов управления в составе устройства управления системы в любое время. Для этого необходимо создать потоки данных между входами, выходами ПВС и входами, выходами реальных частей проектируемой системы управления в среде LabVIEW.

## 3.7. СТРУКТУРНО-ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ КОРРЕЛЯТОР

### 3.7.1. Получение формул для умножения двоичных чисел

Зададимся двумя трехразрядными числами $a_1a_2a_3$ и $b_1b_2b_3$, где $a_1$ и $b_1$ – старшие разряды. В результате умножения этих чисел получим число $c_6c_5c_4c_3c_2c_1$, где $c_6$ – старший разряд. Тогда для разрядов числа результата справедливы соотношения:

$$c_2 = a_2b_3 \oplus a_3b_2;$$

$$c_3 = y_3 \oplus a_3b_1; \tag{3.8}$$

$$c_4 = y_4 \oplus a_2b_1 \oplus y_3a_3b_1;$$

$$c_5 = y_5 \oplus a_1b_1 \oplus \left[\left(y_4 \oplus a_2b_1\right)y_3a_3b_1 \vee y_4a_2b_1\right];$$

$$c_6 = \left[\left(y_5 \oplus a_1b_1\right)\left(\left(y_4 \oplus a_2b_1\right)y_3a_3b_1 \vee y_4a_2b_1\right)\right] \vee y_5a_1b_1,$$

где $y_3 = a_1b_3 \oplus a_2b_2 \oplus a_2b_3a_3b_2$, $y_4 = a_1b_2 \oplus \left[(a_1b_3 \oplus a_2b_2)a_2b_3a_3b_2 \vee \right.$ $\left. \vee a_1b_3a_2b_2\right]$, $y_5 = a_1b_2\left[(a_1b_3 \oplus a_2b_2)a_2b_3a_3b_2 \vee a_1b_3a_2b_2\right]$

### 3.7.2. Выбор ячейки однородной среды

При помощи ячейки однородной среды необходимо реализовать следующие формулы:

$$c_1 = a_3b_3\,;$$

$$c_3 = \overline{a_1}a_2\overline{a_3}b_2 \vee \overline{a_1}a_3b_1b_3 \vee a_1\overline{a_2}\,\overline{a_3}b_3 \vee \overline{a_2}a_3b_2\overline{b_3} \vee \overline{a_2}a_3b_1\overline{b_3} \vee a_1\overline{a_3}\,\overline{b_2}b_3 \vee$$
$$\vee a_2\overline{a_3}b_2\overline{b_3} \vee a_2\overline{b_1}b_2\overline{b_3} \vee a_1a_3\overline{b_1}b_3 \vee a_3b_1\overline{b_2}\,\overline{b_3}\,;$$

$$c_4 = \overline{a_1}a_2\overline{a_3}b_1 \vee \overline{a_1}a_2a_3\overline{b_1}b_2b_3 \vee \overline{a_1}a_2b_1\overline{b_2} \vee a_1\overline{a_2}\,\overline{a_3}b_2 \vee a_1\overline{a_2}\,\overline{b_1}b_2 \vee$$
$$\vee a_1\overline{a_2}a_3b_1\overline{b_2}b_3 \vee a_2\overline{a_3}b_1\overline{b_2} \vee a_2\overline{a_3}b_1b_3 \vee a_1\overline{b_1}b_2\overline{b_3} \vee a_2b_1\overline{b_2}\,\overline{b_3} \vee a_1a_3b_2\overline{b_3}\,;$$

$$c_5 = \overline{a_1}a_2a_3b_1b_2 \vee a_1\overline{a_2}\,\overline{a_3}b_1 \vee a_1\overline{a_2}b_1\overline{b_2} \vee a_1\overline{a_2}b_1\overline{b_3} \vee a_1\overline{a_3}b_1\overline{b_2} \vee$$
$$\vee a_1a_2\overline{b_1}b_2b_3 \vee a_1b_1\overline{b_2}\,\overline{b_3} \vee a_2a_3b_1b_2b_3\,;$$

$$c_6 = a_1a_3b_1b_2b_3 \vee a_1a_2a_3b_1b_3 \vee a_1a_2b_1b_2\,.$$

Ячейка (рис. 3.26) реализует класс бесповторных упорядоченных произвольных нормальных формул из $h$ букв, системы булевых формул из $h$ букв, а также системы булевых формул как с пропусками аргументов, так и без них.

Ячейка путем настройки реализует следующие виды формул [8]:

1) при $z_4 = 0$, $z_3 = 0$, $z_2 = 0$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1y_2, \\ f_3 = y_3; \end{cases}$$

2) при $z_4 = 0$, $z_3 = 0$, $z_2 = 1$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = x \vee y_1, \\ f_2 = y_2, \\ f_3 = xy_3; \end{cases}$$

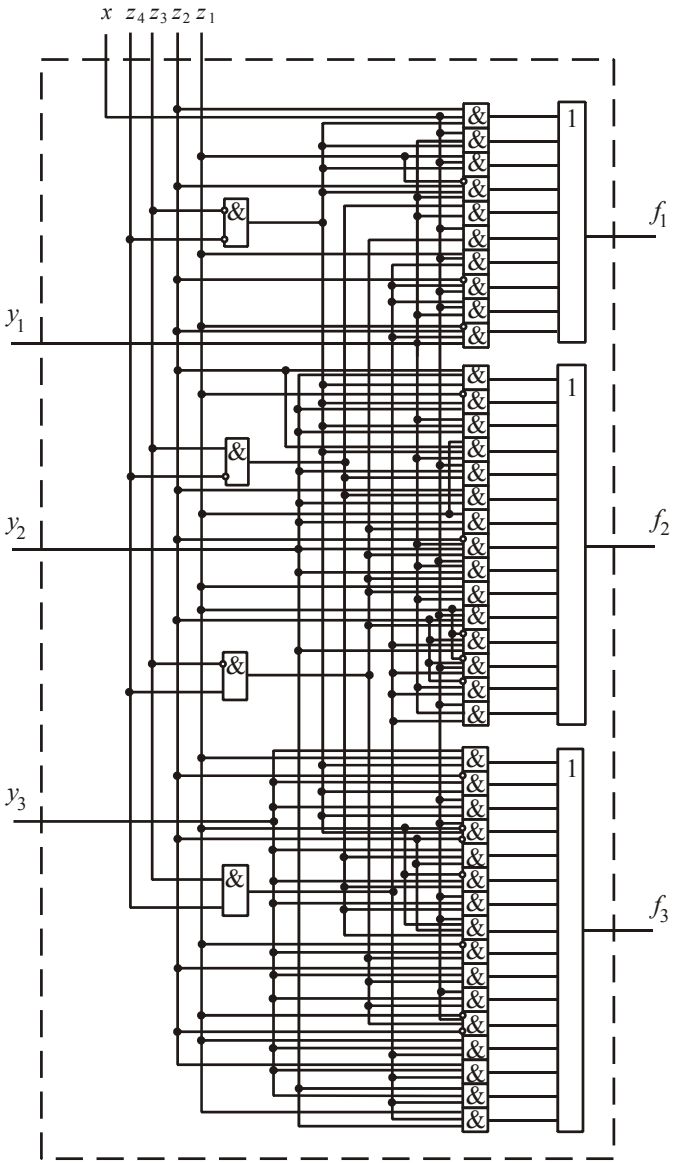


Рис. 3.26. Ячейка *V*-структуры

3) при $z_4 = 0$, $z_3 = 0$, $z_2 = 1$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1 \vee y_2, \\ f_3 = y_3; \end{cases}$$

4) при $z_4 = 0$, $z_3 = 1$, $z_2 = 0$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = xy_2, \\ f_3 = y_3; \end{cases}$$

5) при $z_4 = 0$, $z_3 = 1$, $z_2 = 0$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = xy_2, \\ f_3 = xy_3; \end{cases}$$

6) при $z_4 = 0$, $z_3 = 1$, $z_2 = 1$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = y_2, \\ f_3 = y_3; \end{cases}$$

7) при $z_4 = 0$, $z_3 = 1$, $z_2 = 1$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = y_2, \\ f_3 = x \vee y_3; \end{cases}$$

8) при $z_4 = 1$, $z_3 = 0$, $z_2 = 0$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1 y_2, \\ f_3 = x \vee y_3; \end{cases}$$

9) при $z_4 = 1$, $z_3 = 0$, $z_2 = 0$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1 \vee y_2, \\ f_3 = xy_3; \end{cases}$$

10) при $z_4 = 1$, $z_3 = 0$, $z_2 = 1$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = xy_1y_2, \\ f_3 = y_3; \end{cases}$$

11) при $z_4 = 1$, $z_3 = 0$, $z_2 = 1$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = x \vee y_1 \vee y_2, \\ f_3 = y_3; \end{cases}$$

12) при $z_4 = 1$, $z_3 = 1$, $z_2 = 0$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1, \\ f_3 = y_2y_3; \end{cases}$$

13) при $z_4 = 1$, $z_3 = 1$, $z_2 = 0$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = y_1, \\ f_3 = y_2 \vee y_3; \end{cases}$$

14) при $z_4 = 1$, $z_3 = 1$, $z_2 = 1$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = y_1, \\ f_2 = x \vee y_2, \\ f_3 = y_3; \end{cases}$$

15) при $z_4 = 1$, $z_3 = 1$, $z_2 = 1$, $z_1 = 1$

$$\begin{cases} f_1 = x, \\ f_2 = xy_1, \\ f_3 = y_2 \vee y_3; \end{cases}$$

16) при $z_4 = 0$, $z_3 = 0$, $z_2 = 0$, $z_1 = 0$

$$\begin{cases} f_1 = xy_1, \\ f_2 = y_2, \\ f_3 = x \vee y_3. \end{cases}$$

### 3.7.3. Получение модели коррелятора

Рассмотрим корреляцию двух сигналов

$$R(\tau) = \int e_1(t) e_2(t+\tau) dt \,. \qquad (3.9)$$

Для моделирования операции интегрирования переведем полученное в результате умножения число в десятичное.

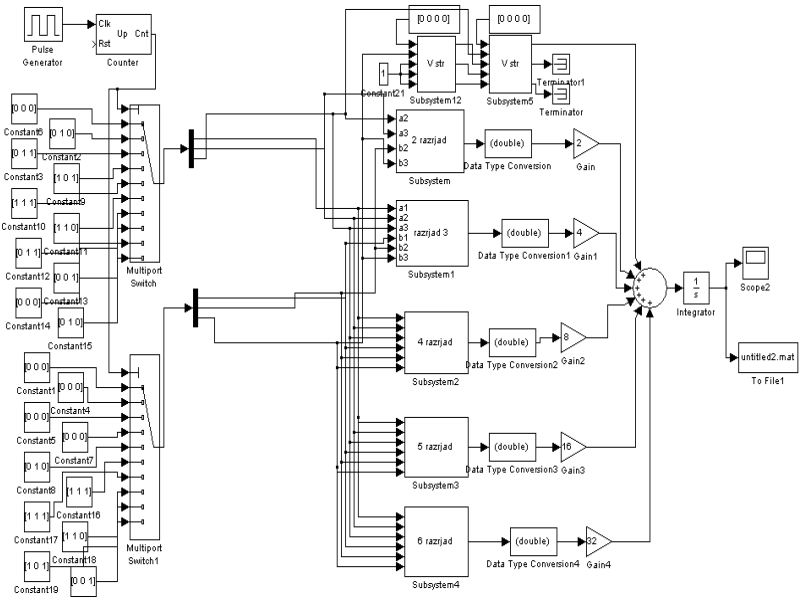


Рис. 3.27. Модель коррелятора в Matlab

Модель (рис. 3.27) содержит два переключателя, позволяющих задать различные значения эталонного и текущего сигналов в разные моменты времени. Результат интегрирования записывается в отдельный файл Matlab.

## 3.8. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### 3.8.1. Летательный аппарат как объект управления

Движение летательного аппарата как твердого тела состоит из двух составляющих: движения центра масс и движения вокруг центра масс. При больших скоростях полета в пределах атмосферы, когда летательный аппарат подвергается воздействию больших сил и моментов, начинают сказываться деформации, влияющие на аэродинамику и приводящие к изменению динамических характеристик летательного аппарата. В ряде случаев размещенные внутри летательного аппарата тела совершают заданное движение, поэтому летательный аппарат приходится рассматривать как систему твердых тел.

Использование летательного аппарата в определенных целях облегчается в том случае, когда движение является управляемым.

Управляемое движение летательного аппарата в пространстве, характеризуемое определенными координатами, скоростями, ускорениями и совершаемое для выполнения определенных задач (при удовлетворении некоторым интегральным критериям качества движения), называется режимом полета. Для осуществления управляемого движения летательного аппарата необходимо управлять параметрами режима полета, т. е. необходимо формировать воздействие, изменяющее координаты, скорости, ускорение, перегрузки и т. д.

Движение летательного аппарата совершается по инерции и под действием сил и моментов. Для управления движением необходимо воздействовать на силы и моменты, действующие на летательный аппарат, изменяя их по требуемому закону. При движении летательного аппарата по инерции управление движением осуществляется путем приложения сил или моментов, изменяющих параметры движения. К числу сил и моментов относятся: аэродинамические силы и моменты, сила тяги, сила веса, силы тяготения, силы светового давления и др.

Воздействие на аэродинамические силы и моменты производится посредством управляющих поверхностей (рули, элероны, элевоны, щитки, стабилизаторы) и воздушных тормозов. Сила тяги меняется посредством изменения режима работы двигателя или движителя (винт, реактивное сопло и т.д.). Изменение силы веса происходит

вследствие изменения запаса топлива на летательном аппарате, сбрасывания грузов и др. При полете в космическом пространстве можно использовать световое давление для управления летательным аппаратом, изменяя площадь и угловое расположение световых парусов.

К самолетам и ракетам с аэродинамическим управлением относятся такие летательные аппараты, у которых силы для получения управляющих моментов создаются плоскостями управления. Самолеты и ракеты данной группы можно разделить на несколько подгрупп в зависимости от расположения крыла и плоскостей органов управления. Если крыло расположено в нижней части фюзеляжа, то летательный аппарат называется низкопланом; если крыло располагается посередине – среднепланом и, наконец, если сверху фюзеляжа – то высокопланом. Крыло может быть неподвижным или поворачиваться в шарнире. В последнем случае говорят, что самолет имеет крыло с переменной геометрией.

В качестве регулирующих факторов, позволяющих воздействовать на летательный аппарат в целях управления его движением, можно выбрать углы отклонения рулей высоты $\delta_в$ и поворота $\delta_п$, элеронов $\delta_э$, стабилизатора $\delta_{ст}$ и т.д.

Движение летательного аппарата является единым процессом, описываемым сложной системой дифференциальных уравнений. Однако нередко сложное движение летательного аппарата разбивают на простейшие виды его (угловые движения и движение центра масс, продольное и боковое движения и т. д.), что значительно упрощает и облегчает изучение задачи. Погрешности, допускаемые при таком приближенном рассмотрении, в ряде случаев оказываются малыми.

Режим полета определяется многими взаимосвязанными параметрами. Поскольку между этими параметрами существуют однозначные связи, определяемые из уравнений движения летательного аппарата, то можно выбрать небольшое число параметров, характеризующих режим полета. Эти параметры могут быть выбраны в качестве регулируемых.

Моменты, действующие на самолет, обычно рассматриваются в связанной системе координат $oxyz$, начало координат которой располагается в центре масс самолета, а оси координат направлены следующим образом (рис. 3.28):

– продольная ось $ox$ вдоль строительной оси фюзеляжа или хорды крыла к передней части самолета;

– нормальная ось *oy* перпендикулярна продольной оси, лежит в плоскости симметрии самолета и направлена к верхней его части;

– поперечная ось *oz* перпендикулярна плоскости симметрии самолета и направлена вдоль правого крыла.

Составляющие моментов, действующих на самолет, в связанной системе координат имеют следующие названия (см. рис. 3.28):

– относительно оси *ox* действует момент крена $M_x$, который считается положительным, если он стремится создать правый крен;

– относительно оси *oy* действует момент рысканья $M_y$, который считается положительным, если он стремится развернуть самолет влево;

– относительно оси *oz* действует момент тангажа $M_z$, который считается положительным, если он стремится увеличить угол атаки самолета. Положительный момент тангажа называют кабрирующим, а отрицательный – пикирующим.

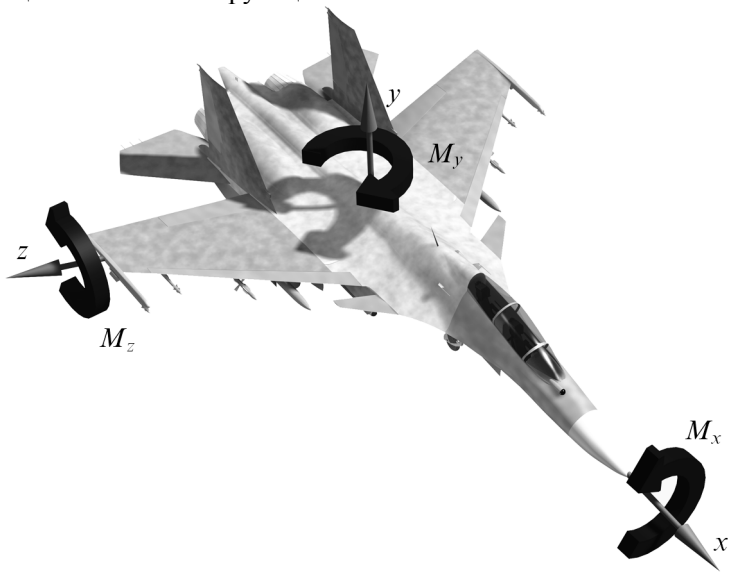


Рис. 3.28. Аэродинамические моменты, действующие на самолет относительно осей связанной системы координат

*Тангаж* (фр. tangage – килевая качка), угловое движение летательного аппарата относительно главной поперечной оси инерции.

Угол тангажа – угол между продольной осью летательного аппарата или судна и горизонтальной плоскостью. Это один из трёх углов (крен, тангаж и рыскание), соответствующих трём самолётным углам, которые задают наклон летательного средства относительно его центра.

*Рыскание* – угловые движения летательного аппарата относительно вертикальной оси.

В динамике полёта рыскание (правильнее – угол рыскания) также означает угол поворота корпуса самолёта в горизонтальной плоскости, отсчитываемый от направления на север. Этот угол сходен с курсом, но отсчитывается строго в соответствии с выбранной системой координат. В традиции отечественной школы это означает отсчёт положительных углов против часовой стрелки, если смотреть сверху. Кроме того, обычный рассматриваемый диапазон углов рыскания ±180°.

*Крен* (от фр. caréne – киль, подводная часть корабля или от англ. kren-gen – класть судно набок) – поворот объекта (судна, самолёта или корабля) вокруг его продольной оси.

### 3.8.2. Общие сведения о системе управления углом тангажа

Система управления углом тангажа самолета служит для обеспечения выдерживания нужной траектории движения в вертикальной плоскости. При этом предусматривается возможность изменения заданного угла тангажа вручную с места пилота или автоматически по сигналам, вырабатываемым системой траекторного управления. Автоматическое управление углом тангажа можно осуществить по схеме, приведенной на рис. 3.29.

Выходными характеристиками самолета в продольном движении служат углы тангажа $\vartheta$ и наклона вектора скорости $\beta$ в вертикальной плоскости. Эти углы связаны с углом атаки соотношением $\alpha = \vartheta - \beta$. При управлении углом тангажа происходит два движения: поворот

продольной оси самолета вокруг поперечной оси и поворот вектора скорости центра масс в вертикальной оси. Поворот самолета вокруг поперечной оси осуществляется под действием продольных моментов, создаваемых рулем высоты, а поворот вектора скорости – под действием нормальных сил. При повороте продольной оси самолета на угол $\vartheta$ изменяется угол атаки $\alpha$, что приводит к изменению момента статической устойчивости самолета (момент статической устойчивости – часть аэродинамического момента, пропорциональная углу атаки) и к изменению подъемной силы, что является причиной поворота вектора скорости [4].

### 3.8.3. Управление углом тангажа посредством статического автопилота

В режиме горизонтального полета упрощенные уравнения короткопериодического движения самолета в продольной плоскости имеют следующий вид:

$$(p + n_{22})\alpha - p\vartheta = f_2; \tag{3.10}$$

$$(n_0 p + n_{32})\alpha + (p^2 + n_{33} p)\vartheta = -n_B \delta_B + f_3,$$

где $n_0, n_{22}, n_{32}, n_{33}$ – коэффициенты, зависящие от конструкции самолета; $f_2, f_3$ – некоторые внешние возмущения; $\delta_B$ – отклонение руля высоты.

Из системы уравнений (3.10) путем преобразования Карсона при нулевых начальных условиях можно получить передаточную функцию $W_{\delta\vartheta}(p)$, характеризующую управляемость самолета по углу тангажа $\vartheta$ при управлении рулем высоты $\delta_B$ [4]:

$$W_{\delta\vartheta}(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta_B(p)} = \frac{-n_B(p + n_{22})}{p(p^2 + 2d_0\omega_0 p + \omega_0^2)}, \tag{3.11}$$

где

$$\omega_0^2 = n_{32} + n_{22}n_{33}, \quad 2d_0\omega_0 = n_0 + n_{22} + n_{33}. \tag{3.12}$$

При выводе (3.11) принималось, что внешние возмущения $f_2$ и $f_3$ равны нулю. Закон управления в случае статического автопилота принимается в виде

$$\delta_B = K_\vartheta(\vartheta - \vartheta_з) + K_{\dot\vartheta} p\vartheta\,, \qquad (3.13)$$

где $\vartheta_з$ – заданное значение угла тангажа; $K_\vartheta, K_{\dot\vartheta}$ – коэффициенты закона управления.

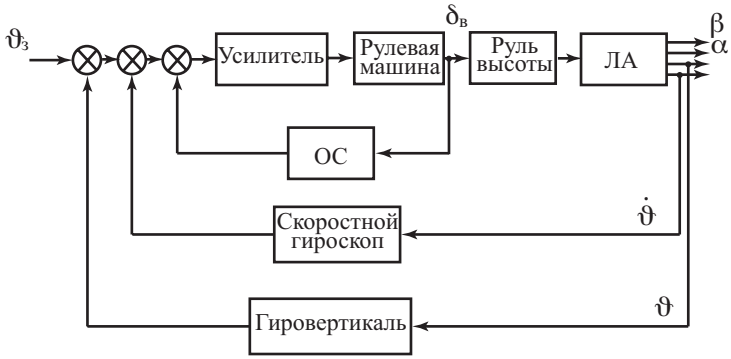


Рис. 3.29. Схема управления углом тангажа

Структурная схема системы управления угла тангажа дана на рис. 3.30 (внешнее возмущение $f_2$ на схеме не показано). Решая систему уравнений (3.10) с учетом (3.13), получим уравнение замкнутой системы:

$$(p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3)\vartheta = (b_0 p + a_3)\vartheta_3 + (n_0 p + n_{32}) f_2 + (p + n_{22}) f_3, \qquad (3.14)$$

где $a_1 = 2d_0\omega_0 + n_В K_{\dot\vartheta}$; $a_2 = \omega_0^2 + n_В(K_\vartheta + n_{22}K_{\dot\vartheta})$; $a_3 = n_В n_{22} K_\vartheta$; $b_0 = n_B K_\vartheta$.

Выбор параметров и закона управления в общем случае производится на основе минимизации некоторого функционала качества замкнутой системы. Выбранные таким способом параметры должны обеспечивать воспроизведение с допустимой погрешностью заданного угла тангажа при слабом реагировании на возмущения $f_2$ и $f_3$.

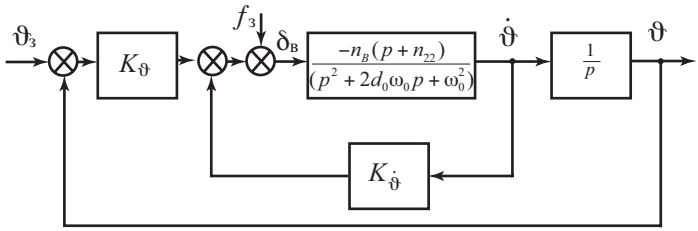


Рис. 3.30. Структурная схема управления углом тангажа

Упрощенная инженерная методика выбора параметров $K_\vartheta$ и $K_{\dot{\vartheta}}$ состоит в следующем: сначала выбирается значение $K_{\dot{\vartheta}}$ из условия качества заданного переходного процесса во внутреннем контуре, а затем с учетом выбранного $K_{\dot{\vartheta}}$ рассчитывается значение $K_\vartheta$ из условия заданного качества переходного процесса всей системы рис. 3.30. При этом принимается $f_2 = f_3 = 0$. Передаточная функция внутреннего контура имеет следующий вид:

$$W_{y\dot{\vartheta}}(p) = \frac{\dot{\vartheta}(p)}{Y(p)} = \frac{n_B(p+n_{22})}{p(p^2+2d\omega p+\omega^2)}, \qquad (3.15)$$

где $\omega^2 = \omega_0^2 + n_В n_{22} K_{\dot{\vartheta}}$, $2d\omega = 2d_0\omega_0 + n_В K_{\dot{\vartheta}}$; $Y(p)$ – промежуточная координата.

Качество переходного процесса может быть задано величиной $d_0$, определяющей степень колебательности. Обычно $d_{опт}$ выбирается в пределах от 0,7 до 1.

При выбранном $d_{опт}$ из (3.15) находится значение параметра $K_{\dot{\vartheta}}$ по формуле

$$K_{\dot{\vartheta}} = \frac{1}{n_В}\left[2d_{опт}^2 n_{22}\left(1+\sqrt{1-\frac{2d_0\omega_0}{d_{опт}^2 n_{22}}+\frac{\omega_0^2}{d_{опт}^2 n_{22}^2}}\right)-2d_0\omega_0\right]. \qquad (3.16)$$

Для всей системы из (3.14) находится передаточная функция:

$$W_{\vartheta_з\vartheta}(p) = \frac{n_B K_\vartheta(p+n_{22})}{p^3+A_1\omega p^2+A_2\omega^2 p+\omega^3)}, \qquad (3.17)$$

где $A_1 = 2d;\ A_2 = 1 + \dfrac{n_B K_\vartheta}{\omega^2};\ \omega^3 = n_B n_{22} K_\vartheta$.

Коэффициент $A_1$ уже задан заранее выбором $d$. Поэтому варьировать можно лишь коэффициентом $A_2$ (для передаточной функции (3.17) коэффициенты $A_1$ и $A_2$ – это параметры Вышнеградского). Оптимальному переходному процессу соответствует $A_2$ = 2…3. Из (3.17) получаем

$$\omega = (A_2 - 1)n_{22}; \quad K_\vartheta = \frac{(A_2 - 1)^3 n_{22}^3}{n_{\text{В}}}. \tag{3.18}$$

Таким образом, предварительные параметры $K_{\dot\vartheta}$ и $K_\vartheta$ могут быть выбраны по формулам (3.16) и (3.18).

### 3.8.4. Синтез модели системы управления углом тангажа самолета с использованием ПИД-регулятора

Используя информацию, описанную в предыдущем разделе, в пакете Matlab составим модель системы управления углом тангажа летательного аппарата [5]. В качестве устройства управления выберем ПИД-регулятор. Система представлена на рис. 3.31.

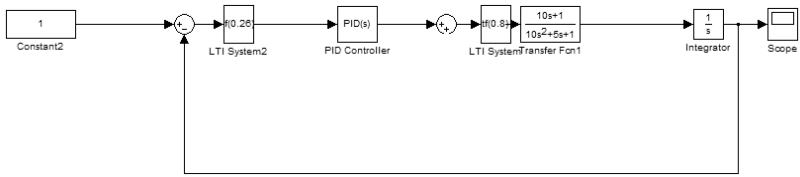


Рис. 3.31. Система управления углом тангажа самолета

Как видно из рис. 3.31, объект управления описывается передаточной функцией $W(p) = \dfrac{0.8(10p+1)}{10p^2 + 5p + 1}$. Путем подбора коэффициентов ПИД-регулятора добились оптимального переходного процесса, который представлен на рис. 3.32.

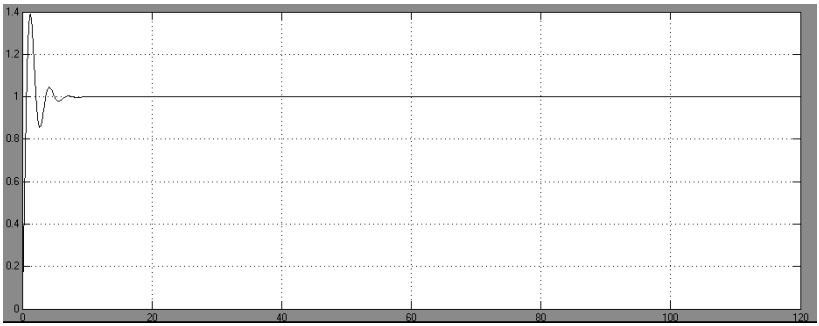


Рис. 3.32. Переходная характеристика системы

Как видно из графика на рис. 3.32, процесс затухает и довольно быстро. Из этого можно сделать выводы, что система, построенная на ПИД-регуляторе, является устойчивой. Так же проверим ее на устойчивость при возмущениях, добавив в систему необходимые изменения, т. е. добавим сумматор и блок единичного ступенчатого воздействия «Step», что показано на рис. 3.33.

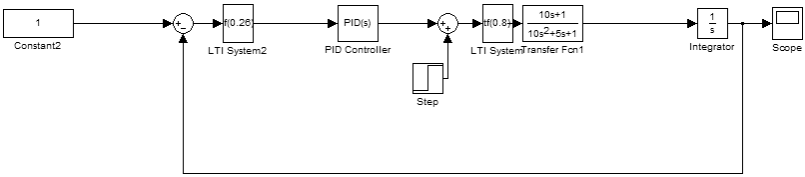


Рис. 3.33. Дополненная схема управления углом самолета

С помощью этой схемы посмотрим на действия системы при случайных возмущениях, представленных на рис. 3.34.

Из графика на рис. 3.34 следует, что система полностью устойчива к возмущениям типа «единичное ступенчатое воздействие», поданное в момент времени ,$t$ равное 80.

Оценим качество полученного переходного процесса:

перерегулирование: $\sigma = \dfrac{(A_{\max} - 1)}{1} \cdot 100\% = \dfrac{(1,23 - 1)}{1} \cdot 100\% = 23\ \%$;

время регулирования: $t_{\text{р}} = 3$ с;

максимальная динамическая ошибка: $A_{\max} = 0{,}23$;

степень затухания: $\psi = \dfrac{(A_1 - A_2)}{A_1} = \dfrac{(0,23 - 0,0085)}{0,23} = 0,95.$

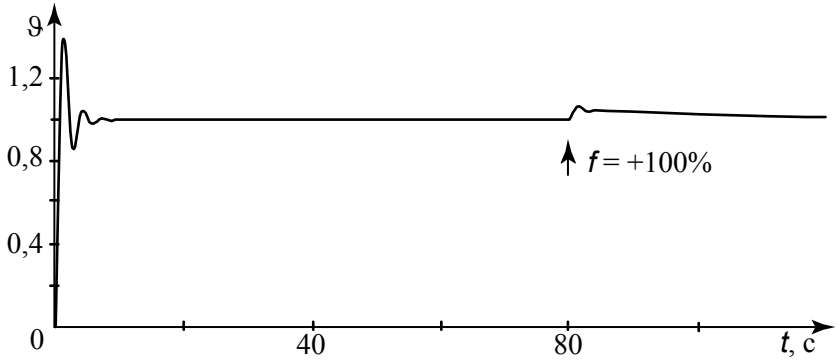


Рис. 3.34. Реакция системы на возмущения

### 3.8.5. Синтез модели системы управления углом тангажа самолета с использованием коррелятора и ПИД-регулятора

Добавим в существующую систему коррелятор, его структурная схема представлена на рис. 3.35.

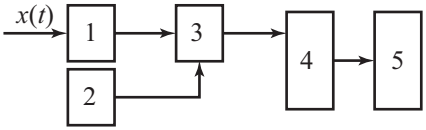


Рис. 3.35. Структурная схема коррелятора

На рис. 3.35 видно, что на усилитель 1 поступает сигнал $x(t)$ с датчика на борту самолета, а из блока 2 на сумматор 3 поступает исходный сигнал, после чего их разница поступает на интегратор 4, а затем все фиксируется на индикаторе 5.

Структурная схема синтезируемой автоматической системы регулирования приведена на рис. 3.36.

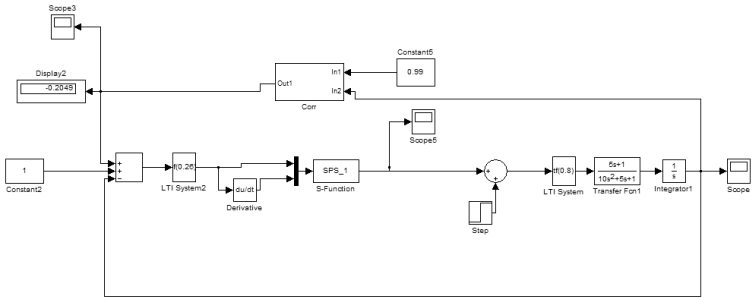


Рис. 3.36. Схема модели системы управления

Блок коррелятора тут реализует изменяющееся реальное состояние положения самолета, т. е. изменение угла тангажа. Благодаря этому система управления постоянно имеет информацию об изменении параметра.

В результате моделирования этой системы получаем переходный процесс, который показан на рис. 3.37.

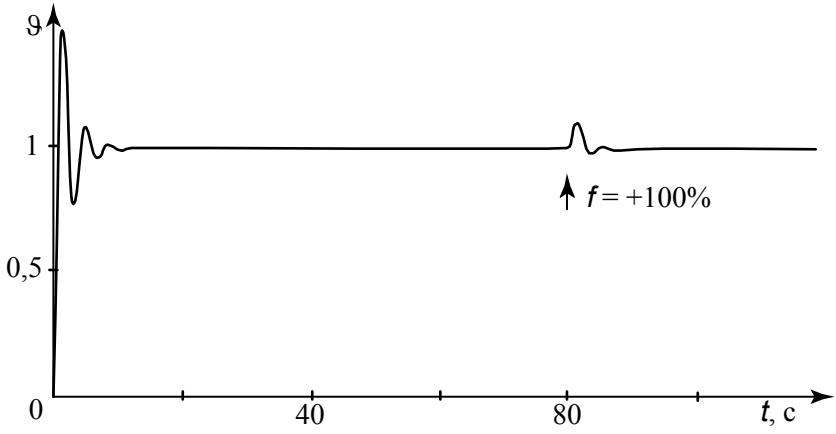


Рис. 3.37. Переходный процесс системы управления

Проанализировав график процесса, можно сделать определенные выводы по его основным параметрам:

перерегулирование: $\sigma = \frac{(A_{\max} - 1)}{1} \cdot 100\% = \frac{(1.4 - 1)}{1} \cdot 100\% = 40\ \%$;

время регулирования: $t_р = 4{,}23$ с;

максимальная динамическая ошибка: $A_{\max} = 0{,}4$;

степень затухания: $\psi = \frac{(A_1 - A_2)}{A_1} = \frac{(0{,}4 - 0{,}032)}{0{,}4} = 0{,}92$.

Исходя их этих данных можно сделать вывод, что при некоторых параметрах эта система работает качественней, чем система только с ПИД-регулятором.

### 3.8.6. Синтез модели системы управления углом тангажа самолета с использованием коррелятора и СПС-регулятора

Задача синтеза регулятора с перестраиваемой структурой, для рассматриваемого объекта, состоит в выборе каждой из структур регулятора и последовательности их изменения. Для синтеза будем использовать метод фазового пространства. В нашем случае логический закон управления будет описываться следующим выражением:

$$u = \Psi \cdot x\,, \tag{3.19}$$

где

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } xs \succ 0, \\ \beta & \text{при } xs \prec 0, \end{cases}$$

$$s = \frac{dx}{dt} - \lambda x\,.$$

Коэффициенты $\alpha$ и $\beta$ должны выбираться таким образом, чтобы линейная структура, соответствующая $\Psi = \alpha$, была колебательной, а линейная структура, соответствующая $\Psi = \beta$, имела устойчивое вырожденное движение. Коэффициент $\lambda$, характеризующий скорость затухания этого устойчивого движения, определяет величину $s$ в логическом законе изменения структуры [8].

Исходя из вышеуказанных условий, выбрали коэффициенты $\alpha$ и $\beta$ следующим образом:

$$\alpha = 30;$$

$$\beta = -18.$$

Структурная схема синтезируемой автоматической системы регулирования приведена на рис. 3.38.

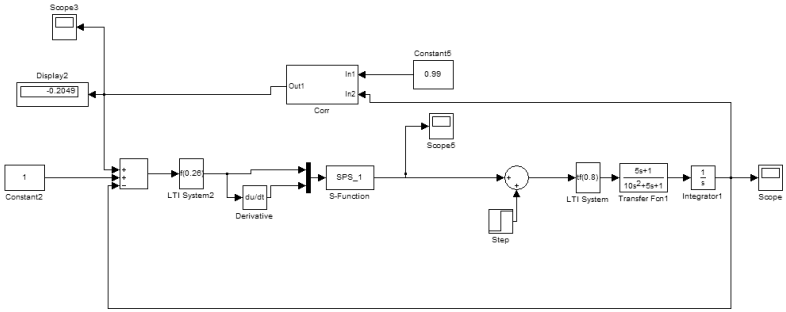


Рис. 3.38. Схема модели системы управления с СПС-регулятором

Произведя моделирование, получаем реакцию системы на задающее входное воздействие (рис. 3.39).

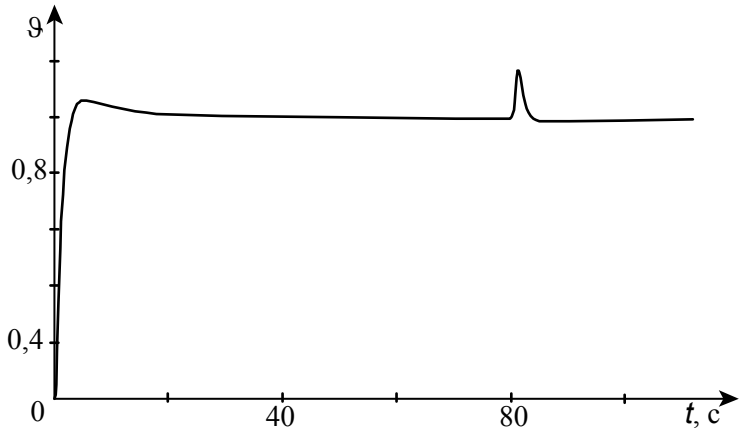


Рис. 3.39. Реакция системы на задающее входное воздействие

Получив переходный процесс в замкнутой системе автоматического регулирования, оценим его качество.

Склонность системы к колебаниям, а следовательно, и запас устойчивости могут быть охарактеризованы максимальным значением регулируемой величины $y_{max}$ или так называемым перерегулированием:

перерегулирование: $\sigma = \frac{(A_{max} - 1)}{1} \cdot 100\% = \frac{1,05 - 1}{1} \cdot 100\% = 5\ \%$;

время регулирования: $t_р = 2,3$ с;

максимальная динамическая ошибка: $A_{max} = 0,05$;

сСтепень затухания: $\psi = \frac{(A_1 - A_2)}{A_1} = 0,95$.

Полученные показатели качества двух систем регулирования занесем в сравнительную таблицу (табл. 3.5).

Из полученных оценок качества переходных процессов следует, что первые две системы обеспечивают хорошее качество регулирования. В переходных процессах систем с ПИД-регуляторами перерегулирование явно присутствует, времена регулирования почти одинаковые, у системы с коррелятором максимальная динамическая ошибка получились больше, это связанно с появлением в системе новых данных, за счет которых и изменился вид переходного процесса. В системе с использованием СПС-регулятора все показатели качества процесса лучше, это связанно с тем, что как и регулятор, так и коррелятор, построенный на V-автоматах, могут перестраиваться в зависимости от исходных данных, это позволяет одну и ту же систему использовать для разных типов задач, изменяя только настройки самой системы.

Таблица 3.5

**Результаты расчётов основных показателей качества процесса регулирования**

| Вид системы | Перерегулирование, % | Время регулирования, с | Максимальная динамическая ошибка | Степень затухания |
|---|---|---|---|---|
| ПИД-регулятор | 23 | 3 | 0,23 | 0,95 |
| ПИД-регулятор с коррелятором | 40 | 4,23 | 0,4 | 0,92 |
| СПС-регулятор с коррелятором | 5 | 2,3 | 0,05 | 0,95 |

Следует отметить, что реализация СПС-регулятора значительно проще, чем ПИД-регулятора. Кроме того, при использовании СПС-регулятора в управляющем воздействии отсутствует значение производной от ошибки регулирования, а присутствует только информация о её знаке.

## 3.9. ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные понятия систем автоматического управления с переменной структурой.

2. Излагается идеология применения перестраиваемых вычислительных сред в системах автоматического управления. Устройства управления, построенные по такой идеологии, обеспечивают значительное повышение качества процесса регулирования по сравнению с классическими системами.

3. Описываются способы реализации перестраиваемых вычислительных сред на базе аппаратной платформы CompactRIO (National Instruments).

4. Построена имитационная модель цифрового коррелятора на базе перестраиваемой вычислительной среды.

5. Синтезирована имитационная модель реконфигурируемой системы автоматического управления угла тангажа летательного аппарата.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Боднер В.А.* Теория автоматического управления полетом. – М.: Наука, 1964. – 700 с.

2. *Емельянов С.В.* Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 336 с.

3. *Емельянов С.В., Коровин С.К.* Новые типы обратной связи. – М.: Наука, 1997. – 352 с.

4. *Карамайкин А.С.* Моделирование процессов и систем. – СПб: Изд-во СПбГУАП, 2006. – 26 с.

5. *Наместников А.М.* Разработка имитационных моделей в среде Matlab. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2004. – 72 с.

6. *Прангишвили И.В., Абрамова Н.А., Бабичева Е.В., Игнатущенко В.В.* Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. – М.: Наука, 1967. – 228 с.

7. *Программирование* в NI LabVIEW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://labview.webhost.ru/, свободный.

8. *Шидловский С.В.* Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. – Томск: Томский госуниверситет, 2006. – 288 с.

9. *LabVIEW* для CompactRIO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.labview.ru/ , свободный.

10. *National* Instruments – информационный центр компании в России, СНГ и Балтии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://digital.ni.com/worldwide/russia.nsf/sb/Product+Information , свободный.

11. *PARALLER.RU* – Информационно-аналитический центр по параллельным вычислениям [Электронный ресурс]. Особенности языков описания архитектуры Verilog и VHDL. – Режим доступа: http://www.parallel.ru/FPGA/hdl.html , свободный.

# Глава 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

## 4.1. ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором создания КЭС является разработка системы автоматизированного проектирования (САПР) корреляционных зрительных систем. Основные положения такой САПР рассмотрены в настоящей главе. В начале (разд. 4.2) приводится структура САПР КЭС, представляющая собой итерационный процесс, а затем (разд. 4.3) детально излагается структурный синтез КЭС на основе одного из перспективных методов – функционально-стоимостного анализа. При параметрическом синтезе (разд. 4.4) определяется допустимая погрешность оценки координат при минимизации затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией КЭС, и приводится инженерный (приближенный) расчет КЭС. В заключение раздела (разд. 4.5) описывается структура (состав) и программное обеспечение аппаратно-программного комплекса, предназначенного для моделирования и проектирования КЭС.

## 4.2. СТРУКТУРА САПР КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Системы автоматизированного проектирования находят широкое применение во многих областях науки, техники и производства, где используются сложные технические системы и их элементы: автоматические линии для изготовления деталей и узлов машин, гибкие автоматизированные производственные системы, транспортные устройства, роботы-манипуляторы [26, 28, 80]. К таким сложным системам относятся и КЭС.

По мере развития КЭС все более усложнялось их проектирование, поэтому встала задача автоматизации процесса проектирования этих

систем. Но, в отличие от других технических систем, САПР для КЭС получили свое развитие лишь в последние 5 – 8 лет [17, 41, 42, 79, 80].

Проектирование – это процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще несуществующего объекта, на основе начального описания (технического задания), преобразования первичного описания, оптимизация заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования, коррекция начального описания и последовательное представление описаний на различных языках, разработка (изготовление и исследование) макета системы и подготовка производства [5, 23, 26, 37, 47, 55, 59, 72].

Как и при автоматизации проектирования любого другого устройства, САПР корреляционных КЭС представляет собой комплекс средств автоматизации проектирования (организационного, методического, лингвистического, информационного, математического, программного и технического обеспечения).

Однако процесс проектирования корреляционно-экстремальных систем имеет отличия от проектирования КЭС другого типа. Эти отличия обусловлены особенностями реализации КЭС и спецификой ее применения.

Обобщая результаты по моделированию и проектированию корреляционных систем [5, 11, 24, 25, 34, 55, 66], предложим следующую схему САПР КЭС, изображенную на рис. 4.1. Эта схема представляет собой итерационный процесс. Проектирование КЭС – это совокупность задач синтеза (выбор структуры и численных значений параметров разрабатываемых систем) и анализа (исследования синтезированной системы). Этап синтеза КЭС может повторяться, если будут отрицательны результаты анализа. В случае удовлетворительного результата итерационного процесса на данном этапе детализации процесс проектирования переходит на следующий уровень проектирования.

На каждом уровне проектирования составляется модель КЭС, воплощенной в форме, отличной от действительной. Модели могут быть представлены в виде абстрактных математических формул (аналитическое моделирование), алгоритмов, позволяющих имитировать функционирование КЭС на ЭВМ (машинное моделирование), копий или макетов (физическое моделирование).

Процесс проектирования можно условно разделить на три этапа: верхний, нижний и промежуточный. На первом (верхнем) этапе проектирования КЭС модель зрительной системы представляется в виде

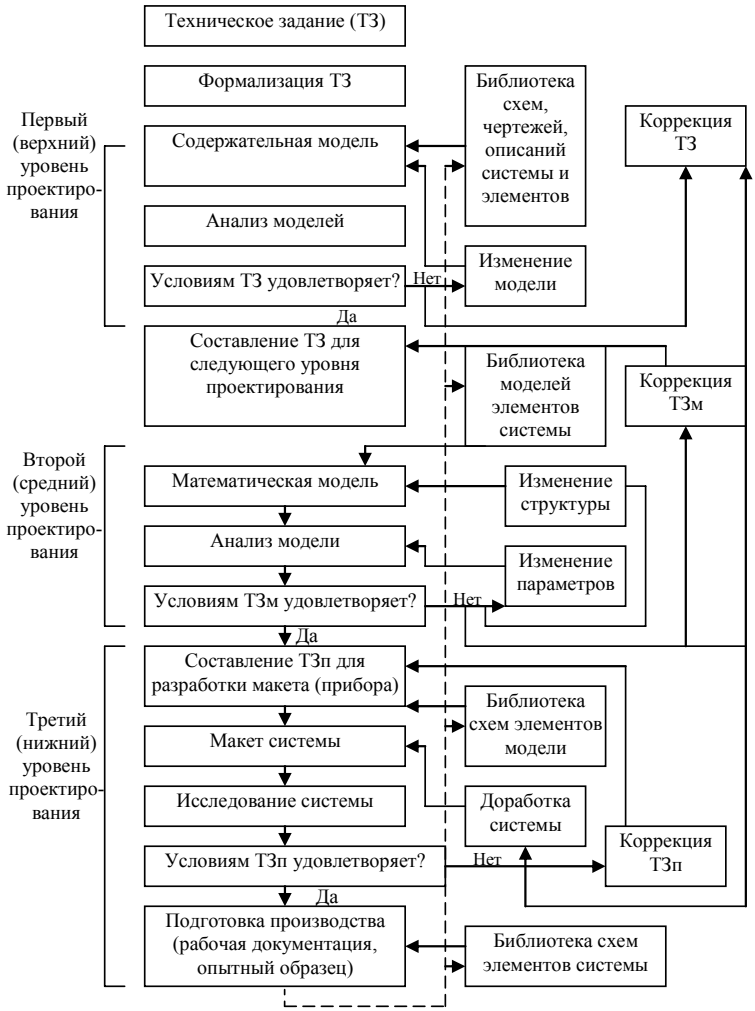


Рис. 4.1. Структурная схема САПР КЭС

содержательной модели, которая может описываться на естественном языке, поясняться схемами, эскизами, рисунками, чертежами, таблицами, графиками.

Таким образом, содержательная модель представляется на одном из «входных» зыков САПР КЭС. При этом техническое задание необходимо формализовать – привести к характеристикам, параметрам и выражениям, понятным САПР КЭС.

Второй уровень проектирования называют уровнем уточнения и параметризации модели. Этот уровень проектирования называют также уровнем синтеза математической модели, представляющей собой совокупность математических объектов (чисел, переменных векторов, множеств и т. п.) и отношений между ними, адекватно отражающую существование с позиций проектировщика свойства зрительной системы. Поскольку часто среди вариантов структуры КЭС ищется наилучший в некотором смысле, то такую задачу синтеза называют структурной оптимизацией, а расчет параметров, оптимальных с позиции некоторого критерия при заданной структуре КЭС, называют параметрической оптимизацией.

Если информативность содержательной модели окажется недостаточной для построения математической модели, то следует вернуться на первый уровень проектирования и декомпозировать содержательную модель по подсистемам проектируемой КЭС. При выборе содержательной модели и структурном синтезе КЭС следует использовать функционально-стоимостной анализ, являющийся комплексным методом, позволяющим спроектировать оптимальный вариант структуры изделия [31, 51, 54]. Синтез математической модели можно производить известными методами, используемыми в САПР [37, 56, 72]. Второй этап проектирования КЭС заканчивается составлением технического задания (ТЗм) для следующего этапа проектирования КЭС.

Третий (нижний) уровень проектирования должен содержать разработку КЭС и заканчиваться этапом подготовки производства. В случае необходимости техническое задание на разработку макета (ТЗп) может корректироваться по результатам его испытания. На этом этапе проектирования могут использоваться известные подсистемы САПР блоков КЭС.

Следует еще раз отметить, что по результатам каждого уровня проектирования могут корректироваться (уточняться) технические

задания на данный этап либо общее ТЗ на разработку КЭС (если это допустимо). После испытания макета и создания опытного образца проводится коррекция (исправление и дополнение) библиотек этапов. На рис. 4.1 это воздействие показано пунктирной линией.

Если произведен выбор содержательной модели, осуществлена структурная и параметрическая оптимизация КЭС, то следует установить основные параметры КЭС и разработать методику расчета зрительной системы.

## 4.3. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА

### 4.3.1. Особенности методики проведения комплексного функционально-стоимостного анализа в процессе создания КЭС

Рассмотрим вопросы применения функционально-стоимостного анализа (ФСА) для разработки КЭС, используя результаты, изложенные в [8, 9, 10, 12, 16, 29, 30, 31, 40, 51, 54]. НИР по разработке КЭС является сложной (комплексной) задачей, включающей в себя следующие основные вопросы: выбор метода анализа информации, обоснование и выбор оптимального варианта структуры зрительной системы, оценку необходимых параметров всех элементов разрабатываемых конструкций.

Указанная многоцелевая задача предполагает достижение конечной цели путем поэтапного применения различных методов ФСА (рис. 4.2). ФСА на ранних этапах НИР (техническое задание и техническое предложение) направлен на выявление и выбор наиболее предпочтительного из всех альтернативных вариантов технических решений. Из-за отсутствия достоверной технической и стоимостной информации об элементах структуры КЭС представляется целесообразным использовать в основе ФСА методы прогнозирования и экспертные методы [8 – 10].

При этом для достаточного выбора приемлемого варианта структуры КЭС можно использовать такой обобщающий критерий в качестве оценочного показателя каждого варианта технического решения, как условно названный показатель интегрального качества – функция

потребительской стоимости проектируемого объекта. Так как абсолютный расчет потребительской стоимости КЭС на ранних стадиях проектирования затруднен, поэтому его можно заменить расчетом комплексного показателя качества, представляющего собой сумму произведений значимости каждого из основных для данной КЭС свойств (показатель качества) на оценку величины этого свойства (степень удовлетворения свойства) в рассматриваемом варианте. Для выбора окончательного варианта КЭС могут быть использованы разнообразные экспертные методы [8].

На последующих этапах НИР (теоретическое и экспериментальное исследования) из-за недостаточного объема информации проектируемой КЭС может осуществляться по упрощенной схеме, т. е. по более укрупненным этапам, представленным на рис. 4.2. В этом случае предусматривается использование экспертных оценок наряду с конкретными значениями технико-эксплуатационных и экономических показателей. Более полная схема проведения ФСА, осуществляемая при наличии достаточного объема достоверной информации о проектируемой КЭС, позволяет проводить детальный анализ технического решения с целью выбора оптимального варианта проектирования на основе функционально-аналитического анализа вариантов КЭС. Отметим, что хотя такой детальный экономический анализ экономит затраты на изготовление изделия, однако он (анализ) может существенно увеличить трудоемкость и длительность процесса проектирования КЭС. В то же время главная и принципиальная особенность экономической работы в процессе ФСА – это оперативность выполнения всех необходимых расчетов.

Таким образом, комплексный многоцелевой экономический анализ, последовательно выполняемый на всех этапах НИР, отражает глобальный подход при нахождении оптимального варианта реализации любого многокомпонентного технического задания. Этот анализ является более эффективным по сравнению с локальным анализом, используемым для отдельных этапов НИР, так как дает возможность осуществлять единый системный подход при выборе средств обеспечения потребительских свойств окончательного варианта проектируемой КЭС. Комплексный ФСА позволяет выявить механизм формирования издержек по мере реализации выбранного варианта и на этой основе определить задачи по дальнейшему поиску оптимального соотношения между потребительными свойствами и затратами на их осуществление.

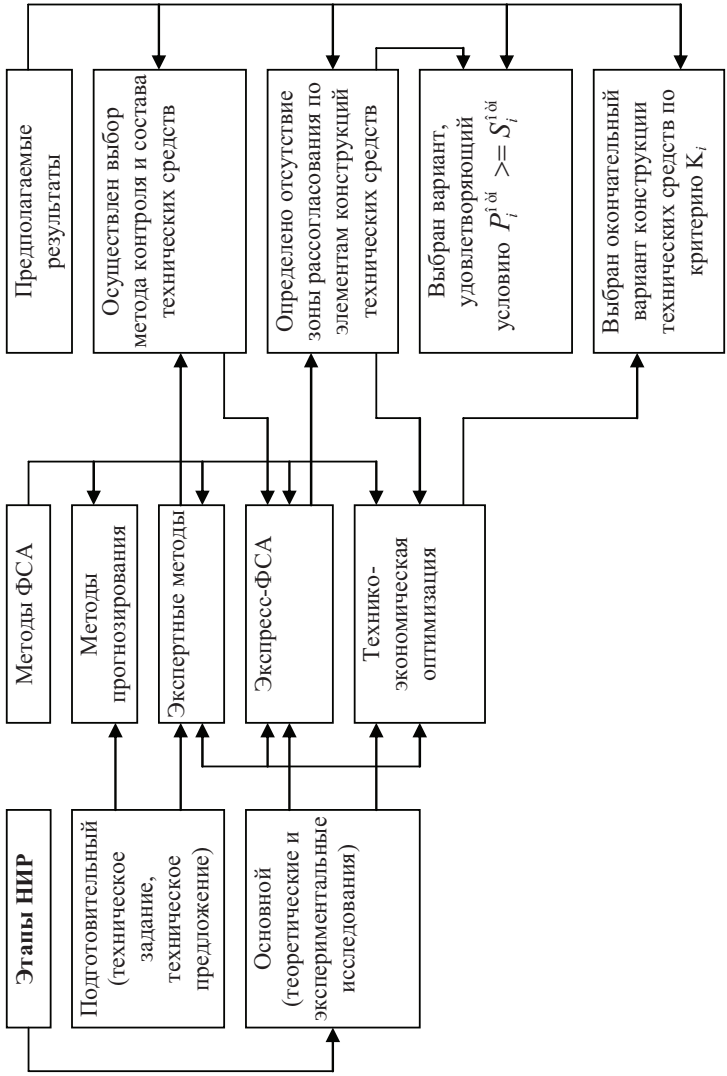


Рис. 4.2. Схема применения методов ФСА по этапам НИР

### 4.3.2. Функционально-стоимостной анализ на ранних этапах научно-исследовательской работы

Наличие информационной неопределенности в процессе поиска наилучшего варианта структуры КЭС обуславливает невозможность использования в процессе ФСА формализованных методов оценки. Для снижения субъективизма и повышения достоверности таких оценок может быть использован метод расстановки приоритетов [10, 16, 20, 81].

Суть этого метода заключается в расположении группы изделий в некоторый ряд по возрастанию или убыванию степени выраженности одного или нескольких признаков (критериев), соответствующих этим изделиям. При этом предполагается, что численное значение степени выраженности признака неизвестно для одного или для всех изделий и преодоление этой неизвестности традиционными методами невозможно или требует значительных затрат труда, времени и ресурсов.

Алгоритм проведения ФСА, реализующий метод расстановки приоритетов, состоит из следующих основных этапов [10, 16, 63]:

1. Выбор и обоснование количества сравниваемых вариантов изделий $Y_1^{pn}$, $Y_2^{pn}$, …., $Y_n^{pn}$.

2. Определение системы параметров для характеристик основных функций проектируемого изделия $X_1^{pn}$, $X_2^{pn}$, …., $X_n^{pn}$.

3. Составление системы сравнения по каждому параметру изделия.

4. Построение матрицы предпочтительности с целью оценки приоритета выбранных параметров $X^{pn}$.

5. Получение системы вариантов для сравнения их между собой по каждому параметру $X_m^{pn}$.

6. Определение комплексного показателя качества каждого альтернативного варианта технического решения.

Рассмотрим кратко изложенный алгоритм расстановки приоритетов применительно к КЭС [20, 63].

При выборе количества сравниваемых вариантов КЭС $Y_1^{pn}$, $Y_2^{pn}$, …, $Y_n^{pn}$ необходимо руководствоваться такими общими соображениями, как выбор метода формирования текущего изображения (те-

левизионный, оптический, оптико-локационный, магнитоэлектрический и т.п.), определяющего структуру зрительной системы.

Система параметров $X_1^{pn}$, $X_2^{pn}$, …., $X_n^{pn}$ должна адекватно соответствовать необходимым требованиям, предъявляемым техническим заданием на разработку КЭС. Например, система параметров должна отражать точность (погрешность), быстродействие и надежность оценки параметров, объем обрабатываемой информации.

При составлении системы сравнения по каждому параметру эксперты должны независимо сравнить эти параметры между собой. В процессе сравнения оценивают преимущества одного варианта перед другим (более важен, менее важен, равноценен) определяют отношения между ними знаками >, < или =. Далее строится матрица предпочтительности $A = |a_{ij}|$, в которой коэффициент предпочтительности $a_{ij}$ является числовой мерой (не баллом) – аналогом нашего представления о предпочтении одного из сравниваемых вариантов КЭС по какому-то критерию другому варианту КЭС.

Коэффициент $a_{ij}$ обладает следующими известными свойствами: 1) сумма коэффициентов предпочтительности двух сравниваемых КЭС принимается равной двум, $a_{ij} + a_{ji} = 2$; 2) коэффициенты располагаются симметрично относительно единицы:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 + y, \text{ при } x_i > x_j, \\ 1, \text{ при } x_i = x_j, \\ 1 - y, \text{ при } x_i < x_j, \quad \text{где } a \le y \le 1. \end{cases} \tag{4.1}$$

Формула для определения $y$ имеет следующий вид:

$$y = \left( \frac{K_p - 1}{K_p + 1} + \sqrt{\frac{0,05}{m}} \right), \tag{4.2}$$

где $m$ – число оцениваемых объектов; $K_p$ – коэффициент отношения крайних членов предварительно ранжированного (экспертным путем) ряда. Коэффициент $a_{ij}$ может принимать значения: 1,9; 1,8; 1,7; 1,6; 1,5; 1,4; 1,3; 1,2; 1,1 при $x_i > x_j$; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0 при $x_i = x_j$; 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 при $x_i < x_j$.

Особенности применения данного метода показывают целесообразность использования следующих значений коэффициентов предпочтительности *aij*:

$$a_{ij} = 1{,}5, \text{ при } x_i > x_j;$$

$$a_{ij} = 1{,}0, \text{ при } x_i = x_j;$$

$$a_{ij} = 0{,}5, \text{ при } x_i < x_j.$$

Результаты сравнения параметров сводятся в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Пример усредненных суждений, высказанных пятью экспертами**

| Параметры | Экспертиза | | | | | Итоговая оценка при сравнении | Числовое значение итоговой оценки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| $x_1$ и $x_2$ | = | < | < | < | = | < | 0,5 |
| $x_1$ и $x_3$ | > | > | > | > | > | > | 1,5 |
| $x_1$ и $x_4$ | < | < | < | < | < | < | 0,5 |
| $x_2$ и $x_3$ | > | > | > | > | > | > | 1,5 |
| $x_2$ и $x_4$ | = | > | = | = | > | = | 1,0 |
| $x_3$ и $x_4$ | > | > | > | > | > | > | 1,5 |

Этап построения матрицы предпочтительности состоит из следующих операций:

1) введение в матрицу $A_п$ выбранных количественных отношений между параметрами;

2) нахождение суммы $a_{ij}$ по всем параметрам $X_n^{pn}$ (определение абсолютного значения $b_i$ каждого параметра);

3) оценка относительных значений отдельных анализируемых параметров

$$\rho_i^{pn} = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i}; \tag{4.3}$$

4) вычисление абсолютного приоритета параметров

$$\rho_{ij}^{pn} = a_{i1}b_1 + a_{i2}b_2 +, \cdots, a_{in}b_n; \tag{4.4}$$

5) определение относительного приоритета параметров

$$\rho_i^{отн} = \frac{\rho_i^{pn}}{\sum_{i=1}^{n} \rho_{ij}^{pn}}. \tag{4.5}$$

Итеративный характер расчетов при выполнении четвертого этапа может быть представлен в виде табл. 4.2.

Таблица 4.2

**Расчет приоритета параметров**

| $J$ / $i$ | Параметры | | | | 1-й шаг | | 2-й шаг | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_;$ | $\sum a_{ij}$ | $\rho_i^{рп}$ | $\rho_{ij}^{рп}$ | $\rho_i^{отн}$ |
| $X_1$ | 1,0 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 3,5 | 0,22 | 13,25 | 0,21 |
| $X_2$ | 1,5 | 1,0 | 1,5 | 1,0 | 5,0 | 0,31 | 19,5 | 0,314 |
| $X_3$ | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 3,5 | 0,22 | 13,75 | 0,22 |
| $X_4$ | 1,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 4,0 | 0,25 | 16,0 | 0,256 |
| | | | | | 16,0 | 1,0 | 62,5 | 1,0 |

При получении системы вариантов для сравнения их между собой по параметру $X_n^{рп}$ необходимо выполнить следующие операции:

1) составление системы сравнения вариантов КЭС по первому параметру $X_1^{рп}$;

2) составление таблицы в виде матрицы предпочтительности по параметру $X_1^{рп}$;

3) выполнение операции согласно четвертому этапу;

4) строятся матрицы предпочтительности и производятся вычисления по второму ($X_2^{рп}$), третьему ($X_3^{рп}$) и другим ($X_n^{рп}$) параметрам.

В результате выполнения этого этапа определяется абсолютный и относительный приоритет вариантов проектирования новой КЭС по каждому из выбранных для его характеристики параметров $X_n^{рп}$.

Заключительной операцией этапа является операция свертывания полученных частных критериев – составление суммарного ряда, характеризующего каждый из анализируемых вариантов.

Обобщенная качественная оценка любого варианта КЭС определяется следующим образом:

$$Q_y = \sum_{i=1}^{m} \rho_i^{отн} \rho_{yi}^{отн} , \qquad (4.6)$$

$\rho_{yi}^{отн}$ – уровень значимости выбранного для анализа параметра $x$ по рассматриваемому варианту $y$.

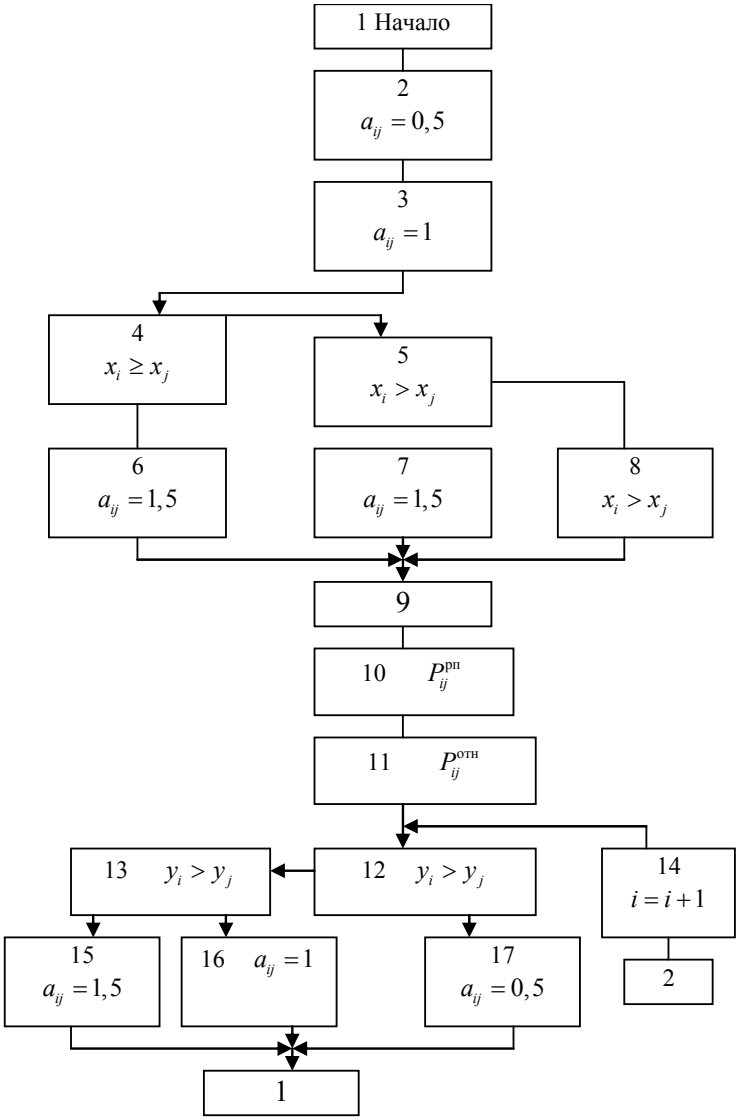


Рис. 4.3. Блок-схема алгоритма расстановки приоритетов (начало)

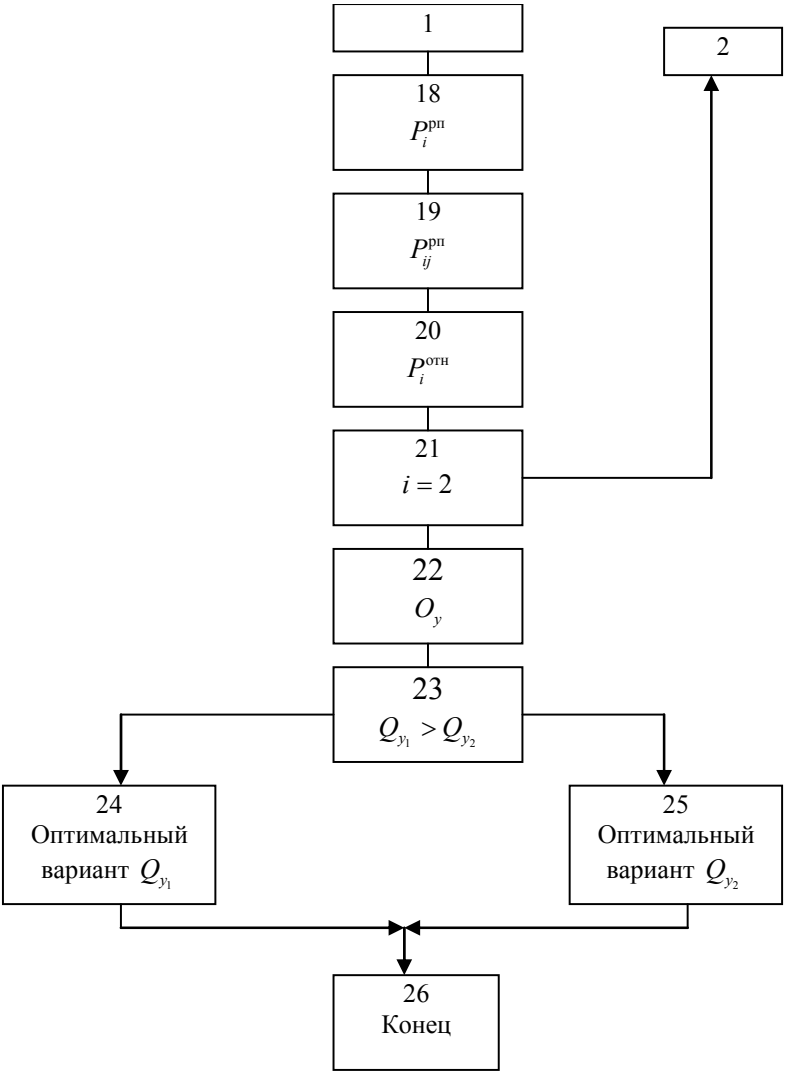


Рис. 4.3. Блок-схема алгоритма расстановки приоритетов (окончание)

Максимальное значение полученного комплексного показателя $Q_y$ является основанием для выбора наиболее предпочтительного варианта проектирования КЭС.

Блок-схема рассмотренного алгоритма представлена на рис. 4.3.

Таким образом, специфика применения ФСА на ранних этапах НИР проявляется в определении обобщающей качественной оценки для характеристики альтернативных вариантов КЭС и выбора наиболее предпочтительного из них. Методический подход по применению ФСА предполагает выполнение двух укрупненных этапов анализа: на первом этапе определяется уровень значимости параметров, выбранных для характеристики анализируемого объекта, на втором – приоритет предлагаемого варианта КЭС по каждому из параметров и количественная оценка всех вариантов.

### 4.3.3. Экспресс-ФСА на основных этапах научно-исследовательской работы

Экспресс-ФСА, представляющий собой упрощенный вариант ФСА, позволяет оперативно (быстро) проверить выбранный вариант КЭС на оптимальность (например, в смысле простоты реализации, малых весогабаритных характеристик или высокой надежности). Методика проведения экспресс-ФСА базируется на определении зависимости между функциями проектируемой КЭС и утратами на ее создание [12, 19, 20, 30, 31, 51, 54, 62, 81].

Блок-схема алгоритма экспресс-ФСА дана на рис. 4.4 [29, 31, 64]. Кратко рассмотрим этот алгоритм. После выбора варианта КЭС (первый этап алгоритма) экспресс-анализ начинается с построения структурно-элементной модели, отражающей многоуровневую связь между его составными частями (структурными элементами). Пример такой модели показан на рис. 4.5, где $СЭ_1$, $СЭ_2$, $СЭ_3$, ..., $СЭ_{422}$ обозначены структурные элементы КЭС.

На 3-ем этапе алгоритм ФСА представляет собой функциональное моделирование, сущность которого состоит в представлении КЭС в виде совокупности внешних и внутренних функций и выявлении их связей на основе функционального подхода. Этап функционального моделирования состоит из следующих операций: формулирование функций, группировка и определение иерархий функций, графическое изображение функций и связей между ними в виде функциональной модели.

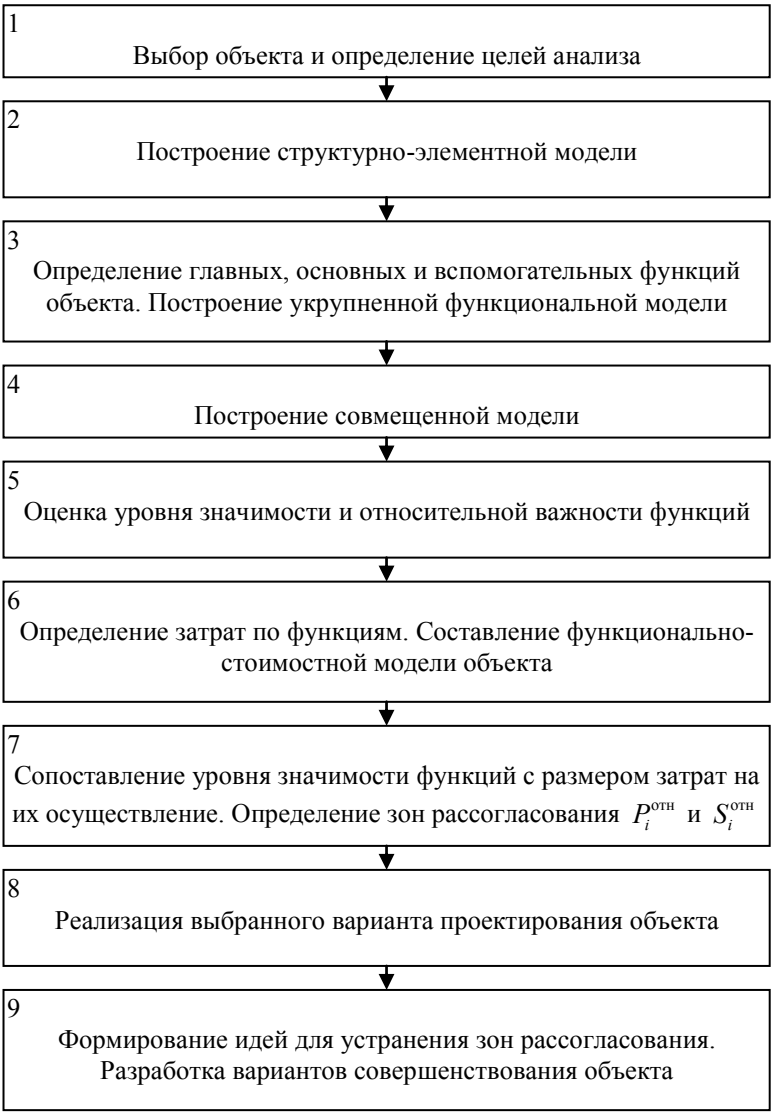


Рис. 4.4. Блок-схема алгоритма экспресс-ФСА

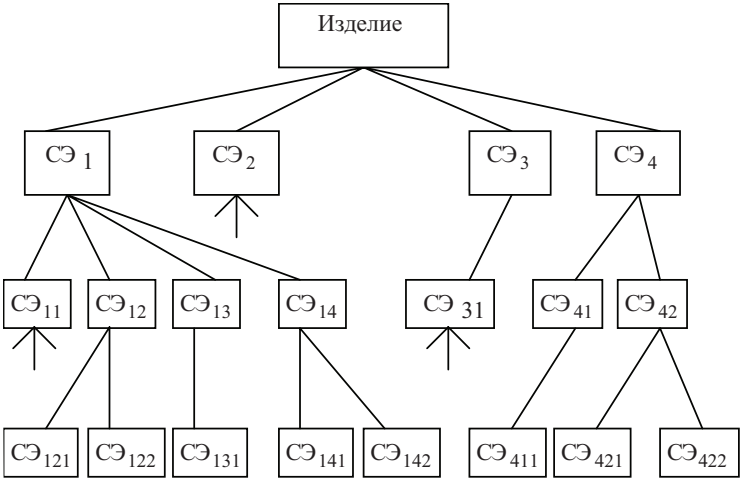


Рис. 4.5. Структурно-элементная модель

При формировании функций структуры КЭС каждой функции присваивается свой индекс, отражающий принадлежность к определенному иерархическому уровню модели и порядковый номер. Функциональная модель – это логико-графическое представление состава и взаимосвязей функций КЭС. Исходной информацией для построения функциональной модели служит структурно-элементная модель. Структурная схема функциональной модели дана на рис. 4.6.

Алгоритм функционального моделирования включает в себя следующие операции: формирование внешней (главной) функции $F_Г$ (верхний уровень модели), синтез основных функций $F_о$ и вспомогательных функций FB объекта. Таким образом, сущность функционального моделирования заключается в последовательном выведении функций определенного уровня из функций предыдущего уровня. То есть функции верхнего иерархического уровня будут являться отражением целей для функции нижестоящего уровня, которые, в свою очередь, являются средством обеспечения для функций вышестоящего уровня.

При построении функциональной модели изделия необходимо учесть принцип сбалансированности количественных характеристик функций каждого последующего и предыдущего уровня. Данное условие характеризует функциональную модель как систему, имеющую прямые и обратные связи.

Отметим, что максимально возможную степень детализации функций следует использовать при проведении корректирующей формы ФСА, когда каждая функция по уровням модели должна дифференцироваться до простейших функций, не требующих дальнейших действий для своей реализации.

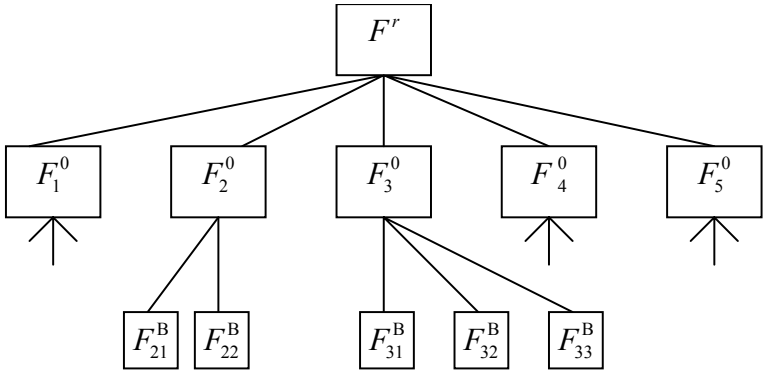


Рис. 4.6. Укрупненная функциональная модель

Кроме отдельного структурного и функционального описания КЭС, при проведении ФСА требуется их совместный анализ с помощью функционально-структурной модели, на основании которой определяется функциональность и полезность материальных элементов КЭС, распределение затрат по функциям и оценка качества их исполнения. Функционально-структурная модель строится путем «наложения» функциональной модели на структурную. Графическое изображение изделия, отражающее взаимосвязи элементов структурной и функциональной моделей, представлено на рис. 4.7 (даны те же обозначения, что и на рис. 4.5 и 4.6). Функционально-структурная модель может быть представлена в матричной форме, где по строкам матрицы оставляются материальные элементы КЭС, а по столбцам – его функции [29, 30, 31].

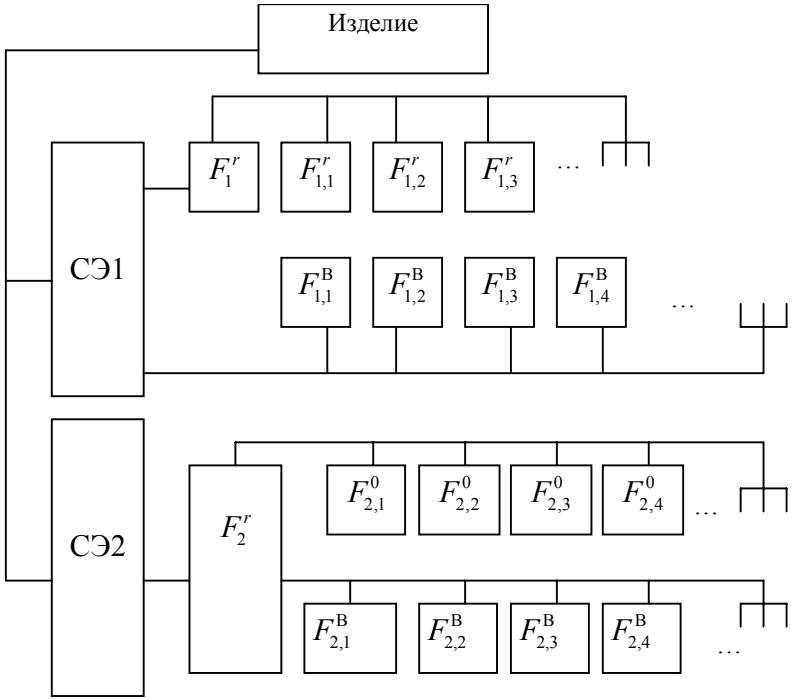


Рис. 4.7. Функционально-структурная модель

После этого дается оценка уровня значимости функций, необходимая для последующей увязки конструктивных и стоимостных параметров КЭС с функциональными требованиями, предъявляемыми к ней. Значения коэффициента весомости, определяемые по уровням функциональной модели, начиная с верхнего, устанавливаются экспертными методами по степени важности каждой функции для КЭС в целом. Следует учитывать при этом , что сумма значений коэффициентов весомости, соответствующих функций данного уровня, должна быть равна единице, а сами значения определяют частную весомость каждой функции КЭС. Упрощение расчетов при проведении экспресс-ФСА достигается за счет выделения только главной или основной функции.

Затраты на реализацию функций соответствуют материальным затратам, носителями которых являются структурные элементы КЭС.

Различают такие категории затрат на функции, как автономные и долевые.

Автономные затраты, предполагающие выполнение только одной функции каким-либо структурным элементом, определяются следующим образом:

$$SFj=S_{\text{мн}ij}, \tag{4.7}$$

где $S_{\text{мн}ij}$ – затраты на $i$-й материальный носитель $j$-й функции КЭС.

Если группа материальных носителей полностью обеспечивает определенную функцию, то автономные затраты находятся так:

$$S_{Fj} = \sum_{i=1}^{p} S_{мнij}, \tag{4.8}$$

где $p$ – число материальных носителей $j$-й функции.

Если структурный элемент КЭС является носителем нескольких функций, то долевые затраты на материальный носитель, отнесенные к данной функции, будут

$$S_{Fj} = \sum_{i=1}^{p} \alpha_{ij} S_{мнij}, \tag{4.9}$$

где $\alpha_{ij}$ – коэффициент участия $i$-го элемента на $j$-ю функцию; коэффициент $\alpha_{ij}$ определяется экспертным путем.

На последних этапах экспресс-ФСА проверяется правильность принимаемых решений путем соотнесения полезности (значимости) функций и размера затрат на их осуществление. Здесь проверяется отсутствие зон рассогласования, т. е. $\rho_i^{отн} \geq S_i^{отн}$, что свидетельствует о правильном выборе варианта структуры КЭС. В противном случае следует исключить неоптимальные структурные элементы из структуры КЭС путем снижения затрат или усиления данного носителя функции.

### 4.3.4. Функционально-стоимостной анализ при оптимизации структуры КЭС

Обобщая вышеизложенное в разд. 4.3.1 и .4.3.2, подчеркнем – выбор конкретных методов ФСА на этапах НИР и ОКР при создании КЭС должен обеспечивать следующие требования: быть относительно простыми применительно к получению оценки различных частных технических решений по этапам НИР; учитывать качественные раз-

личия в сравниваемых вариантах; отражать вклад технических решений в обеспечение потребительских свойств и функций объекта разработки; обеспечивать объективность оценки в условиях ограниченной исходной информации.

Учитывая перечисленные выше требования, алгоритм поиска оптимального (например, в смысле минимума стоимости или максимума надежности) технического решения можно представить схемой, изображенной на рис. 4.8.

На первом этапе ФСА выбирается объект для анализа. В качестве критерия выбора объекта ФСА могут использоваться технические, эксплуатационные и экономические показатели, в большей мере определяющие основную цель проведения работ по созданию новых образцов КЭС.

На втором этапе алгоритма при формировании дерева целей основываются на требованиях, сформированных в техническом задании. Реализация этого этапа предполагает наличие генеральной цели разработки КЭС, являющейся отражением для целей нижестоящего уровня. В свою очередь, предпосылкой и средством обеспечения по выполнению нижестоящих целей будет решение определенного ряда задач.

На третьем этапе ФСА строится структурная и функциональная модели КЭС, правила построения которых приведены в разд. 4.3.2.

На четвертом этапе ФСА для ранжирования функций, раскрывающих сущность разрабатываемой КЭС, и количественной оценки уровня их значимости может быть использован один из экспертных методов.

На пятом этапе ФСА используется метод морфологического ящика [30, 31, 64], заключающийся в построении всех возможных вариантов реализации исследуемой КЭС с целью определения возможных границ его изменения. В процессе использования этого метода сначала выявляются все альтернативные варианты реализации функций, а затем совокупность полученных вариантов сводится в морфологическую матрицу (морфологический ящик), в которой в строках размещается совокупность функций КЭС, а в столбцах матрицы отражаются принципиальные решения функциональных подсистем (структурных элементов) КЭС.

Пример такой морфологической матрицы дан в табл. 4.3 [60]. В морфологической матрице приведено 80 типовых вариантов (струк-

турных решений) узлов КЭС. Кратко поясним отдельные моменты использования таблицы. Например, при выборе седьмого морфологического признака (языка программирования) следует иметь в виду, что в списке исполнения указаны в начале аналоговые (или цифровые) сигналы, используемые в аналоговых и аналого-цифровых вариантах КЭС, а затем – машинные коды (или язык Ассемблера), используемый при реализации цифровых КЭС. Далее следуют универсальные языки высокого уровня (Бейсик, Квейсик, Фортран, Паскаль, Си, Ада). Заканчивается этот ряд специализированными языками высокого уровня (Лидер, ВАЛ).

Полный анализ КЭС требует рассмотрения его взаимодействия с потребителем информации (например, роботом). Для этой цели вводится восьмой морфологический параметр – «тип робота и другие характеристики потребителя информации». Учет характеристик потребителя информации оказывает влияние на структуру (или в крайнем случае на выходной блок) КЭС. Например, в случае применения КЭС для очувствления робота первого поколения (программного, с позиционной системой управления) зрительная система должна иметь блоки связи с роботом, отличающиеся от соответствующих блоков связи КЭС с интеллектуальным роботом. Это обусловлено прежде всего количеством и скоростью передачи информации КЭС потребителю информации.

Технические решения из морфологической матрицы выбираются на основе их функциональной ценности путем выбора соответствующей клетки матрицы, находящейся на пересечении строк и столбцов и отражающей характеристики способов реализации или иных функций. Например, одно из возможных решений 1.3 $\Rightarrow$ 2.4 $\Rightarrow$ 3.6 $\Rightarrow$ 4.5. $\Rightarrow$ 5.10 $\Rightarrow$ 6.7 $\Rightarrow$ 7.7 $\Rightarrow$ 8.5 соответствует многопроцессорной КЭС с телевизионным датчиком ТИ, предназначенной для контроля топологии печатных плат. При использовании морфологической матрицы можно выявить неожиданные технические решения и принципиально новые задачи. В качестве примера рассмотрим техническую реализацию 1.9 $\Rightarrow$ 2.9 $\Rightarrow$ 3.5 $\Rightarrow$ 4.3. $\Rightarrow$ 5.4 $\Rightarrow$ 6.9 $\Rightarrow$ 7.2 $\Rightarrow$ 8.5. Она соответствует КЭС, обеспечивающей контроль качества монтажа навесными элементами (микросхемами, конденсаторами, резисторами), отличающимися друг от друга в основном по цвету.

Рис. 4.8. Блок-схема алгоритма ФСА при решении оптимизационных задач

Такая КЭС может содержать цветное: телевизионное ТИ, формирователь ТИ и блок хранения ЭИ на оптическом управляемом транспаранте, причем формирователь и анализатор меры близости может быть выполнен в виде оптического коррелятора цветных изображений или многоканального цифрового анализатора составляющих цвета. В этой КЭС программы реализованы на языке Ассемблера, а для смещения электронной платы перед датчиком ТИ использован механизм сканирования. Таким образом реализуется шестой этап ФСА.

На седьмом этапе при оценке затрат на реализацию функций следует иметь ввиду их разную природу возникновения, а следовательно, и разные методы расчета. Затраты, возникающие на этапах НИР по реализации КЭС относятся к капитальным (единовременным) и определяются стоимостью разработки корреляционной зрительной системы. Для упрощения расчета затрат на реализацию функции элемента КЭС можно использовать «автономный» метод, допускающий такое упрощение, как выполнение материальным носителем только одной функции. На этом этапе ФСА необходимо также определить качество исполнения функций. Отметим, что показатели качества и показатели затрат являются чаще всего противоречивыми. Сведение этих противоречий к минимуму путем оптимизации соотношений составляет основную цель седьмого этапа ФСА.

Оценка степени исполнения функций дается в баллах, которые назначаются экспертным путем при сравнении вариантов КЭС по следующей шкале: разрабатываемый вариант лучше – 3 балла, варианты равнозначны – 2 балла, разрабатываемый вариант менее удовлетворителен – 1 балл.

Для характеристики и последующего сравнения вариантов разработки КЭС используются комплексные показатели качества, определяемые выражением (4.6).

Если в основу выбора окончательного варианта КЭС положить единство подхода только к стоимостной оценке различных вариантов, то они окажутся несопоставимыми по самым личным параметрам. Поэтому для повышения степени реальности стоимостной оценки могут быть введены поправочные коэффициенты, определяемые экспертным методом и учитывающие, например, возможное увеличение затрат на относительное снижение какого-либо параметра или модификации конструкции КЭС, а также вероятность достижения требуемых параметров КЭС при эксплуатации в реальных условиях.

Таблица 4.3

## Морфологическая матрица вариантов узлов (подсистем) КЭС

| Индекс пара-метра | Морфологический признак (параметр) | Вид исполнения | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | Характеристики рабочей зоны (РЗ) Или объекта контроля (т.е. ОР) | Стационарная РЗ; ОР: металлические детали [236, 401] | Подвижный конвейер; ОР: металлические детали [401] | Печатная плата, фотошаблон (топография) [251, 252, 257] | ертеж, схема, ект, шрифт аркировка 54,478] | Подвесной конвейер, крупногабаритные детали [401] | РЗ оптического микроскопа; ОР: полупроводник овые кристаллы [339, 340] | Микросхема (топология) [250, 338] | РЗ станка с ЧПУ [479, 480] | Электронная плата с навесными элементами (цветными) [486] | Листовой материал (для раскроя) [401 |
| 2 | Датчик ТИ | Оптический (объектив), черно-белый [243, 257] | Телевизионный (видимый), черно-белый [292, 332] | Телевизионный (инфра-красный), черно-белый [468] | Радиолокацион ный[229, 239, 241] | Оптико-локационный, черно-белый [223] | Стереотелевизи онный, черно-белый [354, 401, 463] | Голографически й, черно-белый [426, 427] | Цветной, оптический (объектив) [401, 458] | Цветной, телевизионны й [229, 458] | Электронный растровый микроскоп [289, 401] |
| 3 | Формирователь ТИ | На ЭЛТ [223, 228, 230, 471] | На ЗЭЛТ [230, 270, 470] | На ЗЭЛТ с электронным поворотом [223, 471] | На оптически управляемом транспаранте [223, 418, 444, 445] | Устройство комбинация ЗЭЛТ и оптического управляемого транспаранта [444] | Буферное ЗУ [223, 401] | ОЗУ [401, 472] | Электронный диск [407, 408] | На регистре ПЗС-линейке, ФД-линейке [223, 401] | На ПЗС-матрице, ФД-линейке [397-399] |
| 4 | Блок хранения ЭИ | Фотопленка [223, 234] | Маска [234] | На оптически управляемом транспаранте [223, 418, 444, 445] | ОЗУ [401, 472] | ППЗУ, ОЗУ [401, 473] | На ПЗС-линейке, регистре [223, 401, 473] | На ФД-линейке [223, 401, 474] | На ПЗС-матрице [223, 401, 474] | На ФД-линейке [223, 401, 474] | Электронный диск [407, 408] |
| 5 | Формирователь меры близости | ОК Берджера, Ковашнова-Армана, Майера-Эпплера [239,241] | Динамический оптический коррелятор [168, 464] | ОК с пространственной фильтрацией помех [223] | ОК анализа цветных изображений [401] | Электронный коррелятор [223, 471] | ОК формулирующий структурные функции [375, 382,386] | Цифровой параллельный видеопроцессор [259, 402] | Цифровой цветной спецпроцессор на универсальной микро-ЭВМ [297] | Цифровой спецпроцессо р с «жесткой» структурой [223] | Цифровой спецпроцессор на уни-версальной микроЭВМ [223, 401] |
| 6 | Анализатор меры близости | Поисковый аналоговый [239, 241, 477] | Поисковый цифровой [223, 243, 409] | Беспоисковый аналоговый [223, 239, 241, 477] | еспоисковый цифровой [223, 243, 416] | Аналоговый, адаптивный, (перестраиваемый) [223,477] | Цифровой, адаптивный, (перестраиваем ый) [223] | Цифровой, параллельный видео-процессор [259] | Многоканальны й, аналоговый анализатор составляющих цвета [401] | Многоканальн ый, цифровой (микропроцес сорный) анализатор составляющи х цвета [401] | Многоканальны й, цифровой (на универсальной микро-ЭВМ) анализатор составляющих цвета [299, 302] |
| 7 | Язык программирования | Аналоговые (цифровые) сигналы, [243] машинные коды [304] | Ассемблер [306, 307] | Бейсик [306] | Квейсик [308, 309] | Фортран [312] | Паскаль [305, 311] | Си [310] | Ада [313] | Лидер [43, 476] | ВАЛ [292] |
| 8 | Тип робота (системы управления (СУ) робота) или другие характеристики потребителя информации | Программный, позиционная (с «жесткой структурой) СУ [430, 432, 483, 507] | Программный, контурная (с «жесткой структурой) СУ [430, 432] | Программный, позиционная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ [430, 432, 483, 507] | Программный, контурная (на универсальной микро-ЭВМ) СУ [484, 491] | Механизм сканирования (программный, позиционная СУ на универсальной микроЭВМ) [250] | Очувственный (на основе ИЛП), позиционная (на микропроцессо ре СУ) [285] | Очувственный (на основе ТВС), позиционная (на микропроцессор е СУ) [236, 476] | Интеллектуальн ый (бинокулярная КЭС), многопроцессор ная СУ [401, 464] | Автомат (для раскроя), позиционная много-процессорная СУ [401] | Станок с ЧПУ (с управляющей микроЭВМ) [479, 480] |

На восьмом этапе ФСА изучаются возможные варианты КЭС с точки зрения перспективности их конструктивно-технологических позиций и функциональной необходимости параметров проектируемой КЭС, а также с учетом общей суммы финансирования данной разработки.

Экономический эффект от реализации какого-либо альтернативного варианта КЭС образуется как сумма полезных действий множества элементов, представляющих этот объект НИР как систему. В итоге получается потребительская стоимость, имеющая качественно новые свойства. При этом индивидуальные функционально необходимые издержки определяются по степени участия конкретного элемента в формировании результирующего полезного эффекта. Таким образом, применение системного, функционального и стоимостного подходов обуславливает синтез оптимального варианта КЭС с учетом его целевой направленности.

На последнем (девятом) этапе ФСА критерием для окончательного выбора варианта проектируемой КЭС является минимум затрат на его разработку и коэффициент удельных затрат на единицу качества.

В заключение следует отметить, что описанная методика проведения ФСА создает основу для целенаправленного совершенствования объектов НИР. Например, выявление причинной обусловленности наличия избыточных параметров у материальных носителей конкретных функций будет указывать пути и средства для их исключения. Далее сравнительный анализ затрат на реализацию функций определит технико-экономическую целесообразность принятых технических решений и направления их совершенствования. Наконец, исследование способов реализаций и создание множества альтернатив по материальным носителям функций позволит сформулировать банк идей и технических решений КЭС и «увязать» с их стоимостной оценкой, которые могут быть успешно использованы в дальнейшей научно-технической деятельности.

### 4.3.5. Примеры применения функционально-стоимостного анализа при проектировании КЭС

#### *4.3.5.1. Выбор способа контроля качества изделий на основе метода расстановки приоритетов*

В настоящее время наиболее распространенными являются такие методы контроля качества изделий, как электрический, тепловой, радиационный и оптический. Сложно сразу выбрать какой-либо один из методов для практического применения в разрабатываемой КЭС. Поэтому возникает задача определения наиболее целесообразного из существующих методов контроля качества. Таким образом, объектами ФСА являются методы контроля, а цель проведения анализа заключается в обосновании выбора одной из альтернатив.

Для реализации сформулированной выше задачи целесообразно использовать один из методов экспертных оценок – метод расстановки приоритетов, алгоритм которого описан в разд. 4.3.2.

Технику вычислений по методу расстановки приоритетов рассмотрим на следующем примере [18 – 20, 63, 81].

Допустим, что стоит задача выбора наиболее предпочтительного из всех существующих методов контроля качества печатных плат. Как уже указывалось, наиболее распространенными являются следующие методы: $y_1$ – электрический; $y_2$ – тепловой; $y_3$ – радиационный; $y_4$ – оптический.

Для характеристики выбранных методов контроля определим систему частных критериев: $x_1$ – степень универсальности применяемого метода, которая определяется возможностью проверки различных качественных характеристик объектов самого разного, типоразмера; $x_2$ – степень унификации средств контроля; $x_3$ – производительность методов при контроле качества объектов; $x_4$ – разрешающая способность; $x_5$ – надежность метода контроля; $x_6$ – характер контроля, т. е. способ связи и воздействия на контролируемый объект.

Следующим этапом анализа является составление экспертами систем сравнения по каждому критерию $x$: $x_1 > x_2$, $x_1 < x_3$, $x_1 < x_4$, $x_1 < x_5$, $x_1 > x_6$, $x_2 < x_3$, $x_2 < x_4$, $x_2 < x_5$, $x_2 < x_6$, $x_3 = x_4$, $x_3 = x_5$, $x_3 < x_6$, $x_4 > x_5$, $x_4 > x_5$, $x_5 > x_6$.

Затем строится матрица предпочтительности (табл. 4.4), в которой знаки >, =, < заменяются коэффициентами предпочтительности. В

рассматриваемом примере в качестве коэффициентов предпочтительности приняты значения 1,5; 1,0; 0,5 соответственно.

Таблица 4.4

| $X_i$ | $X_j$ | | | | | | Первый шаг | | Второй шаг | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $\sum a_{ij}$ | $\rho_i^{рп}$ | $\rho_{ij}^{рп}$ | $\rho_i^{отн}$ |
| $X_1$ | 1,0 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 5,5 | 0,153 | 29,75 | 0,146 |
| $X_2$ | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 3,5 | 0,097 | 19,75 | 0,197 |
| $X_3$ | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 6,5 | 0,180 | 37,75 | 0,185 |
| $X_4$ | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 8,0 | 0,222 | 46,75 | 0,229 |
| $X_5$ | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 7,0 | 0,194 | 39,25 | 0,192 |
| $X_6$ | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 5,5 | 0,153 | 30,25 | 0,151 |
| | Сумма | | | | | | 36,0 | 1,0 | 204,0 | 1,0 |

В этой таблице предусматривается последовательное определение абсолютных и относительных значений отдельных параметров, а затем – абсолютных и относительных приоритетов параметров. Причем $b_i$ рассчитываются как и суммы $a_{ij}$ значений, представленных в табл. 4.4, то есть $b_1$ =5,5; $b_2$ =3,5; $b_3$ =6,5; $b_4$ =8,0; $b_5$ =7,0; $b_6$ =5,5. А значения $\rho_i^{рп}$, $\rho_{ij}^{рп}$, и $\rho_i^{отн}$ находятся по формулам (4.3) (4.5).

Затем следует этап, в котором эксперты составляют системы сравнения вариантов по каждому критерию $x$ и определяют уровень их значимости. Для этого также применяется метод расстановки приоритетов с той лишь разницей, что объектами сопоставления теперь являются не частные критерии $x$, а варианты решений $y$. Задача решается по приведенной выше схеме: составляется система сравнений и на ее основе синтезируется квадратная матрица предпочтительности по каждому варианту.

Получив данные о весах всех вариантов по отдельным частным критериям, можно их представить в соответствующих рядах (табл. 4.5).

На последнем этапе анализа по формуле (4.6) определяется качественная оценка $Q_{y_i}$, позволяющая дать характеристику выбранных методов контроля: $Q_{y_1}$ =0,167; $Q_{y_2}$ =0,294; $Q_{y_3}$ =0,251; $Q_{y_4}$ =0,317.

В результате сравнения полученных значений комплексных показателей $Q_{y_i}$ можно сделать вывод о том, что оптимальным (в смысле универсальности, степени унификации, производительности, разре-

шающей способности, надежности и воздействия на контролируемый объект) является оптический метод контроля.

Таблица 4.5

**Значения приоритетов по вариантам**

| Значения приоритетов по критериям | Значения приоритетов по вариантам | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $\rho_{y_1}^{отн}$ | $\rho_{y_2}^{отн}$ | $\rho_{y_3}^{отн}$ | $\rho_{y_4}^{отн}$ |
| $\rho_1^{отн}$ ($\rho_1^{отн} = 0,146$) | 0,222 | 0,328 | 0,222 | 0,429 |
| $\rho_2^{отн}$ ($\rho_2^{отн} = 0,097$) | 0,157 | 0,275 | 0,208 | 0,360 |
| $\rho_3^{отн}$ ($\rho_3^{отн} = 0,185$) | 0,152 | 0,283 | 0,283 | 0,283 |
| $\rho_4^{отн}$ ($\rho_4^{отн} = 0,229$ | 0,152 | 0,283 | 0,283 | 0,283 |
| $\rho_5^{отн}$ ($\rho_5^{отн} = 0,192$) | 0,152 | 0,283 | 0,283 | 0,283 |
| $\rho_6^{отн}$ ($\rho_6^{отн} = 0,151$) | 0,183 | 0,317 | 0,183 | 0,317 |

### *4.3.5.2. Предварительный выбор элементов структуры КЭС на основе экспресс-ФСА*

Покажем особенности применения экспресс-ФСА на примере предварительного выбора одного из элементов цифровой КЭС – буферного запоминающего устройства.

Цель ФСА заключается в том, чтобы определить, существуют ли зоны отрицательного дисбаланса по функциям, которые выполняются определенными структурными элементами БЗУ.

Структурно-элементная модель БЗУ выполнена в виде иерархического графа с дроблением до первого уровня структуризации (рис. 4.9) [18 – 20, 62, 81].

На следующей операции проведения экспресс-анализа осуществляется формирование функций и построение укрупненной функциональной модели устройства (рис. 4.10). Функциональная модель содержит два уровня.

На первом уровне модели находится главная функция, определяющая назначение данного ($F_Г$) – передача видеоинформации от ДТИ к ЭВМ.

Второй уровень модели представляется основными функциями:

$F_{11}^0$ – передача информации с ДТИ в БП;

$F_{21}^{0}$ – синхронизация работы БП и СА;

$F_{31}^{0}$ – обеспечение адресации записываемой информации в БП;

$F_{41}^{0}$ – запись (считывание) информации с ДТИ через БПО в БП;

$F_{51}^{0}$ – вывод информации из БП на монитор;

$F_{61}^{0}$— управление работой записи и считывания информации в БП;

$F_{71}^{0}$— согласование схемы адресации и ЭВМ.

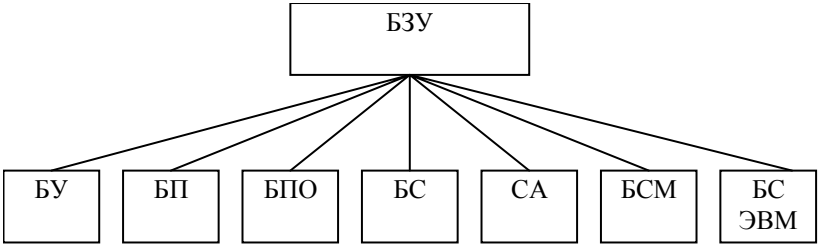


Рис. 4.9. Структурно-элементная модель буферного запоминающего устройства

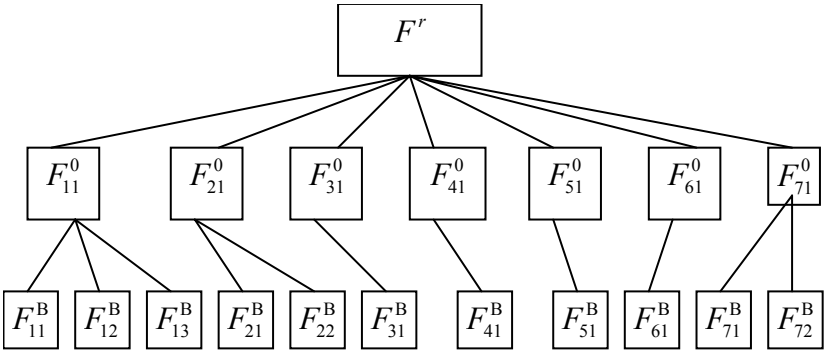


Рис. 4.10. Функциональная модель буферного запоминающего устройства

На третьем уровне укрупненной функциональной модели расположены вспомогательные функции: $F_{11}^{B}$ – усиление видеосигнала; $F_{12}^{B}$ – разделение (отделение) видеосигнала от строчного и кадрового синхроимпульсов; $F_{13}^{B}$ – оцифровывание видеосигнала; $F_{21}^{B}$ – синхронизация БПО; $F_{22}^{B}$ – синхронизация БУ; $F_{31}^{B}$ – синхронизация записи информации в БП; $F_{41}^{B}$ – считывание информации из ЭВМ через блок связи с ЭВМ в оперативное запоминающее устройство БП; $F_{51}^{B}$ – контроль вывода информации; $F_{61}^{B}$ – синхронизация схемы адресации и блока памяти; $F_{71}^{B}$ – адресация записи информации; $F_{72}^{B}$ – управление записью и считыванием информации.

С учетом содержания функций, выполняемых элементами разрабатываемого БЗУ, строится совмещенная модель (табл. 4.6).

Таблица 4.6

**Функции элементов БЗУ**

| Элементы конструкций устройства | Содержание выполняемой функции | Код функции | Вид функции |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Блок предварительной обработки (БПО) | Передает информацию с ДТИ в БП | $F_{11}^{0}$ | Основная |
| | Усиливает видеосигнал | $F_{11}^{B}$ | Вспомогательная |
| | Отделяет видеосигнал от строчного и кадрового синхроимпульсов | $F_{12}^{B}$ | Вспомогательная |
| | Оцифровывает видеосигнал | $F_{13}^{B}$ | Вспомогательная |
| Блок синхронизации (БС) | Обеспечивает синхронизацию работы БП и СА | $F_{21}^{0}$ | Основная |
| | Синхронизует БПО | $F_{21}^{B}$ | Вспомогательная |
| | Синхронизует БУ | $F_{22}^{B}$ | Вспомогательная |
| Схема адресации (СА) | Обеспечивает адресацию записываемой информации в БП | $F_{31}^{0}$ | вспомогательная |
| | Синхронизует запись информации в БП | $F_{31}^{B}$ | вспомогательная |

Продолжение табл. 4.6

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Блок памяти (БП) | Осуществляет запись и считывание информации с ДТИ через БПО<br>Считывает информацию с ЭВМ | $F_{41}^{0}$<br>$F_{41}^{B}$ | Основная<br>Вспомогательная |
| Блок связи с монитором (БСМ) | Обеспечивает вывод информации из БП на монитор | $F_{51}^{0}$ | Основная |
| Блок управления (БУ) | Осуществляет управление работой записи и считывания информации в БП<br>Обеспечивает синхронизацию СА и БП | $F_{61}^{0}$<br>$F_{61}^{B}$ | Основная<br>Вспомогательная |
| Блок связи с ЭВМ (БС ЭВМ) | Осуществляет согласование СА и ЭВМ<br>Осуществляет адресацию записи информации<br>Управляет записью и считыванием информации | $F_{71}^{0}$<br>$F_{71}^{B}$<br>$F_{72}^{B}$ | Основная<br>Вспомогательная<br>Вспомогательная |

Для определения весомости каждой функции в обеспечении главной внешней функции БЗУ использованы экспертные оценки. Уровень значимости функций определяется с использованием метода расстановки приоритетов.

Таблица 4.7

**Оценка уровня значимости основных функций БЗУ**

| $X_i$ | $X_j$ | | | | | | | Первый шаг | | Второй шаг | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $\sum a_{ij}$ | $\rho_i$ | $\rho_{ij}$ | $\rho_i^{отн}$ |
| $X_1$ | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 5,0 | 0,102 | 32,0 | 0,098 |
| $X_2$ | 1,5 | 1,0 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 7,0 | 0,143 | 47,5 | 0,146 |
| $X_3$ | 1,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 7,0 | 0,143 | 45,5 | 0,139 |
| $X_4$ | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 10,0 | 0,204 | 68,5 | 0,210 |
| $X_5$ | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 5,0 | 0,102 | 34,0 | 0,104 |
| $X_6$ | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 7,5 | 0,153 | 49,0 | 0,151 |
| $X_7$ | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 7,5 | 0,153 | 49,0 | 0,151 |
| | Сумма | | | | | | | 49,0 | 1,0 | 325,5 | 1,0 |

Для упрощения выполнения расчетов обозначим через $X_i^Э$ только соответствующие основные функции, выполняемые элементами разрабатываемого БЗУ:

$$X_1^Э - F_{11}^O,\ X_2^Э - F_{21}^O,\ X_3^Э - F_{31}^O,\ X_4^Э - F_{41}^O,\ X_5^Э - F_{51}^O,\ X_6^Э - F_{61}^O,\ X_7^Э - F_{71}^O.$$

Результаты экспертной оценки значимости функций ($\rho_i^{отн}$) представлены в табл. 4.7.

На следующем этапе проводимого экспресс-анализа определяется удельной вес расходов по всем структурным элементам БЗУ. На этом этапе анализа удельный вес затрат может быть также определен на основе метода расстановки приоритетов.

Распределение затрат по функциям БЗУ выполнялось «автономным» способом [16]. Дальнейший анализ на основе экспресс-ФСА проводится с целью выявления зон рассогласования между относительной значимостью функций ($\rho_i^{отн}$) и затратами на их реализацию ($S_i^{отн}$). Результаты расчетов представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

**Коэффициенты весомости основных функций БЗУ и относительные затраты на их реализацию**

| Оценка функций | Основные функции | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $F_{11}^0$ | $F_{21}^0$ | $F_{31}^0$ | $F_{41}^0$ | $F_{51}^0$ | $F_{61}^0$ | $F_{71}^0$ |
| Уровень значимости функций, $\rho_i^{отн}$ | 0,098 | 0,146 | 0,139 | 0,210 | 0,104 | 0,151 | 0,151 |
| Уровень относительных стоимостных затрат на функции, $S_i^{отн}$ | 0,20 | 0,05 | 0,05 | 0,50 | 0,05 | 0,05 | 0,10 |

Наличие дисбаланса по функциям $F_{11}^0$ и $F_{41}^0$ значительно уменьшает область поиска и позволяет перейти к решению задач, связанных с определением резерва экономии с учетом локализации зоны излишних затрат и формулировкой требований по устранению технических причин избыточных стоимостных задач.

*4.3.5.3. Выбор оптимального варианта структуры элементов КЭС*

Покажем особенности выбора оптимального варианта структуры КЭС так же, как и в разд. 4.3.5.2 на примере БЗУ. То есть объектом проведения ФСА является структура (структурная схема конструкции) БЗУ. Цель анализа – разработка вариантов структуры БЗУ и выбор из них оптимального (например, в смысле простого, менее громоздкого, дешевого и надежного) из всех альтернатив [18 – 20, 64, 81].

Основываясь на генеральной цели – создать новую конструкцию БЗУ – строится дерево целей и задач.

Дерево целей представляет собой форму описания требований к предъявляемых к конструкции разрабатываемого БЗУ. На первом уровне дерева целей – «генеральная цель», формируемая исходя из главного функционального назначения и области применения разрабатываемого БЗУ. Второй уровень – «цели», предъявляемые к разрабатываемому БЗУ, и условия, при которых возможно достижение «генеральной цели». Третий уровень – задачи», определяемые путем детализации требований и элементов второго уровня исходя из возможных вариантов схемных конструктивных решений.

Анализируя назначение БЗУ, можно выделить его следующие основные задачи: $F_1$ – осуществление передачи информации с телекамеры в блок памяти и обеспечение помехоустойчивости работы системы (функцию выполняет БПО); $F_2$ – обеспечение синхронизации и надежности работы всех блоков (функцию обеспечивает БС); $F_3$ – осуществление формирования адреса, по которому записывается или считывается информация (функцию выполняет СА); $F_4$ – осуществление управлением работой записи и считывания информации в блок памяти (функцию выполняет БУ); $F_5$ – обеспечение приема информации с телекамеры, запоминание информации и выдача ее на ЭВМ (функцию выполняет БП); $F_6$ – ввод информации с ЭВМ в устройство и обеспечение надежности работы всего блока (функцию выполняет БС ЭВМ); $F_7$ – выполнение функций визуального контроля и обеспечение удобства в работе с устройством (функцию выполняет БСМ).

Используя метод расстановки приоритетов, определяется уровень значимости перечисленных выше функций по отношению к генеральной функции БЗУ в целом. Результаты расчетов представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

**Уровни значимости функций БЗУ**

| Оценка функций | Код основных функций | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | $F_5$ | $F_6$ | $F_7$ |
| Уровень значимости функций, $\rho^{отн}$ | 0,100 | 0,126 | 0,159 | 0,175 | 0,210 | 0,11 | 0,124 |

Разрабатываемое БЗУ определяется характерным для него набором основных функций, каждую из которых осуществляет какой-либо один структурный элемент (материальный носитель). Далее по этим функциям выбираются различные варианты их исполнения и записываются в форме матрицы (морфологической таблицы).

Рассмотрим три варианта исполнения функций БЗУ: I – БЗУ, реализованное на стандартных узлах (приборах), осуществляет обработку контурной видеоинформации; II – БЗУ, реализованное на стандартных узлах (приборах), осуществляет обработку полутоновой видеоинформации; III – разрабатываемый вариант БЗУ (табл. 4.10).

Морфологический анализ матрицы структурных решений (табл. 4.10) позволяет выделить возможный состав разрабатываемого объекта.

Формирование вариантов разработки БЗУ осуществлялось на основе комбинирования позиций морфологической карты путем выбора одного из элементов по каждой строке матрицы (см. табл. 4.10). Проанализировав преимущества и недостатки и проверив на совместимость элементов, получаем следующие варианты реализации БЗУ, которые могут быть условно записаны так:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{43}$ | $P_{53}$ | $P_{63}$ | $P_{73}$ |
| II | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{43}$ | $P_{53}$ | $P_{63}$ | $P_{72}$ |
| III | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{41}$ | $P_{53}$ | $P_{61}$ | $P_{73}$ |
| IV | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{43}$ | $P_{52}$ | $P_{61}$ | $P_{72}$ |
| V | $P_{11}$ | $P_{21}$ | $P_{31}$ | $P_{42}$ | $P_{51}$ | $P_{61}$ | $P_{72}$ |
| VI | $P_{12}$ | $P_{22}$ | $P_{32}$ | $P_{41}$ | $P_{52}$ | $P_{61}$ | $P_{71}$ |

Здесь римскими цифрами указаны варианты реализаций БЗУ, полученные в результате сочетаний функций, указанных в табл. 4.10.

Отприведенной выше матрицы реализации БЗУ имеются следующие отличия. Например, первый и второй варианты отличаются реализациями ($P_{72}$, $P_{73}$) по выводу видеоинформации на монитор (т. е. второй вариант позволяет выводить на монитор цветную видеоинформацию, а первый – только черно-белую). Этими же функциями

отличаются второй и третий варианты БЗУ, которые имеют также отличия в реализации блока памяти (реализации $P_{51}$, $P_{52}$). Таким образом, из приведенной матрицы и табл. 4.10 устанавливаются все отличия вариантов (от первого до седьмого).

Таблица 4.10

| Код основных функций | Варианты решений | | |
|---|---|---|---|
| | I | II | III |
| $F_1$ | $P_{11}$ – блок выделения контуров | $P_{12}$ – аналого-цифровой преобразователь | $P_{13}$ – разрабатываемый блок предварительной обработки |
| $F_2$ | $P_{21}$ – стандартный генератор сигналов | $P_{22}$ – набор стандартных генераторов сигналов | $P_{23}$ – разрабатываемый блок синхронизации |
| $F_3$ | $P_{31}$ – стандартный блок адресации ЭВМ | $P_{32}$ – набор стандартных блоков (дешифратор, генератор, регистры) | $P_{33}$ – разрабатываемый блок адресации |
| $F_4$ | $P_{41}$ – стандартный блок управления ЭВМ | $P_{42}$ – стандартный блок управления ЭВМ | $P_{43}$ – разрабатываемый блок управления |
| $F_5$ | $P_{51}$– стандартный блок ОЗУ ЭВМ | $P_{52}$ – блок памяти –ОЗУ данной ЭВМ (режим прямого доступа к памяти ЭВМ) | $P_{53}$ – разрабатываемый блок памяти |
| $F_6$ | $P_{61}$ – стандартные интерфейсы | $P_{62}$ | $P_{63}$ – разрабатываемый блок связи с ЭВМ |
| $F_7$ | $P_{71}$ – блок вывода бинарной информации | $P_{72}$ – блок вывода цветной информации | $P_{73}$– разрабатываемый блок связи с монитором |

Каждый вариант представляет собой взаимосвязанную совокупность элементов – носителей, функционально ориентированных на выполнение основной цели создания БЗУ. При этом, учитывая, что в данном случае все варианты реализации функций совместимы и при существующем уровне техники конструктивно и технологически реализуемы, оставим их для дальнейшего рассмотрения.

Для того чтобы выбрать наиболее целесообразный вариант решения, необходимо по каждому из них определить качественную оценку исполнения функций. Оценка исполнения варианта функции рассчитывается как произведение уровня значимости функции на уровень ее исполнения в баллах. Результаты расчетов представлены в табл. 4.11.

Степень исполнения функций в баллах определялась методом коллективной экспертизы. Расчет окончательной оценки выбранных к реализации вариантов БЗУ представлен в табл. 4.12. Комплексный показатель качества предлагаемых к разработке вариантов БЗУ представляет собой сумму расчетных значений оценок исполнения функций. Например, для первого варианта такой показатель будет складываться из следующих величин: 0,300; 0,378; 0,477; 0,513; 0,630; 0,330; 0,248.

Таблица 4.11

**Оценка качества исполнения функций по вариантам**

| Код функций | Уровень значимости функций | Код варианта исполнения функций | Уровень исполнения функций, балл | Оценка исполнения варианта функций |
|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | 0,100 | $P_{11}$ | 1 | 0,100 |
| | | $P_{12}$ | 2 | 0,200 |
| | | $P_{13}$ | 3 | 0,300 |
| $F_2$ | 0,126 | $P_{21}$ | 2 | 0,252 |
| | | $P_{22}$ | 1 | 0,126 |
| | | $P_{23}$ | 3 | 0,378 |
| $F_3$ | 0,159 | $P_{31}$ | 2 | 0,318 |
| | | $P_{32}$ | 1 | 0,159 |
| | | $P_{33}$ | 3 | 0,477 |
| $F_4$ | 0,171 | $P_{41}$ | 1 | 0,171 |
| | | $P_{42}$ | 2 | 0,342 |
| | | $P_{43}$ | 3 | 0,513 |
| $F_5$ | 0,210 | $P_{51}$ | 1 | 0,210 |
| | | $P_{52}$ | 3 | 0,630 |
| | | $P_{53}$ | 3 | 0,630 |
| $F_6$ | 0,110 | $P_{61}$ | 2 | 0,220 |
| | | $P_{63}$ | 3 | 0,330 |
| $F_7$ | 0,124 | $P_{71}$ | 1 | 0,124 |
| | | $P_{72}$ | 3 | 0,372 |
| | | $P_{73}$ | 2 | 0,248 |

Таблица 4.12

**Оценка качества комбинированных вариантов конструкции БЗУ**

| Номер варианта | Состав варианта | | | | | | | Обобщенная оценка варианта |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{43}$ | $P_{53}$ | $P_{63}$ | $P_{73}$ | 2,876 |
| II | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{43}$ | $P_{53}$ | $P_{63}$ | $P_{72}$ | 3,000 |
| III | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{41}$ | $P_{53}$ | $P_{61}$ | $P_{73}$ | 2,424 |
| IV | $P_{13}$ | $P_{23}$ | $P_{33}$ | $P_{43}$ | $P_{52}$ | $P_{61}$ | $P_{72}$ | 2,890 |
| V | $P_{11}$ | $P_{21}$ | $P_{31}$ | $P_{42}$ | $P_{51}$ | $P_{61}$ | $P_{72}$ | 1,814 |
| VI | $P_{12}$ | $P_{22}$ | $P_{32}$ | $P_{41}$ | $P_{52}$ | $P_{61}$ | $P_{71}$ | 1,630 |

По результатам обобщенной оценки вариантов (см. табл. 4.12), согласно условиям выбора дальнейшему анализу должны подлежать три варианта (I, II и IV), соответствующие качественной реализации конструкции БЗУ.

Укрупненная схема стоимости блоков, обеспечивающих основные функции, позволила определить затраты на их исполнение по выбранным, наиболее предпочтительным вариантам (табл. 4.13).

Таблица 4.13

**Оценка затрат на реализацию функций по вариантам**

| Код функций | Код вариантов исполнения функций | | | Стоимостная оценка вариантов исполнения функций, руб. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Вариант первый | Вариант второй | Вариант четвертый | Вариант первый | Вариант второй | Вариант четвертый |
| $F_1$ | $P_{13}$ | $P_{13}$ | $P_{13}$ | 20,0 | 10,0 | 20,0 |
| $F_2$ | $P_{23}$ | $P_{23}$ | $P_{23}$ | 300,0 | 1000,0 | 300,0 |
| $F_3$ | $P_{33}$ | $P_{33}$ | $P_{33}$ | 1000,0 | 200,0 | 1000,0 |
| $F_4$ | $P_{43}$ | $P_{43}$ | $P_{43}$ | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| $F_5$ | $P_{53}$ | $P_{53}$ | $P_{52}$ | 350,0 | 350,0 | 800,0 |
| $F_6$ | $P_{63}$ | $P_{63}$ | $P_{61}$ | 300,0 | 300,0 | 30,0 |
| $F_7$ | $P_{73}$ | $P_{72}$ | $P_{72}$ | 50,0 | 250,0 | 250,0 |

Анализ затрат на осуществление всех функций (табл. 4.13) позволяет выявить среди них те, которые обуславливают основную долю издержек. Это может быть использовано для решения задачи по снижению стоимости разработки БЗУ.

Сумма затрат по всем функциям дает общую стоимостную оценку вариантов $S_i$: $S_1$ =2120,0; $S_2$ =2320,0; $S_4$ =2500,0.

Критерием выбора варианта реализации блока БЗУ является минимум функциональных затрат $S_i$ и удельных затрат на единицу комплексного показателя качества $k_{уд_i}$: $k_{уд_i}$ = 737,13; $k_{уд_i}$ =773,33; $k_{уд_i}$ =865,05.

Как следует из приведенного расчета, лучшими характеристиками обладает первый (или разрабатываемый третий) вариант БЗУ. Это также подтверждает сравнительный анализ по экономическим и техническим параметрам БЗУ.

Таким образом, детальный ФСА возможных вариантов позволяет выбрать оптимальный вариант исполнения БЗУ.

## 4.4. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

### 4.4.1. Оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на разработку и эксплуатацию КЭС

Требование к точностным характеристикам ОТИЗ определяет стоимость $C$ изготовления системы и последующие затраты (потери) П на ее эксплуатацию. Величина $N$=$C$+П может служить характеристикой общих затрат на изготовление и эксплуатацию ОТИЗ. Допустим, что точностные характеристики ОТИЗ определяются величиной дисперсии $\sigma^2$, с которой вычисляются линейные координаты объекта манипулирования. Тогда $N$=$N(\sigma^2)$. Поставим задачу отыскания допустимой погрешности оценки координат при минимизации затрат на изготовление и эксплуатацию КЭС, т. е.

$$\sigma^2_{доп} = \underset{\sigma^2}{extr}\, N\left(\sigma^2\right) \qquad (4.10)$$

Для решения уравнения (4.10) применим метод безусловной оптимизации [38, 48], для чего вид целевой функции $N(\sigma^2)$ заменим аналитическим выражением. Определим вид функций $C(\sigma^2)$ и $\Pi(\sigma^2)$, сумма которых задает функцию $N(\sigma^2)$. Предполагаем, что оценки величин $\Delta\hat{x}$, $\Delta\hat{y}$, $\hat{\alpha}_i$ распределены по нормальному закону [24]. Из-

вестны методы прогнозирования стоимости при наличии аналога выпускаемой аппаратуры (РЭА) [57], но из-за отсутствия аналогов КЭС, внедренных в производство, представляется целесообразной оценка стоимости $C(\sigma^2)$ на основе следующих двух очевидных предположений о ее свойствах [24, 58, 68]:

1) $\lim\limits_{\sigma^2 \Rightarrow 0} C\left(\sigma^2\right) \Rightarrow \infty$; $\lim\limits_{\sigma^2 \Rightarrow \infty} C\left(\sigma^2\right) \Rightarrow 0$;

2) функция $C(\sigma^2)$ монотонно убывает, причем уменьшение $\sigma^2$ приводит к сложности и, следовательно, повышению стоимости КЭС. В качестве функции с отмеченными свойствами выберем следующую функцию:

$$C\left(\sigma^2\right) = \frac{K}{\sigma^2},$$

где $K$ – коэффициент, характеризующий возможную плату за единичное повышение точности определения искомых координат. Величины $K$ и $(\sigma^2)$ зададим следующим образом: $K = C_{\text{пр}}\sigma_1^2$; $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$, где $\sigma_1^2$ – дисперсия определения искомых координат, обусловленная внутренними шумами системы, характеризуемая предельной (максимальной) стоимостью $C_{\text{пр}}$; $\sigma_2^2$ – дисперсия определения координат, обусловленная наличием помех на ТИ. Таким образом, в качестве функции $C(\sigma^2)$ будем использовать следующее соотношение:

$$C\left(\sigma^2\right) = \frac{C_{\text{пр}}\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}. \tag{4.11}$$

Вид этой функции будет различным для КЭС, планируемых к выпуску в серийном производстве, и для КЭС, запускаемых в конструкторскую проработку и опытное производство. В первом случае стоимость $C(\sigma^2)$, как и любой другой РЭА, определяется расходами, а во втором случае зависит от себестоимости $C(\sigma^2)$ конструкторской разработки, включающей и затраты на научные исследования. Определим вид функции потерь $\Pi=\Pi(\sigma^2)$. Если КЭС способна распознавать ОР и оценивать его положение, то можно предложить использование функции потерь, в которой при правильном распознавании средние потери пропорциональны дисперсии и параметрам:

$$\Pi\left(\sigma^2\right) = K_n\sigma^2 = \frac{\Pi_{\max}}{\sigma^2_{\max}}\sigma^2, \qquad (4.12)$$

$K_n$ – угловой коэффициент, равный отношению максимальных потерь $\Pi_{\max}$ к максимальной дисперсии $\sigma^2_{\max}$, т. е., если КЭС имеет погрешность $\sigma^2_{\max}$, то затраты на ее эксплуатацию максимальные, что скажется в итоге на производительности потребителя информации (например, транспортного или промышленного робота – ПР) и обслуживаемого им технологического процесса. Для обеспечения качества и эффективного выполнения технологических операций необходимо, чтобы допустимая погрешность $\sigma^2_{доп}$ КЭС выбиралась из условия $\sigma^2_{доп} < \sigma^2_{\max}$. Максимальные потери $\Pi_{\max}$ определяются следующим образом:

$$\Pi_{\max} = \sum_{i=1}^{n=4}\Pi_i,$$

где $\Pi_1$ – стоимость ремонтно-восстановительных работ при обслуживании ПР; $\Pi_2$ – стоимость ремонтно-восстановительных работ для оборудования, обслуживающего ПР; $\Pi_3$ – потери, обусловленные простоем ПР и обслуживающего оборудования; $\Pi_4$ – затраты, связанные с ремонтно-восстановительными работами по объекту распознавания и рабочей зоне.

Итак, согласно выражениям (4.11) и (4.12) функция $N\left(\sigma^2\right)$, характеризующая общие затраты по применению КЭС, запишется в следующем виде:

$$N\left(\sigma^2\right) = C\left(\sigma^2\right) + \Pi\left(\sigma^2\right) = \frac{C_{пр}\sigma_1^2}{\sigma^2} + \frac{\Pi_{\max}}{\sigma^2_{\max}}\sigma^2,$$

а задача определения искомых точностных характеристик КЭС ставится следующим образом:

$$\sigma^2_{доп} = \arg\min_{\sigma^2} N\left(\sigma^2\right). \qquad (4.13)$$

Предполагая, что функция $N\left(\sigma^2\right)$ унимодальная, вычислим производную от $N\left(\sigma^2\right)$ по $\left(\sigma^2\right)$, приравняем ее к нулю и разрешим относительно $\left(\sigma^2\right)$. В результате получим

$$\sigma^2_{\text{доп}} = \left(\frac{C_{\text{пр}}\sigma_1^2\sigma^2_{\max}}{\Pi_{\max}}\right)^{1/2}. \qquad (4.14)$$

Расчеты показывают, что КЭС обладает погрешностью $\left(\sigma^2\right)$=9% от размера $R$ сравниваемых изображений, имеет стоимость $C_1\left(\sigma^2\right)$=1,3·10$^3$ \$. При этом предельные затраты оцениваются как $C_{\text{пр}}$ =1,8 103 руб. В этом расчете учитывается ожидаемая экономическая эффективность внедрения в промышленность ПР, очувствленного КЭС. Подставляя эти данные (4.11), получим

$$C\left(\sigma^2\right) = 11,7\cdot 10^3\left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2\right)^{-1}\ \$. \qquad (4.15)$$

При конкретизации функции потерь предположим, что условные значения $\Pi_{\max}$ равны 3·10$^3$ \$ и 8,5·10$^3$ \$ для $\sigma^2_{\max}$ = 4%. Далее, предполагая, что $\sigma_1^2$ =0,65%, и подставляя полученные данные в (4.12) и (4.15), найдем функцию затрат $N\left(\sigma^2\right)$. Графики этой функции приведены на рис. 4.11: здесь 1 соответствует $\Pi_{\max}$ =3·10$^3$ \$, а 2 – $\Pi_{\max}$ = =8,5·10$^3$ \$. Координаты экстремумов функции $N\left(\sigma^2\right)$ характеризуют допустимые дисперсии $\sigma^2_{g1}, \sigma^2_{g2}$ и соответствующие им минимумы затрат $N_1$, $N_2$. Как следует из рис. 4.11, увеличение затрат на эксплуатацию КЭС приводит к более жестким требованиям по точностным характеристикам КЭС.

### 4.4.2. Инженерный (приближенный) расчет КЭС

*4.4.2.1. Оптический расчет КЭС*

При оптическом расчете КЭС необходимо определить параметры оптического коррелятора и связать их с характеристиками рабочей зоны.

Расчет КЭС, использующих оптические корреляторы типа Майера – Эпплера, Берджера, подробно изложены в монографиях [6, 27]. В этой связи ограничимся рассмотрением оптического коррелятора Лапушкина – Лустберга, применение которого перспективно в КЭС из-за того, что в нем исключается необходимость вращения интегрирующих линз при угловом совмещении сравниваемых изображений. Интерес к таким оптическим корреляторам вызван тем, что у них не возникает погрешности в оценки координат из-за поворота оптической системы. Этим требованиям соответствует модифицированный оптический коррелятор Лапушкина – Лустберга, представленный на рис. 4.12 [24], где введены следующие обозначения: $P_{ти}$ – плоскость текущего изображения; $P_{эи}$ – плоскость эталонного изображения; $H$ – главная плоскость линзы; $P_{F_1}$, $P_F$ – соответственно передняя и задняя фокальные плоскости; $f$ – фокусное расстояние линзы; $O_1$ $O_5$ – оптическая ось; 1 – расстояние по оптической оси между плоскостями $P_{F_1}$ и $P_{эи}$; $T$ – расстояние по оптической оси между плоскостями $P_{ти}$ и $H$.

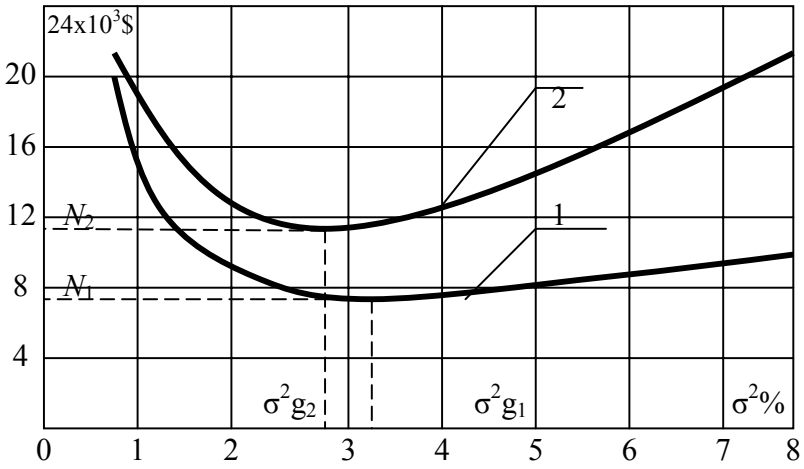


Рис. 4.11. Графики функций общих затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией КЭС

Определим связь между смещением $\Delta x^{'}$ ТИ относительно ЭИ и смещением $\Delta\xi$ ВКФ в плоскости $P_{F_1}$. Из подобия треугольников $A_1M_1M_3$ и $A_2M_2M_3$ имеем

$$\Delta x^{'} = \frac{T}{f}(x_m - O_3M_3), \qquad \text{или} \quad \frac{x_m - \Delta}{\Delta x^{'}} = \frac{f}{T} \tag{4.16}$$

где $x_m$ – расстояние между началом системы координат, связанной с плоскостью $P_F$, и центром тяжести $i$-го элемента изображения, смещенного в рабочей зоне; $\Delta = O_3M_3$ – расстояние между началом системы координат, связанной с плоскостью $P_{\text{ти}}$ (или $P_F$), и координатами $i$-го элемента изображения, не подверженного смещению:

$$\Delta x = \Delta x^{'} + \Delta = \Delta + \frac{T}{f}(x_m - \Delta). \tag{4.17}$$

Очевидно, что

$$\Delta x = \Delta\left(1 - \frac{T}{f}\right) + \frac{T}{f}x_m, \tag{4.18}$$

или

$$tg\alpha_2 = tg\alpha_4 = \frac{x_m}{f}, \tag{4.19}$$

Учитывая, что

$$\frac{\Delta}{f-1} = tg\alpha_5 = tg\alpha_4 = tg\alpha_2,$$

получаем

$$x_m = ftg\alpha_2 = f\frac{\Delta\xi}{l}; \tag{4.20}$$

$$\Delta = \left(f - l^{'}\right)tg\alpha_2 = \left(f - l^{'}\right)\frac{\Delta\xi}{l}.$$

Поставляя (4.20) в (4.18), находим

$$\Delta = \left(f - l'\right) tg\alpha_2 \left(1 - \frac{T}{f}\right) + Ttg\alpha_2 = \left(f - l' + l'\frac{T}{f}\right) tg\alpha_2 =$$
$$= \left(f - l' + l'\frac{T}{f}\right)\frac{\Delta\xi}{l'} = \left[f + l'\left(\frac{T}{f} - 1\right)\right]\frac{\Delta\xi}{l}. \qquad (4.21)$$

Из (4.17) имеем

$$\Delta x' = \left[f + l'\left(\frac{T}{f} - 1\right)\right]\frac{\Delta\xi}{l} - \Delta. \qquad (4.22)$$

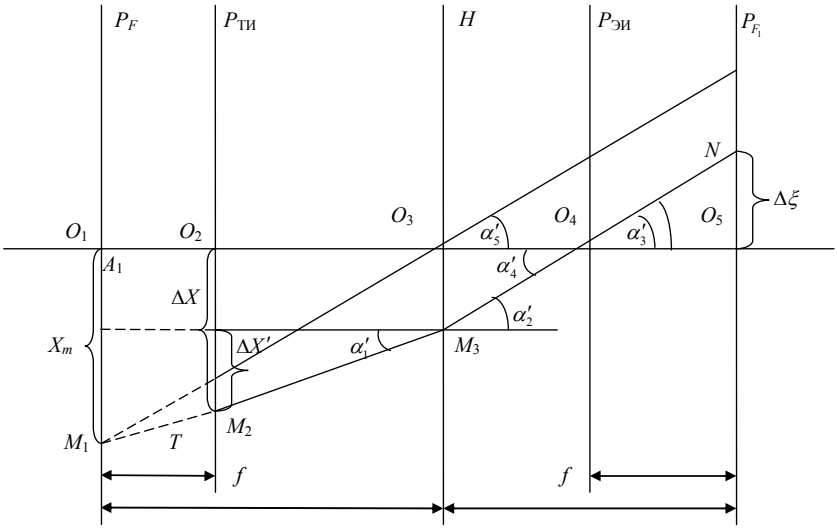


Рис. 4.12. Основные плоскости и параметры модифицированного оптического коррелятора Лапушкина – Лустберга

Из (4.21) можно определить $T$ в следующем виде:

$$T = \left[l'\left(\frac{\Delta x}{\Delta\xi} + 1\right) - f\right]\frac{f}{l'}, \qquad (4.23)$$

или

$$\left[ l' \left( \frac{\Delta x' + \Delta}{\Delta \xi} + 1 \right) - f \right] \frac{f}{l'}. \qquad (4.24)$$

Аналогично определяется величина $T$ для смещения и по координате $O_y$.

Таким образом, пользуясь (4.22) и (4.24), можно выбрать параметры $f$ и $T$ корректора для допустимых $\Delta x'$ и $\Delta \xi$.

Оценим теперь связь между параметрами оптического коррелятора и характеристиками рабочей зоны. Размер изображения объекта на экране накопителя (индикатора) ТИ можно вычислить, пользуясь формулой [24, 44]

$$l_и = \frac{l f_{об} И_р}{H_е Ф_р}, \qquad (4.25)$$

где $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива ДТИ; $H_е$ – высота размещения ДТИ; $И_р$, $Ф_р$ – размеры растров индикатора ТИ и фотоприемника ДТИ. При «жестком растре» или когда размеры растров индикатора ТИ $H_р$ и фотоприемника телекамеры $Ф_р$ совпадают соответственно с размерами индикатора $И_э$ и светочувствительной поверхностью фотоприемника телекамеры $Ф_c$, величина $l_и$ определяется по формуле:

$$l_и = \frac{l f_{об} И_э}{H_е Ф_с}. \qquad (4.26)$$

Из этой формулы можно приближенно оценить параметры коррелятора.

Смещение $\Delta x_и$, $\Delta y_и$ изображения на экране индикатора ТИ находим, пользуясь выражением (4.25):

$$\Delta x_и = \frac{f_{об} H_р \Delta x}{H_е Ф_р}; \quad \Delta y_и = \frac{f_{об} H_р \Delta y}{H_е Ф_р}, \qquad (4.27)$$

где $\Delta x, \Delta y$ – смещения объекта в рабочей зоне. Подставляя (4.27) в известные выражения [6, 27] для координат главного максимума ВКФ, получим следующие соотношения:

$$\Delta\xi = \frac{fИ_p f_{об}\Delta x}{H_e \Phi_p T}; \quad \Delta\eta = \frac{fИ_p f_{об}\Delta y}{H_e \Phi_p T}. \tag{4.28}$$

Эти выражения справедливы при использовании модифицированных корреляторов Берджера и Майера – Эпплера. Причем геометрические размеры второго коррелятора должны также удовлетворять следующему условию:

$$M = \frac{И_{эи}}{И_з} = \frac{f}{f+T}, \tag{4.29}$$

где $И_{эи}$ – линейный размер ЭИ.

Если подставить выражения (4.27) в формулу (4.22), то получим соотношения, связывающие параметры модифицированного оптического коррелятора Лапушкина – Лустберга и характеристики рабочей зоны.

*4.4.2.2. Расчет емкости памяти КЭС*

*Определение объема видеоинформации, перерабатываемой КЭС.*

Известно [73], что возможное количество комбинаций $C_1$ формируемых (воспроизводимых) цветных изображений при прочих равных параметрах значительно (в $n_{цв} = m_1^{2M_И N_И}$ раз) превышает возможное количество $C_2$ формируемых черно-белых изображений.

Действительно,

$$n_{цв} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{m_1^{3M_И N_И}}{m_1^{M_И N_И}} = \left(m_1^{M_и N_и}\right)^2, \tag{4.30}$$

где $n_{цв}$ – отношение величин $C_1$ и $C_2$; $m_1$ – число градаций яркости изображений; $M_И$, $N_И$ – соответственно число элементов в строчке и число строк в кадре изображения [35].

Причем количество информации $I_ц$, содержащейся в цветном изображении, в три раза превышает количество информации $I_{чб}$, содержащейся в изображении черно-белом, т. е. [36]

$$\frac{I_ц}{I_{чб}} = \frac{\log_2 C_1}{\log_2 C_2} = 3\log_2 m_1^{M_и N_и}. \tag{4.31}$$

Если известно число $N_э$ элементов разложения изображения, число $N_к$ анализируемых кадров изображения, число $m_1$ градаций яркости и число $m_2$ цветов изображения (или число $m_3$, цветовых тонов и чис-

ло $m_4$, характеризующее насыщенность цвета), то количество текущей информации (или число двоичных разрядов) $I_0$, которое необходимо переработать (запомнить), определяется путем модификации известного выражения [77] в следующем виде [22, 24]:

$$I_o = N_k N_э \left(\log_2 m_1 + \log_2 m_2\right) = N_k M_э \left(\log_2 m_1 + \log_2 m_3 + \log_2 m_4\right). \quad (4.32)$$

При использовании каких-либо методов сжатия информации (преобразования изображения в точечное или контурное) в выражении (4.32) число $N_э$ нужно вычислять

$$N_э = \frac{S_и}{S_э} = \frac{l'b'}{S_э}, \quad (4.33)$$

где $S_и$, $S_э$ – площадь, занимаемая изображением, и площадь одного элемента изображения; $l'$, $b'$ – соответственно длина и ширина контура изображения.

Подчеркнем здесь, что формула (4.32) является обобщающей, с помощью которой можно вычислить количество информации $I_0$, соответствующее двумерным, трехмерным или цветным изображениям, а также определить $I_0$, соответствующее типу КЭС (аналоговые, аналого-цифровые и цифровые). Вычисленные значения $I_0$ по формуле (4.32) приведены в табл. 4.14 (при $N_k = 2$). В таблице первая строка ($m_1 = 2$) $I_0$ соответствует бинарным выражениям. При пользовании таблицей следует иметь в виду, что при определении количества информации, соответствующей одному кадру изображения, необходимо представлять $I_{0/2}$, а при оценке количества информации, соответствующей любому количеству кадров, – $\frac{I_0 N_к}{2}$.

*Расчет емкости памяти аналоговых КЭС.* Емкость памяти аналоговых (а также аналого-цифровых и цифровых) КЭС определятся простой формулой

$$ПА = ПТИ + ПЭИ + ПАР, \quad (4.34)$$

где ПТИ, ПЭИ, ПАР – емкости памяти, необходимые для хранения (записи) ТИ, ЭИ и алгоритма работы (включая основные программы, подпрограммы, программы цикла и т. п.). Причем для аналоговых КЭС алгоритм работы реализуется в аппаратном («жестком») виде.

Таблица 4.14

**Количества информации различных изображений**

| Черно белые изображения | | | | | | | | Цветные (монохромные) изображения, $m_2$=8 | | | | | | Цветные изображения: цветовой тон, $m_3$=8; насыщенность цвета, $m_4$=8 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Количество информации $I_0$, Кбит | | | | | | Количество информации $I_0$, Кбит | | | | | | Количество информации $I_0$, Кбит | | | | | |
| Размерность изображения $N_э$ | | 32x32 | 64x64 | 128 x 128 | 256 x 256 | 512 x 512 | 1024 x 1024 | 32x32 | 64x64 | 128 x 128 | 256 x 256 | 512 x 512 | 1024 x 1024 | 32x32 | 64x64 | 128 x 128 | 256 x 256 | 512 x 512 | 1024 x1 024 |
| Число градаций яркости изображения, m | 2 | 2 | 8 | 32 | 128 | 512 | 2048 | 4 | 16 | 64 | 256 | 1024 | 4096 | 6 | 24 | 96 | 384 | 1536 | 6144 |
| | 4 | 4 | 16 | 64 | 256 | 1024 | 4096 | 8 | 32 | 128 | 512 | 2048 | 8192 | 16 | 64 | 256 | 1024 | 4096 | 16384 |
| | 8 | 6 | 24 | 96 | 384 | 1536 | 6144 | 12 | 48 | 192 | 768 | 3072 | 12288 | 18 | 72 | 288 | 1152 | 4608 | 18432 |
| | 16 | 8 | 32 | 128 | 512 | 2048 | 8192 | 14 | 56 | 224 | 896 | 3584 | 14336 | 20 | 80 | 320 | 1280 | 5120 | 20480 |
| | 32 | 10 | 40 | 160 | 640 | 2560 | 10240 | 16 | 64 | 256 | 1024 | 4096 | 16384 | 22 | 88 | 352 | 1408 | 5632 | 22528 |
| | 64 | 12 | 48 | 192 | 768 | 3072 | 12288 | 18 | 72 | 288 | 1152 | 4608 | 18432 | 24 | 96 | 384 | 1536 | 6144 | 24576 |
| | 128 | 14 | 56 | 224 | 896 | 3584 | 14336 | 20 | 80 | 320 | 1280 | 5120 | 20480 | 26 | 104 | 416 | 1664 | 6656 | 26624 |
| | 256 | 16 | 64 | 256 | 1024 | 4096 | 16384 | 22 | 88 | 352 | 1408 | 5632 | 22528 | 28 | 112 | 448 | 1792 | 7168 | 28672 |
| | 512 | 18 | 72 | 288 | 1152 | 4608 | 18432 | 24 | 96 | 384 | 1536 | 6144 | 24576 | 30 | 120 | 480 | 1920 | 7680 | 30720 |
| | 1024 | 20 | 80 | 320 | 1280 | 5120 | 20480 | 26 | 104 | 416 | 1664 | 6656 | 26624 | 32 | 128 | 512 | 2048 | 8192 | 32760 |

Общее число запоминаемых (анализируемых) кадров ТИ и ЭИ зависит от типа КЭС и определяется следующими формулами:

$$N_{\text{ЧБП}} = N_K^{\text{ТИ}} + N_K^{\text{ЭИ}}; \quad (4.35)$$

$$N_{\text{ЧБО}} = N_K^{\text{ТИ}} + N_K^{\text{ЭИ}}; \quad (4.36)$$

$$N_{\text{ЧБО}} = 2N_K^{\text{ТИ}} + N_K^{\text{ЭИ}}; \quad (4.37)$$

$$N_{\text{ЧБО}} = 2N_K^{\text{ТИ}}; \quad (4.38)$$

$$N_{\text{ЧБО}} = 3(N_K^{\text{ТИ}} + N_K^{\text{ЭИ}}); \quad (4.39)$$

$$N_{\text{ЦП}} = N_K^{\text{ТИ}} + N_K^{\text{ЭИ}}; \quad (4.40)$$

$$N_{\text{ЦП}} = 3N_K^{\text{ТИ}} + N_K^{\text{ЭИ}}; \quad (4.41)$$

$$N_{\text{ЦП}} = N_K^{\text{ТИ}} + 3N_K^{\text{ЭИ}}; \quad (4.42)$$

$$N_{\text{ЦП}} = 3(N_K^{\text{ТИ}} + N_K^{\text{ЭИ}}); \quad (4.43)$$

где $N_{\text{ЧБП}}$, $N_{\text{ЧБО}}$, $N_{\text{ЦП}}$ – соответственно общее число кадров, использованных в КЭС, анализируемых черно-белые плоские, черно-белые объемные и цветные плоские изображения; $N_K^{\text{ТИ}}, N_K^{\text{ЭИ}}$ – соответственно число кадров ТИ и ЭИ. Формулы (4.35) – (4.43) соответствуют следующим конструкциям КЭС: (4.35) – с одним ДТИ и одним коррелятором; (4.36) – с одним ДТИ и одним коррелятором; (4.37) – с двумя ДТИ и одним коррелятором (с дополнительным ЭИ); (4.38) – с двумя ДТИ и одним коррелятором (с двумя накопителями ТИ); (4.39) – с тремя ДТИ и тремя оптическими корреляторами или тремя ДТИ и одним коррелятором; (4.40) – с одним ДТИ и одним коррелятором; (4.41) – с одним ДТИ (с БЗУ для запоминания трех ТИ, соответствующих основным цветам сложного изображения) и одним коррелятором; (4.42) – с одним ДТИ и трехканальным коррелятором; (4.43) – с одним (с накопителем ТИ, формирующим три изображения, соответствующие основным цветам сложного ТИ) и тремя корреляторами.

Число кадров ЭП, требуемых для запоминания эталонных изображений различной размерности и цветности, находится

$$N_R^{\text{ЭИ}} = \frac{I_O}{n_\sigma} = \frac{S_\Sigma^{\text{ЭИ}}}{S_i^{\text{ЭИ}}}, \qquad (4.44)$$

где $n_\sigma$ – число бит информации, необходимой для запоминания одного кадра ЭИ; $S_\Sigma^{\text{ЭИ}}$ – общая площадь всех кадров ЭИ; $S_i^{\text{ЭИ}}$ – площадь $i$-го кадра ЭИ.

Емкость памяти ПТИ, необходимая для формирования ТИ, рассчитывается по формуле (4.39), учитывая при этом необходимое число кадров изображений (4.35) – (4.43). Аналогично оценивается емкость памяти ПТИ, которая требуется для записи ЭИ. Причем здесь необходимо учитывать требуемое число кадров (4.44), а также требуемую разрешающую способность материала ЭИ [15, 27].

В заключение укажем, что при расчете емкости памяти КЭС аналого-цифрового типа используется комбинированная методика: основная часть рассчитывается как для аналоговых КЭС, а другая – как для цифровых.

*Оценка емкости памяти цифровых КЭС*. В зависимости от способа ввода информации в память микрокомпьютера, на базе которого реализуется цифровая КЭС, данные системы делятся на два типа: системы со считыванием изображения в буферное ЗУ (программный ввод) и системы со считыванием изображения прямым доступом к памяти микрокомпьютера [76]. Если используется первый режим ввода информации, то емкость памяти ПЦ находится при известных емкостях памяти буферного запоминающего устройства ПБЗУ и микроЭВМ ПЭВМ следующим образом:

$$\text{ПЦ} = \text{ПБЗУ} + \text{ПЭВМ}. \qquad (4.45)$$

Очевидно, что при использовании второго режима ввода информации величина ПЦ определяется в виде ПЦ = ПЭВМ. При этом емкость памяти микроЭВМ, которую можно отвести для загрузки программного обеспечения зрительной системы для первого и второго режимов считывания изображения, находится соответственно по следующим формулам:

$$\text{П}_1 = \text{П}_\text{Ц} + \text{П}_\text{ОС}, \qquad \text{П}_2 = \text{П}_\text{Ц} - \text{П}_\text{ОС} - \text{П}_\text{И}, \qquad (4.46)$$

где $\text{П}_\text{ОС}$ – емкость памяти, необходимая для записи операционной системы; $\text{П}_\text{И}$ – емкость памяти, требуемая для записи изображения [24].

Из (4.46) видно, что первый режим ввода изображения более экономичен и дает возможность отводить большую емкость памяти под программы обработки изображений, т. е. позволяет иметь программное обеспечение для решения более сложных задач.

Емкость памяти ОЗУ ЭВМ для размещения средств программного обеспечения определяется известным выражением (без учета емкости памяти $П_{ОС}$) [69]:

$$П_{ПО} = \sum_{k=1}^{k} П_{РПК} + П_{СП} + П_{ПТК}, \qquad (4.47)$$

где $П_{РПК}$ – емкость памяти, занимаемая $k$-й рабочей программой; $П_{СП}$ – емкость памяти, занимаемая стандартными программами; $П_{ПТК}$ – емкость памяти, занимаемая программами обеспечения прерываний, тестовыми программами и константами.

Выражение (4.45) можно конкретизировать в следующем виде:

$$П_{Ц} = П_{БЗУ} + П_{ОЗУ} + П_{ВП} + П_{ППЗУ} + П_{ЭД} + П_{ВН}, \qquad (4.48)$$

где $П_{БЗУ}$, $П_{ОЗУ}$, $П_{ВП}$, $П_{ППЗУ}$, $П_{ЭД}$, $П_{ВН}$ – емкость памяти БЗУ, ОЗУ видеопроцессора, $П_{ПЗУ}$ (суммарная), электронного диска и внешних накопителей (на гибких или жестких магнитных дисках).

Здесь стоит отметить, что для исключения возможности эффективного использования памяти БЗУ (не допускающего наличия пустых (лишних) ячеек) следует соблюдать условия:

$$M^{БЗУ} \le M^{ДТИ}; \quad N^{БЗУ} \le N^{ДТИ}, \qquad (4.49)$$

где $M^{БЗУ}$, $N^{БЗУ}$ – соответственно число элементов разложения изображения в строке и столбце буферного ЗУ; $M^{ДТИ}$, $N^{ДТИ}$ – соответственно число элементов разложения изображения в строке и столбце датчика ТИ.

Причем для считывания квадратного растра изображения необходимо выполнить следующее условие: $M^{БЗУ} = N^{БЗУ}$.

Если известны число $N_И$, $M_И$ точек отсчетов (пикселов), число $g$ двоичных разрядов, отводимых на один отсчет, и число кадров изображения, то емкость памяти (4.48), необходимая для заполнения цифровым изображением, определяется следующим образом [69]:

$$П_{ЦП} = N_К M_И N_И g, \qquad (4.50)$$

где $M_И = X_{max} / \Delta X$, $N_И = Y_{max} / \Delta Y$; $X_{max}$, $Y_{max}$ – максимальные (предельно допустимые) линейные размеры считываемого

изображения; $\Delta X$, $\Delta Y$ – разрешающая способность оценки линейных размеров объектов.

Используя (4.50), легко вычислить емкость памяти БЗУ и ЭД, т. е.

$$\Pi_{\text{БЗУ}} = N_K M^{\text{БЗУ}} N^{\text{БЗУ}} g; \quad \Pi_{\text{ЭД}} = N_K M^{\text{ЭД}} N^{\text{ЭД}} g, \tag{4.51}$$

где $M^{\text{ЭД}}$, $N^{\text{ЭД}}$ – соответственно число элементов разложения изображения в строке и столбце электронного диска.

Емкости памяти видеопроцессора, ППЗУ и внешних накопителей определяются объемом перерабатываемой видеоинформации, их реализацией и вычисляются по известным методикам [32, 43]. При этом следует учитывать, что в случае использования его в качестве синхронизатора (например, при записи изображения с ДТИ в БЗУ) необходимо определить адреса ППЗУ (при известных пикселах анализируемой информации) для записи видеосигнала в БЗУ. Воспользовавшись рекомендациями, изложенными в [77], предложим следующую методику определения адресов ППЗУ.

На рис. 4.13 представлена одномерная реализация видеосигнала (по строке). $T_C$ обозначает период развертки строки; tgc – время считывания строки; $t_{cc}$ – длительность строчного синхронного импульса; $t_{rc}$ – длительность гасящего синхроимпульса; $t_{1c}$ длительность сдвига гасящего импульса относительно информационной части строки; $t_{2c}$ – длительность сдвига синхронизирующего импульса относительно гасящего; $T_{\text{пс}}$ – длительность цикла работы ППЗУ за время строчной развертки (для сечения видеосигнала по кадру реализация может быть охарактеризована аналогичными параметрами соответственно $T_K, t_{gk}, t_{kc}, t_{rk}, t_{1k}, t_{2k}, t_{nk}$).

Вначале определим время $T_{\text{gc}}$, $T_{\text{gk}}$ считывания одного элемента изображения по строке и кадру по следующим формулам:

$$T_{gc} = \frac{t_{gc}}{N_{\text{эс}}}; \; T_{gk} = \frac{t_{gk}}{N_{\text{эк}}}, \tag{4.52}$$

где $N_{\text{эс}}$ – число элементов (бит информации) в строке; $N_{\text{эк}}$ – число элементов (бит информации) в кадре.

Величину $t_{\text{gc}}$ определить несложно. Например, при формировании квадратного растра кадра изображения $t_{\text{gc}}$ вычисляется следующим образом:

$$t_{gc} = K_1 K_2 t_{\text{ИС}} = \frac{3}{4}\frac{N_{\text{ПС}}}{N_{\text{ИС}}}(T_C - t_{rc}), \qquad (4.53)$$

где $K_1$ – коэффициент, характеризующий отношение сторон растра изображения; $K_2$ – коэффициент, характеризующий отношение информационных строк $N_{\text{ПС}}$ в кадре к числу используемых $N_{\text{ИС}}$ в кадре; $t_{\text{ИС}}$ – длительность информационной части строки.

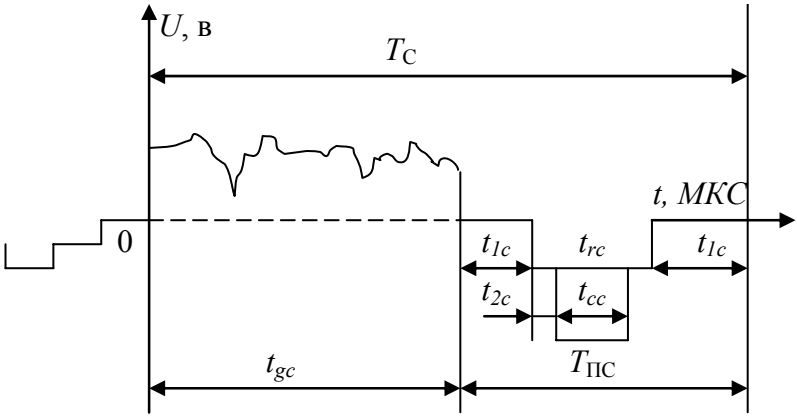


Рис. 4.13. Одномерная реализация видеосигнала (по строке)

Время считывания кадра определяется соотношением

$$t_{gk} = t_{\text{ИК}} K_2 = \left(T_K - t_{rk}\right) K_2, \qquad (4.54)$$

где $t_{\text{ИК}}$ – длительность информационной части кадра.

Далее находится число дискретов (бит информации) $N_c$, $N_k$, формирующихся соответственно за время $t_{\text{ПС}}$, $t_{\text{ПК}}$ работы ППЗУ:

$$N_c = \frac{t_{nc}}{T_{gk}}; \quad t_{nc} = T_c - t_{gc}; \qquad (4.55)$$

$$N_k = \frac{t_{nk}}{T_{gk}}; \quad t_{nk} = T_c - t_{gk}. \qquad (4.56)$$

Адреса, соответствующие началу в расположении информации о строчном $N_{t_1}$ и кадровом $N_{t_2}$ гасящем импульсе, определяются следующими формулами:

$$N_{t_1} = \frac{t_{1c}}{T_{gc}}; \quad N_{t2} = \frac{t_{1k}}{T_{gk}}; \quad t_{1c} = \frac{1}{2}\left(t_{пс} - t_{гс}\right); \quad t_{1k} = \frac{1}{2}\left(t_{пк} - t_{гк}\right). \quad (4.57)$$

Адреса, соответствующие окончанию в расположении информации о строчном $N_{rc}$ и кадровом $N_{rk}$ гасящем импульсе, определяются следующими выражениями:

$$N_{Гc} = N_c - N_{t1}; \quad N_{Гk} = N_k - N_{t2}. \quad (4.58)$$

Число дискретов (периодов дискретизации) $N'_{cc}$, $N'_{ct2}$, приходящихся на время $t_{cc}$ и $t_{2c}$ сигнала строки, будет

$$N'_{cc} = \frac{t_{cc}}{T_{gc}}; \quad N'_{ct2} = \frac{t_{2c}}{T_{gc}}. \quad (4.59)$$

Из этих формул находятся адреса, соответствующие началу $N_{ct2}$ и концу $N_{cc}$ разложения информации о строчном синхроимпульсе,

$$N_{ct2} = N_{t1} + N'_{ct2}; \quad N_{cc} = N_{ct2} + N'_{cc}. \quad (4.60)$$

Аналогично определяется число дискретов $N'_{ck}$, $N'_{kt2}$, приходящихся на время $t_{ck}$ и $t_{2k}$ сигнала кадра:

$$N'_{ck} = \frac{t_{ck}}{T_{gk}}; \quad N'_{kt2} = \frac{t_{2k}}{T_{gc}}. \quad (4.61)$$

Выражение (4.61) позволяет определить адреса, соответствующие началу $N_{kt2}$ и окончанию $N_{ck}$ расположения информации о кадровом синхроимпульсе:

$$N_{kt2} = N_{t2} + N'_{kt2}; \quad N_{ck} = N_{kt2} + N'_{ck}. \quad (4.\ 62)$$

Приведем пример расчета адресов ППЗУ согласно изложенной методике. Пусть известны следующие параметры:

$N_{пс} = N_{пк} = 256$, $N_{ис} = N_{ик} = 288$, $T_с = 64$ МКС,

$T_{гс}$ – 12 МКС, $t_{2c} = 1{,}5$ МКС, $T_k = 2\ 104$ МКС, $t_{cc} = 4{,}7$ МКС,

$t_{гс} = 1600$ мкс, $t_{ck} = 160$ мкс, $t_{2k} = 11{,}75$ мкс.

Тогда, используя (4.52) – (4.62), получим следующие характеристики:

1) для строки: $t_{gc} = 34{,}6$ мкс, $m_{gc} = 135$ мкс, $N_c = 217$, $N_{t1} = 64$, $N_{гk} = 153$, $N_{ct2} = 75$, $N_{cc} = 109$;

2) для кадра: $t_{gk}$ = 16339 мкс, $T_{gk}$ = 64 мкс, $N_k$ = 56, $N_{t2}$ = 16, $N_{rk}$ = 40, $N_{kt}2$ = 17, $N_{ck}$ = 19.

В заключение приведем следующую методику расчета емкости памяти КЭС.

1. Определить в зависимости от выбранного типа КЭС по формулам (4.32) – (4.33) количество видеоинформации $I_о$, перерабатываемой КЭС.

2. Вычислить в зависимости от размерности и цветности сравниваемых изображений по формулам (4.34) и (4.35) – (4.44) емкость памяти $П_а$ и число кадров $N_{ЧБП}$, $N_{ЧБО}$, $N_{ЦП}$, $N_{ЭИК}$ КЭС аналогового или аналого-цифрового типа.

3. Оценить в зависимости от размерности и цветности сравниваемых изображений по формулам (4.45) – (4.46), (4.48) – (4.51) емкость памяти $П_ц$ зрительной системы и емкость памяти $ПБ_{ПЗУ}$, $П_{ОЗУ}$, $П_{ВП}$, $П_{ППЗУ}$, $П_{ЭД}$, $П_{ВП}$ элементов КЭС цифрового типа.

4. Рассчитать по формуле (4.47) емкость памяти ОЗУ микрокомпьютера для размещения средств программного обеспечения.

5. Установить по формулам (4.52) – (4.62) адреса ППЗУ буферного ЗУ, осуществляющего запись ТИ.4.

*4.4.2.3. Оценка быстродействия КЭС*

Очевидно, что требования к быстродействию КЭС определяются из требований к производительности робота или другого технологического оборудования, использующего эту зрительную систему. В общем случае быстродействие робототехнической системы, включающей КЭС, робот и средства формирования рабочей зоны, оценивается простым выражением

$$ТРС = ТСФРС + ТКЭС + Т_р , \qquad (4.63)$$

где ТСФРС, ТКЭС, $Т_р$ соответственно время (постоянные времени) формирования рабочей зоны, определения необходимой информации КЭС и выполнения заданной последовательности технологических операций роботом.

Так как робототехническая система функционирует в реальном производственном цикле, то при выборе быстродействия КЭС необходимо выполнять следующие условия:

$$ТКЭС \le Т_{рс} – (ТСФРС + Т_р),\ Т_{рс} \le Т_{цк}, \qquad (4.64)$$

где $Т_{цк}$ – длительность одного цикла производственного конвейера (или длительность одного цикла смены рабочей зоны).

Быстродействие КЭС определяется в общем виде суммированием слагаемых времени, затрачиваемых каждым узлом зрительной системы на выполнение своей функции, т. е.

$$T_{\text{ОТИС}} = \sum_{m=1}^{m=7} t_i^{зс}, \tag{4.65}$$

где $t_1^{зс}, t_2^{зс}, t_3^{зс}, t_4^{зс}, t_5^{рс}, t_6^{рс}, t_7^{рс}$ – соответственно время (длительность) реализации своих функций ДТИ, НТИ, ФМБ, АМБ, БХЭИ, ЭИ и УА зрительной системы.

Здесь следует отметить, что длительности времени $t_5^{рс}$ и $t_6^{рс}$ учитывают только временные затраты в цикле БХЭИ и ЭИ при подаче необходимой эталонной информации в ФМБ (т. е. без полной смены ЭИ, когда работают только БХЭИ и ЭИ, а остальные узлы КЭС находятся в режиме останова).

Из (4.65) следует очевидный вывод, что быстродействие можно повышать либо путем уменьшения времени обработки информации каждым узлом зрительной системы, либо путем организации параллельных вычислений подсистемами КЭС.

Дальнейший расчет быстродействия целесообразно проводить, для разных типов КЭС, анализирующих различные классы изображений.

КЭС, обрабатывающие двумерные черно-белые изображения. Оценим быстродействие КЭС с оптическим коррелятором и аналоговой обработкой сигнала.

Быстродействие этой КЭС определяется по формуле (4.65) в соответствии с конструктивной и схемной реализацией блоков цельной системы.

Так как быстродействие КЭС обуславливается скоростными характеристиками технологического процесса, то расчет быстродействия КЭС целесообразно производить в динамическом режиме [24]. При этом следует учитывать прежде всего то, что скорость выдачи информации КЭС задается допустимой дискретностью отсчета $\Delta r_{xy}^g, \Delta r_{\alpha}^g$ линейных и угловой координат соответственно, т. е.

$$\Delta r_{xy}^g = \frac{V_k}{t_{\text{ЦК}} + t_{\text{ЦР}}}; \qquad \Delta r_{\alpha}^g = \omega_g t_{\text{ЦК}}, \tag{4.66}$$

где $V_k$ – скорость движения объекта на конвейере; $t_{ЦР}$ – длительность цикла работы ПР; $\omega_g$ – угловая скорость поворота объекта в плоскости конвейера; $t_{ЦК}$ – быстродействие КЭС. Из (4.66) находим

$$t_{цк} = \frac{V_k \Delta r_{xy}^g t_{ЦР}}{\Delta \kappa_{xy}^g}; \quad t_{ЦК} = \frac{\Delta r_\alpha^g}{\omega_g}, \tag{4.67}$$

где $t_{ЦК}$ выбирается меньшее из двух значений. Величина $\Delta r_{xy}^g$ вычисляется как

$$\Delta r_{xy}^g = \left(\Delta x_{ср}^2 + \Delta y_{ср}^2\right)^{1/2}, \tag{4. 68}$$

где $\Delta x_{ср}$, $\Delta y_{ср}$ – смещение объекта по соответствующим осям за время $t_{цк}$.

Ясно, что чем меньше допустимые значения $\Delta x_{ср}$, $\Delta y_{ср}$, тем выше должны быть скоростные свойства КЭС и ПР. С другой стороны, максимальное быстродействие КЭС имеет предельное значение, ограниченное максимально допустимой скоростью перемещения изображения по полю фотокатода фотоприемника телекамеры $V_{ДтИ}^{ДОП}$ или по экрану индикатора ТИ $V_{mИ}^{ДОП}$. Превышение этой скорости ведет к появлению эффекта «смазывания» изображения. Такой эффект будет наблюдаться, если

$$C_1^n V_{ДТИ}^{ДОП} \langle V_{ТИ}^{ДОП} \langle C_2^n V_K \quad \text{или} \quad V_{ТИ}^{ДОП} \langle C_1^n V_{ДТИ}^{ДОП} \langle C_2 V_K, \tag{4.69}$$

где $C_1^n$, $C_2^n$ – коэффициенты пропорциональности.

Из (4.69) следует, что при выполнении условия

$$C_1^n V_{ТИ}^{ДОП} \geq V_{ТИ}^{ДОП} \geq C_2^n V_K \quad \text{или} \quad V_{ТИ}^{ДОП} \geq C_1^n V_{ФТИ}^{ДОП} \geq C_2^n V_K \tag{4.70}$$

эффекта «смазывания» изображения не будет и верхний предел быстродействия будет определяться предельными скоростными характеристиками остальных блоков КЭС. Быстродействие КЭС с постоянным направлением вращения ЭИ будет

$$t_{ЦК} = \sum_{t=1}^{n} t_i = T_Э n_{об} = \frac{2T}{\omega_З} n_{об}, \tag{4.71}$$

где $t_i$ – длительность $i$-й операции цикла, выполняемой последовательно; $T_Э$ – период вращения ЭИ; $n_{об}$ – число оборотов ЭИ,

требуемых для выполнения всех операций цикла; $\omega_{ЭИ}$ – угловая скорость вращения ЭИ.

Как следует из (4.71), $t_{ЦК}$ зависит от скорости $\omega_Э$ вращения ЭИ и числа оборотов $n_{об}$, необходимых для выполнения цикла. Однако при выборе скорости вращения ЭИ следует учитывать, что имеется оптимальное сочетание величин $\omega_{ЭИ}$, $T_к$, $T_c$, значения которых должны выбираться из условия, что угол $\alpha_к$ поворота ЭИ за время $T_k$ должен быть меньше (или равен) допустимому углу $\alpha_{кд}$ поворота ЭИ. Причем $\alpha_{кд}$ определяется следующим выражением:

$$\alpha_{кд} = w_Э T_K = 2\pi n_Э T_K = 2\pi n_Э \frac{T_Э}{n_k}, \qquad (4.72)$$

где $n_э$ – число оборотов ЭИ в единицу времени; $n_k$ – число считываемых кадров за один оборот ЭИ.

В расчетах КЭС с постоянным правлением вращения ЭИ и цифровой системой определения угла α следует также учитывать, что систематическая ошибка оценки угловой координаты вычисляется следующим образом:

$$\delta_\alpha = \frac{2\pi}{n_g K_p}, \qquad (4.73)$$

где $n_g$ – число отверстий в перфорируемом вращающемся диске, расположенных по окружности; $K_p$ – отношение угловых скоростей диска и ЭИ.

Быстродействие КЭС аналого-цифрового типа определяется в основном аналогично КЭС аналогового типа по формулам (4.65) – (4.72) с добавлением методики расчета быстродействия ввода и обработки изображения (корреляционной функции) микроЭВМ, изложенной ниже.

Быстродействие КЭС цифрового типа оценивается по формуле

$$T_{ОТИС}^{ПЦЧБ} = \sum_{i=1}^{n=8} t_i^{ПЦЧБ}, \qquad (4.74)$$

где $t_1^{ПЦЧБ}, t_2^{ПЦЧБ}, t_3^{ПЦЧБ}, t_4^{ПЦЧБ}, t_5^{ПЦЧБ}, t_6^{ПЦЧБ}, t_7^{ПЦЧБ}, t_8^{ПЦЧБ}$ – соответственно время, необходимое для установки требуемого освещения рабочей зоны блоком освещения, установки (включения) светофильтра, формирования ТИ, считывания (записи) ТИ в буферное устройство,

обработки ТИ видеопроцессором, извлечения необходимой информации на микрокомпьютере, подстройки параметров зрительной системы блоком адаптации.

Отметим здесь, что время, затрачиваемое на установку требуемого освещения рабочей зоны ($t_1^{\text{ПЦЧБ}}$), а также установки нужного фильтра ( $t_2^{\text{ПЦЧБ}}$ ), может быть только в начальной стадии функционирования КЭС (когда работа зрительной системы осуществляется по одному кадру ТИ). В установившемся режиме время $t_1^{\text{ПЦЧБ}}$ обуславливается частотой включения источников света, обеспечивающих требуемую подсветку ОМ, а время $t_1^{\text{ПЦЧБ}}$ можно не учитывать, так как свет через фильтр проходит практически мгновенно.

Время формирования ТИ $t_3^{\text{ПЦЧБ}}$ определяется частотными характеристиками телевизионных камер

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = \tau_{\text{ТК}}, \tag{4.75}$$

где $\tau_{TK}$ – период повторения кадров ТК. Выражение (4.75) можно представить в другом виде

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} \tau_{\text{Э}}, \tag{4.76}$$

$M^{\text{ТИ}}, N^{\text{ТИ}}$ – соответственно число элементов в строке и число строк ТИ (или соответственно число строк и столбцов ТИ); $\tau_{\text{Э}}$ – время считывания *i*-го элемента ТИ. При использовании нескольких ТК, последовательно воспринимающих ТИ, время формирования изображения вычисляется следующим образом:

$$t_3^{\text{ПЦЧБ}} = N_{TK} \sum_{i=1}^{N_{TK}} \tau_{TKi} = N_{TK} \sum_{i=1}^{N_{TK}} M_i^{\text{ТИ}} N_i^{\text{ТИ}} \tau_{\text{Э}i_1}, \tag{4.77}$$

$\tau_{TKi}$ – период повторения кадров *i*-й ТК; $N_{\text{ТК}}$ – количество ТК; $\tau_{\text{Э}i_1}$, – время передачи *i*-го элемента ТИ *i*-й ТК.

В случае применения в ТК режима, «электронного окна» размером $M_0^{\text{ТК}} \times N_0^{\text{ТИ}}$ время $t_3^{\text{ПЦЧБ}}$ уменьшается за счет уменьшения объема воспринимаемой информации.

Время считывания ТИ в буферное запоминающее устройство $t_4^{\text{ПЦЧБ}}$ определяется временем ввода ($t_{4\text{В}}^{\text{ПЦЧБ}}$) и предварительной $j$, обработки изображения ($t_{4\text{ОБР}}^{\text{ПЦЧБ}}$)

$$t_4^{\text{ПЦЧБ}} = t_{4\text{В}}^{\text{ПЦЧБ}} + t_{4\text{ОБР}}^{\text{ПЦЧБ}}. \tag{4.78}$$

Так как ввод ТИ в БЗУ производится синхронно с формированием ТИ телевизионной камерой, длительность $t_{4\text{В}}^{\text{ПЦЧБ}}$ можно вычислить по формулам (4.75) – (4.77). Время обработки видеоинформации находится по формуле

$$t_{4\text{ОБР}}^{\text{ПЦЧБ}} = M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} \tau_{\text{ЭОБР}} = N_K^{\text{ТИ}} t_{\text{КОБР}}, \tag{4.79}$$

где $\tau_{\text{ЭОБР}}$ – время обработки $i$-го элемента ТИ; $N_K^{ТИ}$ – число кадров ТИ; $t_{\text{КОБР}}$ – период обработки кадра ТИ.

Длительность считывания ТИ из БЗУ в ЭВМ зависит от реализации БЗУ и в общем случае определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} t_5^{\text{ПЦЧБ}} = N_{\text{бзу}} N_{\text{бзу}}^K [ & t_{\text{стл}} M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + t_{\text{стр}} M^{\text{ТИ}} + t_{\text{нстп}} M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + \\ & + t_{\text{нстр}} M^{\text{ТИ}} + t_{\text{пд}} M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + t_{\text{бп}} \left( M^{\text{ТИ}} N^{\text{ТИ}} + M^{\text{ТИ}} \right)], \end{aligned} \tag{4.80}$$

где $N_{\text{бзу}}$ – количество БЗУ; $N_{\text{бзу}}^K$ — количество ТИ, записанных БЗУ; $t_{\text{стр}}$ – время пересылки числа, соответствующего первой координате строки; $t_{\text{стл}}$ – время пересылки числа, соответствующего первой координате столбца; $t_{\text{пд}}$ – время пересылки; $N_P$ – разрядного слова данных; $t_{\text{нстл}}$ – время наращивания адреса координат столбца; $t_{\text{нстр}}$ – время наращивания адреса координат строки; $t_{\text{бп}}$ – время безусловного перехода адреса координат.

Из анализа (4.80) следует, что быстродействие считывания ТИ из БЗУ в ЭВМ зависит от числа вводимых кадров ТИ, количества БЗУ, размера кадра ТИ и числа разрядов слова данных (при фиксированных длительностях $t_{\text{стл}}$, $t_{\text{стр}}$, $t_{\text{нстл}}$, $t_{\text{нстр}}$, $t_{\text{пд}}$, $t_{\text{бп}}$). Продемонстрируем применение формулы (4.80) для выбора БЗУ различного типа. Например, параметры $N_{\text{бзу}} = N_{\text{бзу}}^K = 1$, $N_p = 4$ соответствуют реализации БЗУ, осуществляющего считывание полутонового изображения, а параметры $N_{БЗУ} = N_{БЗУ}^K = 1$, $N_p = 2$ – реализации БЗУ, обеспечивающего считывание контурного ТИ.

Быстродействие обработки информации на видеопроцессоре зависит от производительности вычислительной структуры и сложности программного обеспечения. В общем виде быстродействие видеопроцессора определяется следующим образом:

$$t_6^{\text{ПЦЧБ}} = t_{\text{вк}} + t_{\text{поиск}} + t_{\text{сл}} = \tau_{\text{бзу}} + n_{\text{В}} \frac{K_1}{N_{\text{квп}} t_T} + \frac{K_2}{N_{\text{квп}} f_T}, \qquad (4.81)$$

где $t_{\text{вк}}$ – время ввода кадра ТИ в видеопроцессор; $t_{\text{поиск}}$ – время поиска контура элементов изображения по кадру ТИ; $t_{\text{сл}}$ – время слежения за контуром элементов изображения по кадру ТИ; $\tau_{\text{бзу}}$ – период повторения кадров БЗУ; $n_{\text{в}}$ – общее число элементов процессорной матрицы видеопроцессора; $K_1$ – число машинных тактов, затрачиваемых на обработку одного «пустого» элемента изображения, $K_1$ =20,..., 100; $K_2$ – коэффициент, характеризующий сложность программы работы видеопроцессора (устанавливается для конкретного типа видеопроцессора); $f_{\text{т}}$ – тактовая частота видеопроцессора (или его блоков, осуществляющих параллельную обработку ТИ); $N_{\text{квп}}$ – число параллельных каналов видеопроцессора.

Графики, иллюстрирующие расчетное быстродействие видеопроцессора, приведены на рис. 4.14 и 4.15. Отметим, что графики получены для худшего случая (сложного изображения, требующего больших временных затрат на его обработку). Как следует из анализа графиков, для повышения быстродействия видеопроцессора данного типа необходимо, кроме увеличения его параллельных каналов, повышать тактовую частоту или применять специальные алгоритмы сжатия изображений, позволяющие упростить программное обеспечение этого устройства.

Значение времени $t_7^{\text{ПЦЧБ}}$ зависит от сложности вычислительных операций, реализующих алгоритм работы ЭВМ, а также времени выборки информации из ППЗУ и ЭД в процессор ЭВМ. Время передачи информации из ППЗУ в процессор рассчитывается по известной методике [33], а время выборки ЭИ из ЭД в процессор определяется по формуле (4.80).

Временные затраты на запись информации и выполнение необходимых функций (например, перезапись ТИ из ОЗУ ЭВМ в НТМД или передача (прием) видеоинформации из ЭВМ по вычислительной сети) определяется по известным методикам [13, 75].

*КЭС, анализирующие трехмерные, черно-белые изображения*. В начале оценим быстродействие КЭС с оптическим коррелятором и аналоговой или аналого-цифровой обработкой сигнала. Здесь наиболее возможны две реализации КЭС: 1) с двумя ТК и одним оптическим коррелятором; 2) с двумя ТК и накопителями ТИ и одним оптическим коррелятором.

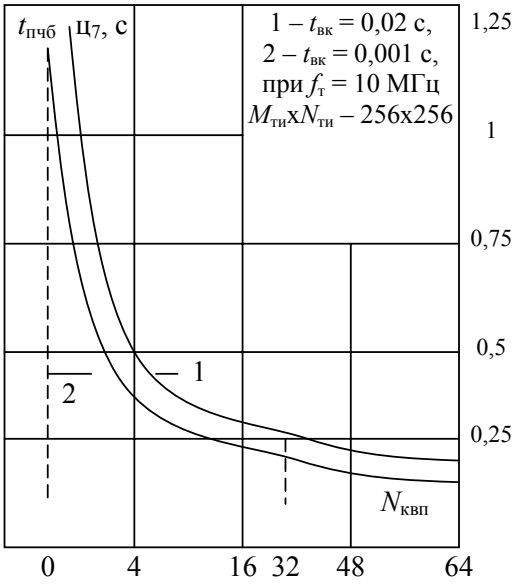


Рис. 4.14. Зависимость времени обработки ТИ от числа каналов видеопроцессора ($f_т$ = 10 МГц)

Для первого случая реализации КЭС быстродействие зрительной системы определяется по формуле

$$T_{ОТИС}^{ОЧБ1} = 2\sum_{i=1}^{N_{БЛ}} t_i^{ОЧБ1} + t_{ОК}^{ОЧБ1}, \qquad (4.82)$$

где $t_i^{ОЧБ1}$ — время работы блоков КЭС; $N_{бл}$ – число блоков КЭС (в формуле ТК следует учитывать только один раз); $t_{ОК}^{ОЧБ1}$ – время оценки (или уточнения) координат.

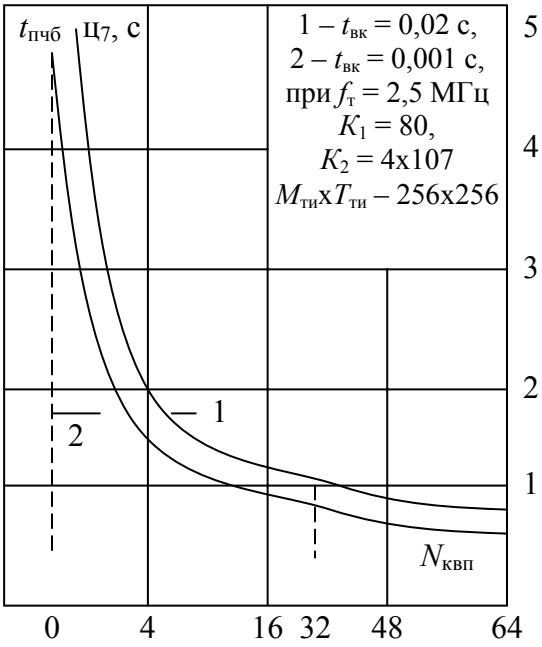


Рис. 4.15. Зависимость времени обработки ТИ
от числа каналов видеопроцессора ($f_т$ = 2,5 МГц)

Для второго случая реализации КЭС быстродействие определяется следующим образом:

$$T_{ОТИС}^{ОЧБ2} = 2\sum_{i=1}^{N_{ТИ}} t_i^{ОЧБ2} + \sum_{j=1}^{N_{ОБЛ}} t_j^{ОЧБ2}, \qquad (4.83)$$

где $t_i^{ОЧБ2}$ — время работы $i$-го блока, участвующего в считывании формировании первого и второго изображений; $П_{ти}$ – количество блоков, обеспечивающих считывание и формирование первого и второго изображений; $t_j^{ОЧБ2}$ – время работы $j$-го блока, осуществляющего формирование и анализ корреляционных акций; $П_{обл}$ – количество блоков, обеспечивающих формирование и анализ

корреляционных функций (включая получение окончательной информации).

Подчеркнем здесь, что значения $t_i^{\text{ОЧБ1}}$, $t_{\text{ОК}}^{\text{ОЧБ1}}$, $t_i^{\text{ОЧБ2}}$, $t_j^{\text{ОЧБ2}}$ оцениваются по формулам (4.72) – (4.73).

Быстродействие КЭС цифрового типа, использующих один, два или три датчика, следует определять по формулам (4.74) – (4.80). При этом необходимо учитывать количество ТК, БЗУ, ТИ и ЭИ.

*КЭС, обрабатывающие двумерные цветные изображения*. В начале вычислим быстродействие КЭС с оптическим коррелятором (с аналоговой или аналого-цифровой обработкой сигнала). Возможны два варианта реализации такой КЭС: одноканальные (с одним оптическим коррелятором) и многоканальные (с несколькими оптическими корреляторами).

Для первого и второго вариантов КЭС быстродействия $T_{\text{ОТИС}}^{\text{ПЦ,А1}}$, $T_{\text{ОТИС}}^{\text{ПЦ,А2}}$ определяются соответствующими формулами, то есть:

$$T_{\text{ОТИС}}^{\text{ПЦ,А1}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{бр}}} t_i^{\text{ПЦ,А1}} + N_{\text{ЦВ}} t_{\text{Цф}}^{\text{ПЦ,А1}}; \tag{4.84}$$

$$T_{\text{ОТИС}}^{\text{ПЦ,А2}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{бк}}} t_i^{\text{ПЦ,А2}}, \tag{4.85}$$

где $t_i^{\text{ПЦ,А1}}$ – время выполнения требуемой функции $i$-ым блоком (без операции разделения цвета); $n_{\text{бр}} = N_{\text{ОЭ}} - 1$, $N_{\text{ОЭ}}$ – общее число элементов зрительной системы; $N_{\text{цф}}$ – число сменяемых цветофильтров; $t_{\text{Цф}}^{\text{ПЦ,А1}}$ – время смены цветофильтра; $t_i^{\text{ПЦ,А2}}$ – время выполнения требуемых функций $i$-м блоком одного из канала зрительной системы; $n_{\text{бк}}$ – наибольшее число блоков одного из каналов зрительной системы.

Как следует из анализа выражений (4.84), (4.85), быстродействие второго (многоканального) варианта КЭС характеризуется более высоким быстродействием за счет выполнения параллельной обработки информации. Для повышения быстродействия первого (одноканального) варианта КЭС следует уменьшить время смены цветофильтров (т. е. увеличить скорость смены цветофильтров) или уменьшить число цветофильтров.

В случае использования КЭС цифрового типа, сравнивающей двумерные цветные изображения, быстродействие $T_{\text{ОТИС}}^{\text{ПЦ,А1}}$ зрительной системы рассчитывается по формулам (4.74) – (4.80).

*КЭС, анализирующие трехмерные цветные изображения*. Напомним, что здесь возможны реализации зрительной системы на оптическом корреляторе или в цифровом виде. Причем КЭС первого варианта строятся на двух ДТИ и двух оптических корреляторах, а КЭС второго варианта – на одном, двух или трех датчиках ТИ.

В зависимости от исполнения КЭС определим быстродействие зрительной системы. Для первого варианта реализации время получения необходимой информации определяется формулами

$$T_{\text{ОТИС}}^{\text{ОЦ,А1}} = T_{\text{ОТИС}}^{\text{ПЦ,А1}} + t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А1}}; \tag{4.86}$$

$$T_{\text{ОТИС}}^{\text{ОЦ,А2}} = T_{\text{ОТИС}}^{\text{ПЦ,А2}} + t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А2}}; \tag{4.87}$$

где $t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А1}}$, $t_{\text{БПР}}^{\text{ОЦ,А2}}$ – соответственно быстродействия блоков принятия решений, вычисляющих пространственные координаты объектов.

Подчеркнем здесь, что формула (4.86) соответствует КЭС с одноканальным оптическим коррелятором, а формула (4.87) – многоканальным оптическим коррелятором.

При построении цифровых КЭС, сравнивающих трехмерные цветные изображения, быстродействие $T_{\text{ОТИС}}^{\text{ОЦ,Ц}}$ зрительной системы рассчитывается по формулам (4.74) – (4.80). При этом необходимо учитывать время, затрачиваемое на вычисление пространственных координат.

*4.4.2.4. Методика расчета КЭС*

Методика расчета КЭС учитывает тип КЭС. Например, если в КЭС используется оптический коррелятор, то необходимо оценивать возможные ошибки определения координат, возникающие из-за погрешности изготовления коррелятора. При этом допустимые значения систематической $\delta_{\Sigma}^{\xi}, \delta_{\Sigma}^{\eta}$ и случайной $\sigma_{\Sigma}^{\xi}, \sigma_{\Sigma}^{\eta}$ составляющих ошибок определения координат главного максимума ВКФ, $J_{\max}$ в плоскости регистрации $L_4$ находятся следующим образом [24]:

$$\sigma_{\Sigma}^{\xi} = \delta_{\Sigma}^{\xi} \le \frac{\xi_{\max} T_1}{100\%}; \sigma_{\Sigma}^{\eta} = \delta_{\Sigma}^{\eta} \le \frac{\eta_{\max} T_1}{100\%}, \tag{4.88}$$

где $T_1$ – требуемая точность определения координат, %; $\xi_{max}$, $\eta_{max}$ – максимально допустимые смещения по соответствующим осям в плоскостях $L_4$, $M$.

Величины $\xi_{max}$, $\eta_{max}$ определим из выражений

$$\xi_{max} \le R_a - \delta_\Sigma^\xi; \quad \eta_{max} \le R_a - \delta_\Sigma^\eta \tag{4.89}$$

или при $\delta_\Sigma^\xi \langle\langle \sigma_\Sigma^\xi; \quad \delta_\Sigma^\eta \langle\langle \sigma_\Sigma^\eta$:

$$\xi_{max} \le R_a - \sigma_\Sigma^\xi; \quad \eta_{max} \le R_a - \sigma_\Sigma^\eta. \tag{4.90}$$

При выборе конструктивных параметров КЭС может быть использована следующая методика, применение которой не зависит от типа коррелятора [24]:

1. Выбрать тип КЭС в соответствии с техническим заданием, пользуясь методами ФСА и формулами (4.1) – (4.9).

2. Определить допустимые смещения $\Delta x_{max}$, $\Delta y_{max\,x}$, $\Delta x_{cp}$, $\Delta y_{cp}$ при заданном $l$, а также величину $H_e$.

3. Вычислить емкость памяти и установить адреса интерфейсов зрительной системы по формулам (4.30) – (4.62).

4. Определить $И_р$, $Ф_р$ при выбранных типах электронно-лучевых и полупроводниковых приборов, устанавливаемых соответственно в индикаторах ТИ и ДТИ.

5. Найти параметры $f$, $T$ коррелятора по формулам (4.16) – (4.29) при $\Delta\xi \Rightarrow \max, \Delta\eta \Rightarrow \max$, что соответствует максимальной разрешающей способности КЭС.

6. Вычислить согласно (4.88) – (4.90) требуемые значения величин $\delta_\Sigma^\xi, \delta_\Sigma^\eta$, $\sigma_\Sigma^\xi, \sigma_\Sigma^\eta$.

7. Задать допустимые погрешности установки элементов коррелятора и меры амортизации системы.

8. Определить погрешности индикатора ТИ.

9. Найти погрешности анализатора корреляционных функций.

10. Вычислить по формулам (4.63)÷(4.87) требуемое быстродействие системы; в случае использования КЭС с постоянным направлением вращения ЭИ, установить в соответствии с равенствами (4.71) и (4.72) необходимое быстродействие блоков системы, соблюдая при этом условие (4.70).

11. Задать погрешность установки датчика ТИ.

12. Определить по формуле (4.14) допустимые точные характеристики системы, обеспечивающие минимизацию затрат *N*, обусловленных изготовлением и эксплуатацией системы.

Для выполнения п. 12 необходимо выбрать алгоритм работы, комплектующие и конструкцию КЭС. При этом, если не обеспечивается требуемая точность определения $\Delta x$, $\Delta y$, $\alpha_i$ при затратах *N*, следует повторить п.1 ÷ 12, ужесточая указанные выше требования.

Модификацией предложенной методики является порядок расчета КЭС, учитывающий несовпадающие части ТИ $\delta_H$, возникающие из-за взаимной ориентации объекта, датчика ТИ или как следствие неравномерной освещенности плоскости конвейера с объектом. В этом случае сначала определяется величина $\delta_H$, а затем выполняются п. 1 – 9, 12.

В соответствии с вышеуказанной методикой разработана программа для машинного проектирования КЭС, содержащей модифицированный коррелятор Берджера, Лустберга – Лапушкина или Майера – Эпплера [24].

## 4.5. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ МИКРОЭВМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НАСТРОЙКИ КЭС

### 4.5.1. Состав аппаратно-программного комплекса

При создании КЭС возникает необходимость автоматизации исследования и проектирования систем. Для этой цели разработан аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий решать следующие задачи [21, 22, 45, 53, 65, 67, 74]:

1) выбрать и оценить методы фильтрации, предварительной обработки и сегментации изображений, а также формирование и анализ корреляционных функций;

2) оценить искажения ТИ и качество их компенсации;

3) выбрать и исследовать структуру КЭС;

4) рассчитать основные параметры КЭС;

5) определить погрешности КЭС;

6) визуализировать обрабатываемую видеоинформацию;

7) произвести сервисное обслуживание и документально оформить результаты расчета и моделирования.

В состав АПК входят семь микроЭВМ, образующих локальную сеть со звездообразной топологией ЭВМ (одна центральная ЭВМ (ПЭВМ) и шесть периферийных ЭВМ (ПЭВМ1, ..., ПЭВМ6)) [2, 3, 39, 65, 67, 71]. При организации сети используется локальная сеть передачи данных CMNET, работающая под управлением операционной системы РТ-11 (РАФОС) 5-й версии и реализующая доступ к удаленным дискам периферийных ЭВМ [1]. В состав АПК входят изделия, представленные на рис. 4.16.

УВСИУС – устройство ввода среднеформатных изображений с участка сцены; УВСИОМ – устройство ввода среднеформатных изображений с оптического микроскопа; УВСКИ – устройство ввода среднеформатных контурных изображений; УВИКФ – устройство ввода изображений корреляционных функций; УВСЦИ – устройство ввода среднеформатных цветных изображений; УВМОИ – устройство ввода малоформатных объемных изображений; УВИБФ – устройство ввода изображений большого формата; ОС – оптическая система; ТК – телевизионная камера; ВМ – видеомагнитофон; ЧБМ – черно-белый монитор; ЦМ – цветной монитор; ПЭВМ – персональная ЭВМ; ЦЭВМ – центральная ЭВМ; НГМД – накопитель на гибких магнитных дисках; НЖМД – накопитель на жестких магнитных дисках; ПУ – печатающее устройство (принтер); ВП – видеопроцессор; БУП – блок управления подсветкой; ИМСС – исполнительный механизм смещения сцены; БДС – блок дальней связи; ИС – интерфейс связи; БС – блок связи; СП – самописец. Характеристики устройств ввода изображений в микроЭВМ приведены в табл. 4.15 [49]. Отметим, что УВИКФ обеспечивает ввод изображения ВКФ, формируемых оптическим коррелятором.

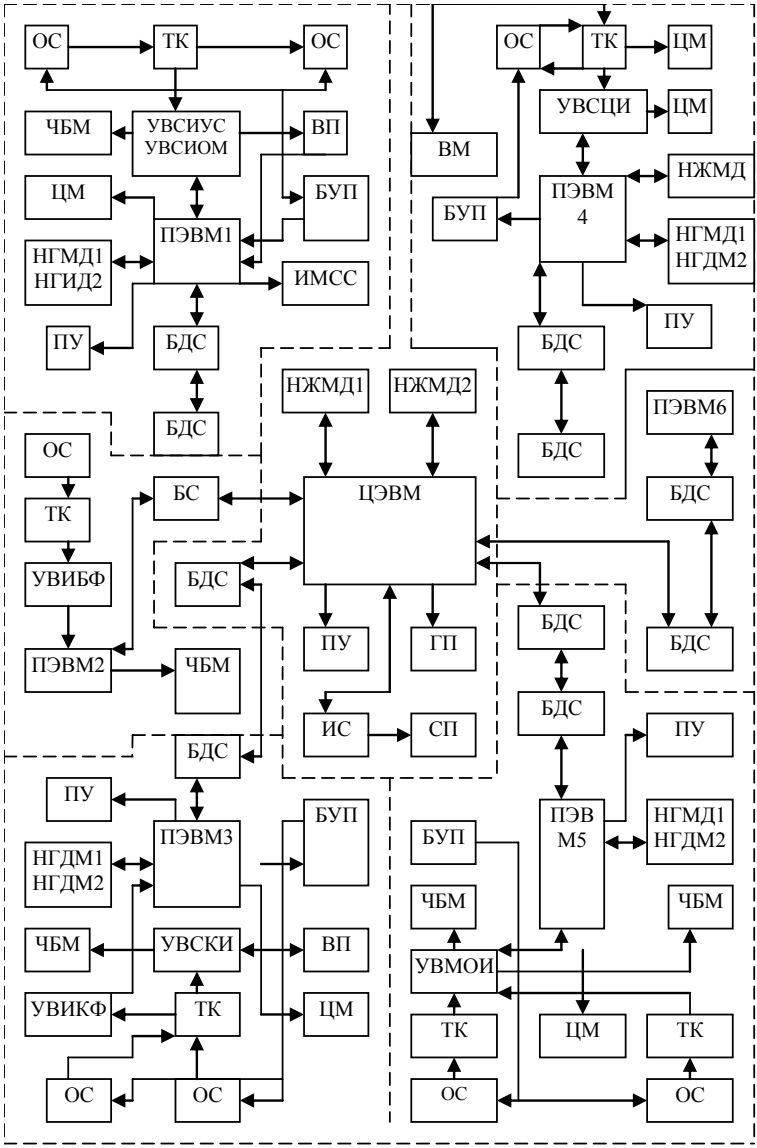


Рис. 4.16. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Таблица 4.15

**Характеристики устройств ввода изображений в микроЭВМ**

| № п/п | Название устройства | Тип телевизионной камеры | Число элементов разложения изображения | Число подключаемых телекамер | Число градаций яркости | Тип анализируемого изображения |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | УВ-СИУС | КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия | 256x256 | 1 | 64 | Черно-белое (двухмерное) |
| 2 | УВ-СИОМ | КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия | 256x256 | 1 | 256 | Черно-белое (двухмерное) |
| 3 | УВСКИ | КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия | 256x256 | 1 | 2 | Черно-белое (двухмерное) |
| 4 | УВИКФ | КТ-2-2 (ПЗС-матрица), Россия | 256x256 | 1 | 256 | Черно-белое (двухмерное) |
| 5 | УВ-МОИ | 2 камеры ФДМ-1, (фотодиодная матрица), Россия | 32x32 | 2 | 16 | Черно-белое (двухмерное) |
| 6 | УВСЦИ | Хитачи, Япония | 256x256<br>4 кадра<br>512x512<br>1 кадр | 4<br><br>1 | 256 | Цветное (двухмерное)<br>монохромное (двухмерное) |
| 7 | УВИБФ | Хитачи, Япония | 1024x1024 | 1 | 256 | Черно-белое (двухмерное) |

Таким образом, АПК содержит шесть рабочих мест: пять следовательских (1РМ, ..., 5РМ) и одно для настройки КЭС (6РМ). При подключении ПЭВМ к центральной ЭВМ используются соответствующие БДС, выпускаемые отечественной промышленностью. Связь ПЭВМ IBM э386 AT/XT с ЦЭВМ осуществляется через стандартные входы БС. При настройке подсистемы КЭС используются черно-

белый, цветной мониторы, а также программаторы ППЗУ и имитаторы команд микроЭВМ [7, 61].

Таким образом, АПК осуществляет не только ввод изображений различных типов (изображений различных размерностей и цветностей, изображений корреляционных функций), но и управляет подсветкой и смещением рабочей зоны. Кроме того, использование видеомагнитофона обеспечивает запись и воспроизведение динамических изображений, необходимых для тестирования и моделирования быстроменяющихся технологических процессов.

Одним из основных параметров АПК является производительность $P$, которая определяется по следующей формуле:

$$P = \frac{I_{\text{ОС}}}{t_{\text{апк}}}, \tag{4.91}$$

где $I_{\text{ОС}}$ – количество (суммарное) информации, перерабатываемое АПК (определяется по формуле (4.32); $t_{\text{апк}}$ – время, которое оценивается Р.

### 4.5.2. Структура программного обеспечения

АПК обладает развитым программным обеспечением (ПО) по обработке и анализу изображений, моделированию, проектированию и расчету КЭС, исследованию эффективности алгоритмов и структур КЭС. Структура ПО дана на рис. 4.17. ПО состоит из восьми пакетов (модулей) программ, каждая из которых реализует один из методов обработки или исследования изображений, также какую-либо сервисную функцию (обработка изображений, исследование и коррекция изображений, редактирование изображений, сравнение изображений, проектирование КЭС, управление объединенными головноми устройствами, настройка КЭС, обмен информацией) [2, 4, 21, 45, 46, 71]. Различные алгоритмы для каждого метода выполнены в виде подпрограмм, программой (например, формирование изображений). Подпрограммы, обозначенные цифрами, имеют следующие наименования: 1 – наведение датчика ТИ; 2 – фокусировка датчика ТИ; 3 – установка объектов и светофильтров датчика ТИ; 4 – калибровка КЭС и ее «привязка» к требуемой системе координат; 5 – ввод (запись) ТИ; 6 – нелинейная фильтрация ТИ (нелинейное масштабирование); 7 – коррекция геометрических и оптических искажений; 8 – инверсия ТИ; 9 – бинаризация ТИ; 10, 11, 12, 13, 14 – соответственно пороговая, ани-

зотропная, рекуррентная, строчная, медианная фильтрации ТИ; 15, 1б, 17 – выделение контуров методами сдвига кадра по четырем или восьми точкам соответственно; 18 – формирование точечного ТИ; 19 – вычисление координат центра тяжести ТИ; 20 – выделение постоянно наблюдаемых частей ТИ; 21 – перевычисление в другие системы координат; 22 – формирование развертки контура; 23 – вычисление геометрических характеристик ТИ; 24 – селекция информативных частей ТИ; 25 – формирование спектральных характеристик ТИ; 26, 27, 28, 29, 30, 31. 32, 33, 34, 35 – соответственно формирование искажений ТИ за счет смещения и поворота объекта относительно ДТИ, крена ДТИ, тангажа ДТИ, поворота ДТИ, изменение расстояния до объекта (изменение масштаба ТИ), скорости движения объекта, неравномерности освещенности объекта, наличия цветовых засветок в рабочей зоне, погрешностей установки ДТИ, геометрических искажений ТИ; 36 – коррекция искажений ТИ, возникающих из-за неравномерной освещенности сцены и взаимной ориентации объекта и ТИ; 37 -коррекция искажений ТИ, обусловленных скоростью движения объекта (или ДТИ5; 38 – коррекция масштабных искажений ТИ; 39 – коррекция цветовых искажений ТИ; 40 – моделирование черно-белых изображений; 41 – моделирование цветных изображений; 42 – редактирование черно-белых изображений; 43 – редактирование цветных изображений; 44, 45, 46, 47, 48 – соответственно классический, модифицированный, комбинированный, разностный и фазовый корреляционные алгоритмы; 49 – анализ амплитуды ВКФ; 50 – анализ крутизны фронтов сечения ВКФ; 51 – поисковый метод оценки координат; 52 – дифференциальный метод оценки координат; 53 – оценка цвета объекта; 54— адаптивный алгоритм оценки цвета объекта; 55 – определение формы объекта; 56 – оценка положения объекта на плоскости; 57 – определение пространственного положения объекта; 58 – структурный синтез КЭС на основе функционально-стоимостного анализа; 59 – параметрический синтез КЭС; 60 – оценка допустимой погрешности определения координат при минимизации затрат на создание и эксплуатацию КЭС; 61, 62, 63, 64 – соответственно расчеты светотехнические, оптические, быстродействия, объема памяти; 65 – расчет корреляторов; 66 – методика расчета КЭС; 67 – моделирование подсистем КЭС; 68— моделирование структуры КЭС; 69, 70, 71 – соответственно явление механизмами смещения (сканирования),

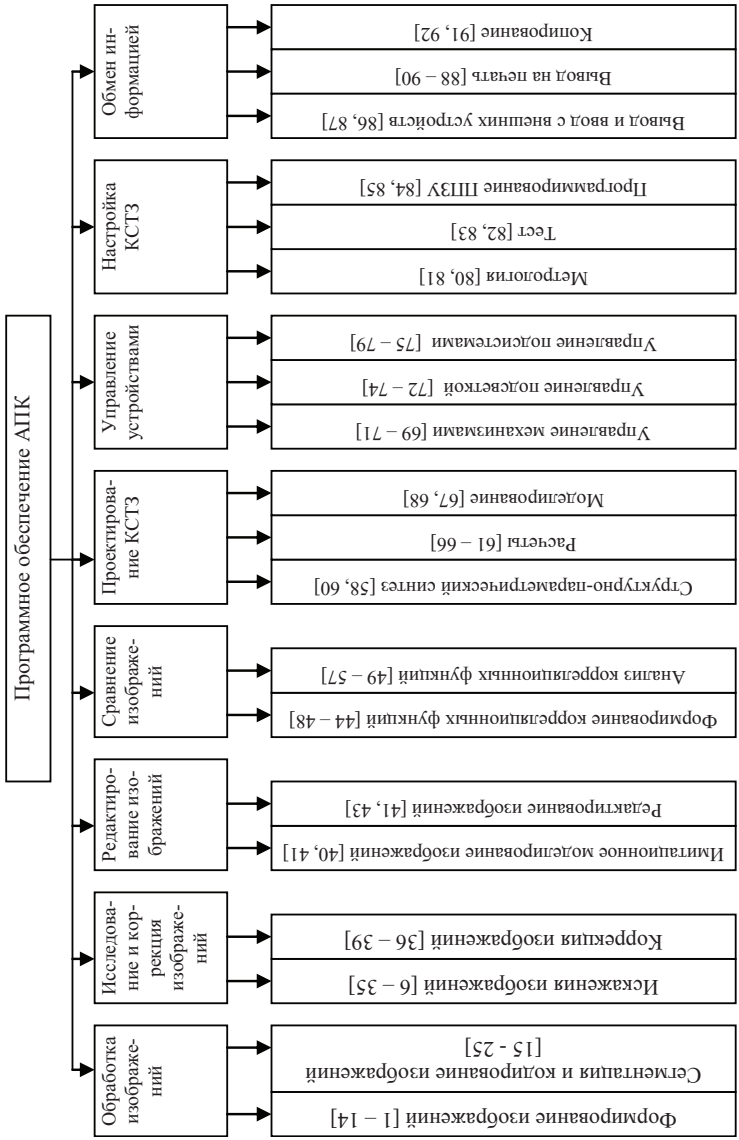


Рис. 4.18. Структура программного обеспечения аппаратно-программного комплекса

подъема-опускания, фиксации (метки); 72, 73, 74 – соответственно управление нижней, верхней подсветками и адаптация подсветки; 75, 76, 77, 78, 79 – соответственно управление видеопроцессором, буферным запоминающим устройством, электронным диском, ППЗУ; 80 – оценка статистических характеристик погрешности КЭС; 81 – поверка КЭС; 82 – тестовые; 83 – имитирующие (команды ЭВМ); 84 – программирование ППЗУ; 85 – проверка программатора; 86, 87 – соответственно запись изображения на ГМД, НМД (и считывание обратно в АПК); 88, 89, 90— соответственно вывод изображения (или другой информации) на АЦПУ, графопостроитель и двухкоординатный потенциометр; 91, 92— соответственно копирование программ с ГМД, НМД.

Такая организация ПО способствует максимальной «открытости» пакета, представляя возможность расширять и модифицировать его в процессе эксплуатации.

Структура ПО определяется требованиями, предъявляемыми к КЭС, и позволяет синтезировать архитектуру и произвести расчет параметров КЭС, последовательно выполнить все этапы обработки видеоинформации, выбирая для каждого из них оптимальный (по быстродействию, точности работы или другим требованиям) алгоритм обработки ТИ.

Процесс моделирования КЭС включает в себя этап имитационного моделирования изображений и этап имитационного моделирования зрительных систем применительно к технологической задаче. Этап имитационного моделирования изображений рассматривается с позиции моделирования цветных изображений, включающих в себя и черно-белые (монохромные) изображения [52].

Процесс обработки видеоинформации в зрительной системе представляется в виде модели, описанной в разд. 2.7. Схема моделирования изображений аппаратно-программным комплексом приведена на рис. 4.18. В АПК реализуются два способа получения (формирования) изображения: с использованием реальных датчиков оптической информации (телевизионных камер) и с помощью математических моделей. Отметим здесь, что если первый способ позволяет проверить модель с реальными объектами контроля, то второй способ более быстр и экономичен.

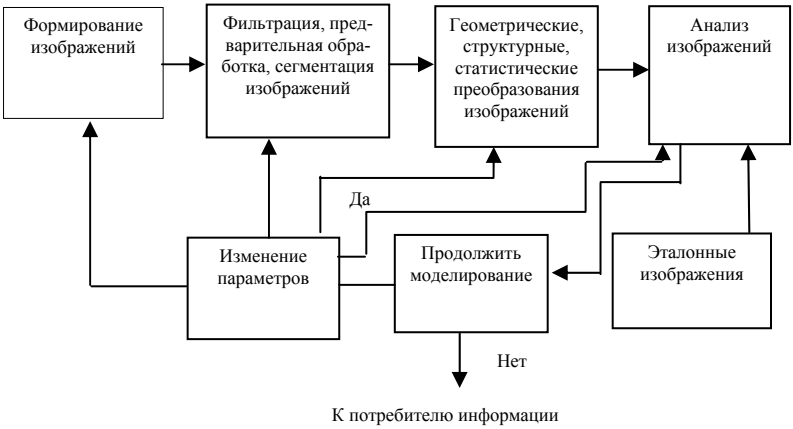


Рис. 4.18. Схема имитационного моделирования изображений аппаратно-программным комплексом

После синтеза КЭС моделируется ее работоспособность в робототехническом комплексе (например, робот для проверки топологий печатных плат) [14, 50, 53, 70, 78]. Разработанный АПК отличается от известных тем, что позволяет обрабатывать, анализировать изображения различных размерностей и цветностей, анализировать корреляционные функции и проектировать КЭС различного назначения.

## 4.6. ВЫВОДЫ

В заключение перечислим основные результаты главы.

1. Синтезирована итерационнная структура САПР КЭС, содержащая три этапа проектирования: первый – формализация ТЗ, составление и анализ модели; второй – структурная и параметрическая оптимизация и третий – создание и исследование макета системы.

2. Обоснован структурный синтез КЭС на основе ФСА. Показано применение алгоритма экспресс-ФСА, включающего в себя следующие этапы: 1) выбор объекта и определение целей анализа; 2) построение структурно-элементной модели объекта; 3) определение главных, основных и вспомогательных функций объекта; построение укрупненной функциональной модели; 4) построение совмещенной модели; 5) оценка уровня значимости и относительной важности

функций; 6) определение затрат по функциям и составление функционально-стоимостной модели объекта; 7) сопоставление уровня значимости функций с размером затрат на их осуществление и определение зон рассогласования; 8) реализация выбранного варианта проектирования объекта; 9) формирование идей для устранения зон рассогласования и разработка вариантов совершенствования объекта анализа на основе полной схемы ФСА. Предложен алгоритм ФСА при оптимизации структуры КЭС, использующий методы экспресс-ФСА и позволяющий выбирать варианты реализации основных функций путем построения морфологической карты, формировать синтезированные варианты построения объекта проектирования, оценивать затраты и качество исполнения функций по вариантам, комплексно оценивать выбранные для проектирования варианты, окончательно выбирать варианты проектирования объекта. Разработана алогическая матрица, содержащая 80 альтернативных вариантов КЭС, и предложена методика выбора требуемого варианта зрительной системы. Рассмотрено применение ФСА для проектирования КЭС.

3. Разработан параметрический синтез КЭС. Определена допустимая погрешность оценки координат при минимизации затрат, связанных с разработкой и эксплуатацией КЭС и потребителя информации. Разработан инженерный (приближенный) расчет КЭС. Проведен оптический расчет КЭС, включающий расчет модифицированного оптического коррелятора Лустберга – Лапушкина и связывающий параметры коррелятора и рабочей зоны КЭС. Дана методика расчета быстродействия аналоговых, аналого-цифровых и цифровых КЭС, сравнивающих черно-белые и цветные изображения; методика учитывает быстродействие потребителей информации и изменение положения объекта в рабочей зоне. Показано, что при использовании аналоговых и аналого-цифровых КЭС, в которых ТИ формируется на экране ЭЛТ, быстродействие ограничено максимально допустимой скоростью перемещения изображения по этому экрану. Получены формулы определения быстродействия блоков цифровых КЭС (БЗУ, видеопроцессор, ЭВМ и др.), зависящие от сложности обрабатываемой видеоинформации, а также от числа вводимых кадров и количества БЗУ. Разработана методика расчета емкости памяти КЭС в зависимости от размерности и цветности сравниваемых изображений; получено выражение для оценки перерабатываемой видеоинформации (двумерной, трехмерной, черно-белой и цветной). Произведен расчет

емкости памяти аналоговых КЭС различных конструкций. Оценена емкость памяти цифровых КЭС, показана эффективность (экономичность) использования режима ввода изображения в БЗУ и использования параллельной обработки видеоинформации; даны формулы для расчета емкости памяти элементов КЭС (включая программные средства); предложена методика определения адресов ППЗУ.

4. Разработан АПК на базе микроЭВМ, образующих локальную сеть с звездообразной топологией ЭВМ, содержащую устройства ввода изображений в микроЭВМ; АПК позволяет решать следующие задачи: 1) выбрать и оценить методы фильтрации, предварительной обработки и сегментации изображений различных размерностей и цветностей и выбрать методы формирования анализа корреляционных функций; 2) оценить искажения ТИ и качество их компенсации; 3) выбрать и исследовать структуру КЭС; 4) рассчитать основные параметры КЭС; 5) определить погрешности КЭС; 6) визуализировать обрабатываемую видеоинформацию; 7) произвести сервисное обслуживание и документально оформить результаты расчета и моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Автоматизированная* КАМАК – система ввода и обработки изображений / Научприбор СЭВ – 84: Проспект экспозиции СССР, Пловдив. – М.: Наука, 1984. – 2 с.

2. *Атоматизированная* система обработки изображений на базе микроэЭВМ / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, А.А. Фомин и др. // Информ. лист. – N206 – 90. – Томск: ЦНТИ, 1990. – 4 с.

3. *Автоматизированная* система обработки объемных изображений на базе фотодиодной матрицы / В.И. Сырямкин, А.А. Фомин, П. И. Нечунаев и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – N5. – С. 201.

4. *Алгоритмическое* и программное обеспечение телевизионной системы технического зрения для контроля топологии печатных плат / В.И. Сырямкин, Г.И. Неруш, А.А.Фомин и др. // Известие ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1990. – N6. – С. 14 – 17.

5. *Алексеев В.И., Буймов А.Г., Тарасенко В.П.* Принципы автоматизированного проектирования и исследования корреляционно-экстремальных навигационных систем // Корреляционно-экстремальные системы управления. – Томск: ТГУ. – С. 137 – 150.

6. *Белоглазов И.Н., Тарасенко В. П.* Корреляционно-экстремальные системы. – М.: Сов. радио, 1974., – 392 с.

7. *Белоглазов Н.Н., Сырямкин В. И., Титов В.С.* Адаптивные роботы с техническим зрением. – Томск, 1990. – 170 с. – Деп. ВИНИТИ 06.02.91, N 607 – В91.

8. *Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г.* Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.

9. *Блюмберг В. А.* Основы технологии научно-исследовательской работы. – Л.: Машиностроение, 1980. – 53 с.

10. *Блюмберг В.А., Глущенко В.Ф.* Какое решение лучше? – Л.: 1982. – 160 с.

11. *Буймов А.Г.* Корреляционно-экстремальная обработка изображений. – Томск: ТГУ, 1987. – 134 с.

12. *Гамрат-Курек Л.И.* Экономика инженерных решений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1986. – 120 с.

13. *Горбунов В.Л., Панфилов Д.И., Преснухин Д.Л.* Справочное пособие по микропроцессорам и микроЭВМ. – М. .Высш.шк., 1988. – 272 с.

14. *Кадыров Г.Х., Садыков С. С.* Особенности разработки и использования сетей обработки изображений // Автоматика и вычислительная техника. – Рига: Зинатне, 1988. – N2. – С. 18 – 27.

15. *Карпов А.Г., Раводин О.М.* Оптические управляемые транспаранты // Корреляционно-экстремальные системы. – Томск: ТГУ. – 1981. – N6. – С. 79 – 102.

16. *Кац Г.Б., Ковалев А.В.* Технико-экономический анализ и оптимизация конструкции машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 214 с.

17. *Клевалин В.А., Дунин-Барковский И.И.* Технологические аспекты и методика проектирования систем технического зрения ПР и РТК // Применение оптико-электронных приборов и волоконной оптики в народном хозяйстве: Материалы семинара. – М.: МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского,1989. – С. 7 – 19.

18. *Колбина Л.В., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Выбор варианта оптико-электронной системы на основе функционально-стоимостного анализа // Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе: Тез.докл. к пятому Всесоюз.совещ. – Барнаул: АПИ, 1989. Ч.2. – С. 112 – 113.

19. *Колбина Л.В., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Выбор технических средств цифровой обработки изображений // Проблемы создания систем обработки, анализа и распознования изображений: Тез.докл. 2-го Республ. семинара. – Ташкент: ТашПИ, 1988. – Ч.1. – С. 47 – 48.

20. *Колбина Л.В., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Методика выбора варианта системы технического зрения на основе функционально-стоимостного анализа // Известия ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1990. – N6. – С.53 – 55.

21. *Комплекс* аппаратуры для исследования и проектирования телевизионных видеосенсорных систем / В. И. Сырямкин, С.Я.Пашнев, А.А.Фомин, и

др. // Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе: Тез. докл. к четвертому Всесоюз. совещ. – Барнаул: АПИ, 1987. – Ч.2. – С. 90 – 91.

22. *Комплекс* аппаратуры для исследования и проектирования телевизионных видеосенсорных систем / В.И. Сырямкин, С.Я. Пашнев, А.А. Фомин и др. // Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе: Тез.докл. к четвертому Всесоюзн. совещ. – Барнаул: АПИ, 1987. – Ч. 2. – С. 90 – 91.

23. *Комплекс* общеотраслевых руководящих методических материалов по созданию АСУ и САПР. – М.: Статистика. 1980. – 119 с.

24. *Кориков А.М., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Корреляционные зрительные системы роботов; Под ред. А.М. Корикова. – Томск: Радио и связь, Томск, отдел., 1990. – 264 с.

25. *Корреляционно-экстремальные* видеосенсорные системы для роботов / Ю.А. Андреев, Н.Н. Белоглазов, А.М.Кориков, В.И. Сырямкин, В.П. Тарасенко; Под ред. А.М. Корикова и В.П. Тарасенко. – Томск: ТГУ, 1986. – 240 с.

26. *Курейчик В.М.* Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.

27. *Медведев Г.А. Тарасенко В.П.* Вероятностные методы исследования экстремальных систем. – М.: Наука, 1967. – 456 с.

28. *Михалев С.Б., Зажарский А. Н., Кондратьев В.В.* Средства вычислительной техники для применения в САПР. – Минск: Беларусь, 1989. – 160 с.

29. *Моисеева Н.К.* Функционально-стоимостный анализ в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.

30. *Моисеева Н.К.* Функционально-стоимостный анализ. Теория и практика: Обзоры по электронной технике. Сер.9, Экономика и системы управления. Ч.2. Отечественный опыт. М.: ЦНИИ «Электроника». – 1984. – 51 с.

31. *Моисеева Н.К., Карпунин М.Г.* Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа: Учеб.пособие для техн. спец. вузов. – М.: Высш.шк., 1988. – 192 с.

32. *Муренко Л.П., Иванов Е.А.* Микропроцессоры: Средства отладки. – М.: ВЫСШ ШК., 1988. – 160 с.

33. *Мячев А.А., Степанов В.Н.* Персональные ЭВМ и микроЭВМ. Основы организации: Справочник. – М.:Радио и связь, 1991. – 320 с.

34. *Нечунаев П.И., Сырямкин В.И., Титов В.С.* САПР систем технического зрения на основе координатно-чувствительных фотоприемников // Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе: Тез. докл. к пятому Всесоюз. совещ. – Барнаул: АПИ, 1989. – С. 12 – 13.

35. *Никитина Ю.А., Сырямкин В.И., Титов В.С.* Особенности обработки цветных изображений в телевизионных системах технического зрения. – Томск, 1991. – 36 с. Деп. ВИНИТИ 05.08.91, N3335-В91.

36. *Новоковский С.В.* Стандартные системы цветного телевидения. М.: Связь, 1976. – 368 с.

37. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. – М.: Высш. школа., 1980. – 311 с.

38. *Норенков И.П., Маничев В.Б.* Основы теории и проектирования САПР. – М.: Высшая школа, 1990. – 355 с.

39. *Оптико-телевизионная* измерительная система для неразрушающего контроля поверхности // Проспект ИФПМ СО РАН. – Томск: Красное Знамя, 1993. – 2 с.

40. *Оптимизация* технико-экономических характеристик радиоаппаратуры /С.Е.Алексеев, А. Н. Голиков, И.Л.Калюжный и др. – Киев:Тэхника,1990. – 192 с.

41. *Орлов Н.А., Колтовой Н.А.* Новая версия системы «Спектр» для разработки математического обеспечения бинарных систем технического зрения // Приборы и системы управления. – 1987. – N 3. – С. 8 – 9.

42. *Парвулюсов Ю. Б., Солдатов В. П., Якушенков Ю.Г.* Проектирование оптико-электронных приборов. – М.: Машиностроение, 1990. – 423 с.

43. *Пескова С.А.* Разработка методов проектирования внешних запоминающих устройств на магнитных дисках и ЦМД-микросхемах: Автореф.дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1991. – 35 с.

44. *Прикладные* телевизионные установки ПТУ-28-1, ПТУ-28-3, Инструкция по эксплуатации. – Новгород, 1976. – 52 с.

45. *Программно-аппаратный* комплекс для моделирования систем технического зрения /В.И. Сырямкин, В.С. Титов, А.А.Фомин и др. // Техническое и программное обеспечение комплексов полунатурного моделирования: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. Гродно, 1988. – М.: КМС правл. союза НИО, 1988. – Ч.1. – С. 82 – 83.

46. *Программное* обеспечение систем обработки изображений. /В. И. Сырямкин, Г. И. Неруш, А.А.Фомин и др. // Информ. лист. – N 214 – 90. – Томск: ЦНТИ, 1990. – 4 с.

47. *Разработка* САПР. В 10 кн. Кн. 2. Системотехнические задачи создания САПР /А.Н. Дангул, Л.Я. Полуян; Под ред. А.В.Петрова. – М.: Высш.шк., 1990. – 144 с.

48. *Разработка* САПР. В 10 кн. Кн.1. Проблемы и принципы создания САПР: Практ. пособие / А.В.Петров, В.М.Черненький, Под ред. А.В.Петрова. – М.: Высш. шк., 1990. – 143 с.

49. *Ряд* устройств ввода телевизионных изображений в микро-ЭВМ для систем технического зрения / В. И. Сырямкин, В.С. Титов, А.А.Фомин и др. // Разработка систем технического зрения и их применение в промышленно-

сти: Тез.докл. Респуб. научно-техн. конф. – Ижевск: Удмурт. республ. управл. статист., 1988. – С. 154 – 155.

50. *Садыков С.С, Кадыров Г.Х., Азимов Ш.Р.* Системы цифровой обработки изображений. – Ташкент: ФАН, 1988. – 168 с.

51. *Селезнев А.П.* Функционально-стоимостный анализ технологических процессов и оборудования: Электротехническая промышленность. Сер. 27. Общеотрасл. вопр. электропромышленности: Обзор.информ. М.: Информэлектро, 1987. – Вып. 6 (90). – 44 с.

52. *Система* технического зрения для определения цвета, формы и положения объектов в рабочей зоне робота /В. И. Сырямкин, В.С. Титов, О.С. Боровик и др. // Механизация и автоматизация производства. – 1991. – N 1. – С. 8 – 11.

53. *Системы* технического зрения: Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю. Г. Якушенков и др. Под ред. В.И. Сырямкина, В.С Титова. – Томск: МГП «РАСКО» при изд. «Радио и связь», 1992. – 367 с.

54. *Скворцов Н.Н., Омельченко Л.Н.* Организация функционально-стоимостного анализа на машиностроительных предприятиях. – Киев: Техника,1987. – 112 с.

55. *Славнин М.Г., Штыхно В.В.* Об алгоритмическом обеспечении автоматизированной системы эскизного проектирования КЭС анализа изображений // Корреляционно-экстремальные системы и их проектирование. Томск: ТГУ, 1988. – С. 117 – 122.

56. *Смирнов С.А.* Стереоперспектива в фотограмметрии. – М.: Недра, 1982. – 142 с.

57. *Соганов В.М.* Применнение концепции «проектирование в пределах заданной стоимости образца» при разработке военной РЭА (опыт США). Обзор // Радиоэлектроника за рубежем. – М.: НИИЭИР, 1982. – Вып.19. – С. 40.

58. *Создать* и испытать систему корреляционного зрения автоматического манипулятора ...: отчет о НИР (заключительный) / СФТИ; N ГР 01860005484. – Томск, 1985, ДСП. – 26 с.

59. *Справочник* по САПР / А.П.Будя, А.Е. Кононюк, Г.П. Куценко и др. – Киев: Техника, 1988. – 375 с.

60. *Сырямкин В.И.* Особенности проектирования корреляционных систем технического зрения // Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов: Тез.докл. 2-ой Всесоюз. конф. – Барнаул: АПИ, 1991. – Ч.2. – С. 135.

61. *Сырямкин В.И.* Принципы построения САПР корреляционных систем технического зрения // Разработка систем технического зрения и их применение в промышленности. – Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. – Уфа: УАИ 1992. – Ч.1 – С. 37 – 38.

62. *Сырямкин В. И., Колбина Л.В.* Оценка конструкторских решений на основе экспресс-ФСА: Методические указания по курсовому проектированию. – Томск: ТИАСУР, 1989. – 13 с.

63. *Сырямкин В.И., Колбина Л.В.* Выбор и обоснование вариантов технических решений на ранних этапах научно-исследовательских и конструкторских разработок на основе методов функционально-стоимостного анализа: Методические указания по курсовому проектированию. – Томск:ТИАСУР, 1988. – 17 с.

64. *Сырямкин В.И., Колбина Л.В.* Творческая форма функционально-стоимостного анализа при проведении научно-исследовательских работ: Методические указания по курсовым работам. – Томск: ТИАСУР, 1990. – 14 с.

65. *Сырямкин В.И., Титов В.С.* Автоматизированная система обработки изображений различной размерности и цветности // Обработка изображений и дистанционные исследования («ОИДИ – 90»): Тез. докл. Междунар. конф. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1990. – С. 181 – 182.

66. *Сырямкин В.И., Титов В.С., Нечунаев П.И.* САПР оптико-электронных систем обработки изображений // Применение оптико-электронных приборов и волоконной оптики в народном хозяйстве: Матер. семин. – М.: МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского, 1991. – С. 3 – 6.

67. *Сырямкин В.И., Титов В.С., Фомин А.А.* Аппаратно-программный комплекс для моделирования корреляционных систем технического зрения // Известия ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1991. – N3. – С. 26 – 31.

68. *Сырямкин В.И., Харламова Н.А.* Система автоматизированного проектирования корреляционных зрительных систем // Молодые ученные и специалисты – ускорению научно-технического прогресса: Тез. докл. 5-ой Регион.научн.-практ. конф. – Томск: ТГУ, 1986. – С. 84.

69. *Техническое* зрение роботов / В.И.Мокшин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков / – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

70. *Титов В.С., Колодин В.А., Кукин В.А., Кочанов А.С.* Моделирование технического зрения промышленных роботов. – Томск: ТГУ, 1989. – 113 с.

71. *Титов В.С., Сырямкин В.И., Боровик О.С.* Аппаратно-программный комплекс на базе микроЭВМ для обработки цветных и объемных изображений // Проблемы информатики: Тез. докл. Всесоюз. конф. с международным участ. – Тольятти: ПП «Современник, 1991. – С. 92 – 93.

72. *Тихонов В.И.* Статистическая радиоэлектроника. – М.: Сов. радио, 1966. – 677 с.

73. *Узилевскии В.А.* Передача, обработка и воспроизведение цветных изображений. – М.: Радио и связь, 1981. – 216 с.

74. *Устройства* ввода изображений в персональные ЭВМ /Г.И. Неруш, С.В. Панин, А.В. Парфенов, В.И. Сырямкин // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и

символьной информации: Тез.докл. Междун.конф. – Курск: КПИ, 1993. – С. 109.

75. *Хвощ С.Т., Варлинский Н.Н., Попов Е.А.* Микропроцессоры и микро-ЭВМ в системах автоматического управления: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1987. – 640 с.

76. *Шевкопляс Б.В.* Микропроцессорные структуры. Инженерные решения: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.

77. *Яблонский Ф.М., Троицкий Ю.В.* Средства отображения информации – М.: ВЫСШ.ШК., 1985. – 200 с.

78. *Blaine J.* Digital-image archiving and communication system // Digital Imaging Cardiovascular Radiol, 1983. – P. 35 – 40.

79. *Gruver W.A., Thomson C.T., Cawla S.D., Shitt L.A.* CAD off-line programming for robot vision // Robotics. 1985. – N2. – P.77 – 87.

80. *Reib W.* CAE/CAD – System fur die ektwicklung analog – digitaler Schaltungen // Elektronik Industrie. – 1990. V. 21, – N5. – P.104 – 108.

81. Titov V.S., Syryamkin V. I., Nechunaev P.I. The Building Principles of Automatic Visual Systems // International Symposium on Visual Analysis and Interface (VAI 91): Theses report – Novosibirsk, USSR: Computer Centre of Siberian Branch of USSR Acodemy of Sciences. 1991. – P.24 – 25.

# Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА В СОВРЕМЕННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

## 5.1. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ

Идеи *экстремальной навигации* хорошо известны, так как широко обсуждаются в открытой печати и публикуются в теоретических работах [3, 4, 18, 19, 21 – 29, 31, 38, 53]. Экстремальные системы навигации обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными системами: в них на единой методологической основе успешно решаются проблемы борьбы с систематическими и случайными погрешностями, задачи комплексного использования радиополей различной природы (гиперболических станций, радиомаяков, сигналов навигационных искусственных спутников Земли). Техническая реализация данных систем ориентирована на современные средства вычислительной техники и оптикоэлектронные средства обработки информации.

Огромное количество систем экстремальной навигации уже развернуто и успешно эксплуатируется. Особого внимания заслуживают задачи, решаемые подразделениями МЧС и военно-промышленного комплекса. В кризисных ситуациях использование электронно-картографических систем и систем экстремальной навигации может оказать большую помощь руководителю подразделения спасателей в обеспечении слаженности действий и безопасности каждого спасателя. Автономная электронно-картографическая навигационная система предназначена для использования в качестве рабочего места непосредственно в транспортном средстве (воздушном, морском, наземном) для решения задач экстремальной навигации. Система позволяет значительно повысить эффективность использования транспорта и безопасность его движения в сложных гидрометеорологических условиях и в незнакомой местности.

## 5.2. МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА МЕСТНОСТИ

Актуальное значение имеет разработка КЭС для местоопределения подвижных объектов, когда необходимо оценивать координаты [20]. Отличие данной КЭС состоит в следующем. В этой КЭС осуществлена доработка датчика ЭИ, устраняющего такие недостатки других вариантов КЭС, как низкая точность фиксации (остановки) и механическое повреждение ЭИ при смене кадра.

Для устранения отмеченных недостатков датчик ЭИ выполнен в виде магазина слайдов, который имеет механизм для установки слайда в коррелятор. Одна из сторон металлической рамки слайдов снабжена набором изолированных друг от друга контактов, с помощью которых можно устанавливать нужный код, необходимый для управления работой КЭС в зависимости от номера ЭИ. Достоинством описанного блока смены ЭИ является возможность коррекции погрешности установки ЭИ в корреляторе. Однако габариты и вес разработанного блока смены ЭИ не позволили осуществить простыми техническими средствами совместный поворот ЭИ, линзы и ТПТ анализатора ВКФ. Поэтому в этом варианте КЭС указанные элементы выполнены неподвижными, а угловое совмещение изображений осуществляется путем поворота запоминающей ЭЛТ вокруг оптической оси коррелятора.

Кроме этого, угловая и линейные координаты определяются в два этапа. На первом этапе производится построчно-кадровое сканирование ТПТ, осуществляемое блоком разверток, и грубая оценка координат глобального максимума ВКФ (блоком выделения максимума) с его последующим захватом следящим растром.

Положение центра растра управляется по сигналам от фазового дискриминатора, интегрирующего поквадрантно значения ВКФ только в окрестности глобального максимума. Введение в анализатор ВКФ схемы слежения за положением максимума ВКФ позволило значительно уменьшить влияние высокочастотной составляющей спектра шума диссектора и разработать блок углового совмещения изображений, в котором, в отличие от ранее описанного варианта, результаты построчно-кадрового сканирования изображения ВКФ использовались только при захвате глобального максимума.

Координаты объекта относительно исходной точки определяются по следующим формулам:

$$X_T = X_{Ti} + X_{0i}; \quad Y_T = Y_{Ti} + Y_{0i},$$

где $X_{Ti}$, $Y_{Ti}$ – текущие координаты в системе координат в точке съемки *i*-го кадра ЭИ; $X_{0i}$, $Y_{0i}$ – координаты центра *i*-го кадра ЭИ. Запоминание величин $X_{0i}$, $Y_{0i}$, а также номера диапазона дальности производится программным устройством. Смена кадра ЭИ происходит при условии

$$\beta_1 |X_{Ti}| + (1 - \beta_i)|Y_{Ti}| \geq a_i .$$

Причем $\beta_1$ может принимать значения 0 и 1, а $a > 0$.

Для оценки точностных характеристик КЭС были проведены лабораторные и полевые испытания. В процессе лабораторных испытаний на экран ИТИ накладывался трафарет с прозрачными участками, имитирующими отметки радиолокационных ориентиров, и производилось измерение и контроль положения рамки с ЭИ. Очевидно, что при этих условиях ошибки в оценке рассогласований изображений будут полностью определяться несовершенством прибора, при этом численное значение ошибок будет зависеть в основном от параметров изображений, определяющих значение кривизны или наклона ВКФ в окрестности глобального максимума. Поэтому лабораторные испытания КЭС проводились с изображениями, которые использовались в дальнейшем в натурных испытаниях. На рис. 5.1 представлены гистограммы отсчетов $N_y$ угловой (рис. 5.1, *а*, 5.2, *а*) и одной из линейных $N_л$ координат (рис. 5.1, *б*, 5.2 ,*б*) КЭС при использовании изображений, формирующих следующий вид ВКФ; ширина сечения ВКФ по линейным координатам составляет около 0,1 радиуса R экрана ИТИ на уровне 0,5 от максимального значения и около 20° для оценки угловой координаты. Из анализа рис. 5.1, 5.2 следует, что случайные составляющие ошибок, обусловленных погрешностями блоков КЭС, распределяются на интервалах, составляющих для линейных координат менее 0,2% от R и около 0,3° для угловой координаты. На рис. 5.2 представлены гистограммы отсчетов угловой (рис. 5.2, *а*) и продольной (рис. 5.2, *б*) координат КЭС, полученные в ходе натурных испытаний; при этом масштаб РЛС равен 5 м. Как видно из рис. 5.2 случайные составляющие ошибок в оценке координат КЭС определяют-

ся на интервалах, составляющих для линейных координат около 0,2% от радиуса R действия РЛС и несколько больше чем 0,3° для угловой координаты. Анализ рис. 5.1 и 5.2 показывает, что по сравнению с лабораторными при натурных испытаниях не произошло существенного ухудшения точности совмещения изображений по угловому и линейным сдвигам ТИ относительно ЭИ.

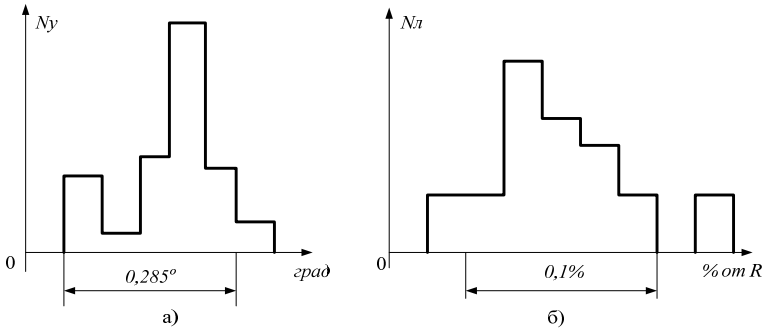


Рис. 5.1. Гистограммы отсчетов угловой (а) и линейных (б) координат при лабораторных исследованиях КЭС

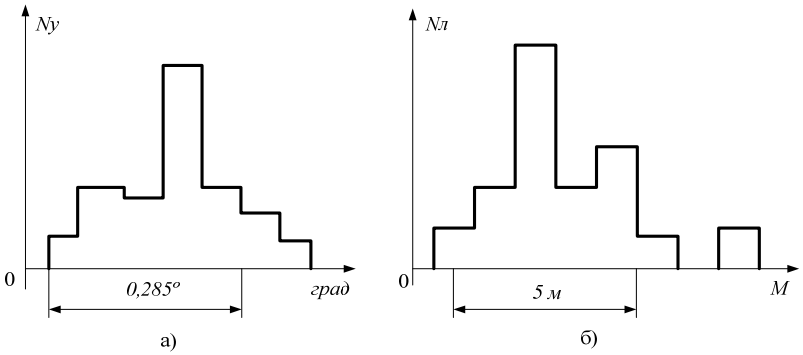


Рис. 5.2. Гистограммы отсчетов угловой (а) и линейных (б) координат при полевых исследованиях КЭС

Этот вариант КЭС имеет следующие характеристики:

– масштаб изображения, формируемого на экране ИТИ, 0,5; 1; 5; 25 км;

– СКО ошибки измерения линейных координат составляет 0,1 – 1% от радиуса действия РЛС;

– СКО ошибки измерения угловой координаты составляет 0,3 – 2,0°;

– оценка угловой координаты производится при развороте объекта на 360º относительно исходного положения;

– время смены одного ЭИ – 4 с.

В книге [4] приведено достаточно большое количество примеров реализации корреляционно-экстремальных систем в различных областях науки, техники, промышленности. Ниже дадим несколько примеров систем, в которых используются корреляционно-экстремальные методы.

## 5.3. БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

XXI в. будет столетием беспилотной боевой авиации (рис. 5.3). Оценки международных экспертов говорят, что к 2020 г. треть мирового парка военных самолетов технологически развитых государств станут беспилотными [9]. Особую актуальность беспилотные системы показали в контртеррористических операциях.

Бурное развитие беспилотных летательных аппаратов (БЛА) вызвано рядом их важных достоинств:

1. Отсутствие экипажа на борту, а значит, – устранение риска людских потерь.

2. Возможность выполнения маневров с перегрузкой, превышающей физические возможности летчиков.

3. Большая продолжительность и дальность полета при отсутствии фактора усталости экипажа.

4. Способность одновременно вести разведывательные и ударные функции как в тактической фронтовой, так и в стратегической зоне противника.

5. Относительно небольшая стоимость БЛА, малые затраты на их эксплуатацию и возможность массового производства недорогих, но весьма эффективных в боевых условиях летательных средств.

Ранее невозможные задачи на современном этапе развития научно-технологического прогресса получили реальное разрешение и достигли самых невероятных результатов. Сегодня возможности беспилотной авиации позволяют:

– активно вести разведку, в том числе выполнять съемку позиций и перемещения техники, войск и отдельных групп;

– значительно расширить обеспечивающие функции – целеуказание, постановку помех, ретрансляцию сигналов, оперативную доставку срочных грузов;

Рис. 5.3. Беспилотный летательный аппарат

– с появлением ударных беспилотных систем наносить точечные удары и по скоплениям войск противника, и по отдельным единицам техники, и даже военнослужащим, некоторые из перспективных систем могут выполнять функции высотного перехватчика стартующих баллистических ракет противника.

## 5.4. ГРУППОВОЙ ПОЛЕТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В последнее время значительно усилился интерес к беспилотным летательным аппаратам в связи с их успешным применением в ряде военных конфликтов [2, 5, 6, 16, 37, 48]. До настоящего времени *практически все БЛА имели только военное назначение и делились на два* основных класса: разведчики и мишени. Сегодня появилось множество новых задач для существующих и перспективных БЛА как

военного, так и гражданского назначения, например задача обеспечения группового полета БЛА. При решении этой задачи возникает ряд существенных технических проблем, поиск решения которых в настоящее время проводится как в России, так и за рубежом. Последние разработки в области автоматического управления групповыми полетами летательных аппаратов были ориентированы преимущественно на управление строем пилотируемых самолетов с большими дальностями между ними, а для БЛА выдвигаются требования полета в строю с дистанциями и интервалом 30 – 150 м [16].

США, используя достижения в области развития авиационных технологий, сформулировали следующие желательные возможности новых систем вооружения [40]:

- малое время реакции: быстрое нанесение ударов по удаленным целям (от часов до минут);
- достаточный радиус действия: достижение целей с континентальной части США или с передовых баз;
- одновременная подвеска различных типов современных авиационных средств поражения, в том числе и ядерных;
- высокая живучесть при действии в зоне ПВО противника: сверхмалая заметность;
- устойчивость: возможность (неоднократно) атаковать цели противника в течение длительного периода времени;
- полная ситуационная осведомленность: перспективные датчики;
- устойчивая связь: интеграция с глобальными военными компьютерными сетями;
- возможность автономного функционирования;
- гибкость, адаптивность и модульность: архитектура открытого типа.

Задача высокоточного группового управления БЛА в настоящее время является одной из актуальных. Необходимость развития техники полёта БЛА в строю выдвигает очень важное направление – создание систем межсамолётной навигации (СМСН) для БЛА с весьма ограниченными весом и объёмом. Эта необходимость определяется ещё и тем, что отсутствие в бортовом оборудовании БЛА систем межсамолетной навигации существенно ограничивает их возможности [47].

Автоматическое управление полётом летательных аппаратов в групповом порядке является одной из наиболее сложных научно-технических проблем авиации [3, 14, 43, 48, 52, 54, 55].

Она включает в себя:

– необходимость тактического обоснования рациональных видов строев;

– количество ЛА в группе;

– определени идеологии сбора ЛА в группу;

– выбор методов синхронного управления каждым ЛА группы для обеспечения безопасности полёта;

– точного выдерживания каждым ЛА группы своего места в строю на прямолинейных и криволинейных участках полёта всей группы в целом. Кроме того, возможность управления группой ЛА усложняется нестационарностью параметров полёта.

Методы управления ЛА определяют основные принципы, которые используются при проектировании систем управления ЛА в группе [3, 4, 18, 29, 31, 42, 53].

Для обеспечения необходимой точности процесса управления полётом строем ЛА система межсамолетной навигации должна строиться в виде замкнутой системы автоматического управления [51]. Это позволяет с единой точки зрения дать математическую модель её описания. Автоматизация управления полётом ЛА в групповом порядке связана с разработкой не только теоретических основ полёта, но и бортовых технических средств измерения относительного положения и систем управления [11, 13, 43, 48].

Создание средств измерения относительного местоположения ЛА в группе решает проблему обеспечения полёта ЛА в строю не полностью. Необходимо решить также задачу автоматизации обработки информации о параметрах относительного движения и параметрах полёта с целью формирования алгоритмов управления.

Существуют различные подходы к решению этой сложной задачи, отличающиеся как распределением функций управления между наземным пунктом управления и бортом, так и выбором принципов, которые могут быть положены в основу системы управления и которые определяют её конструктивные и динамические характеристики. Исследованию вопросов автоматизации управления полётом посвящены работы наших отечественных учёных: В.А. Боднера, С.В. Петрова, А.А. Красовского, Ю.П. Доброленского, В.Г. Тарасова,

В.П. Тарасенко. В их работах были сформулированы общие требования к системам автоматического управления ЛА:

– представлено математическое описание строя, как объекта управления;

– проведены исследования задачи управления самолётами в группе, по результатам которых сделан вывод о том, что строй, как динамическая система сам по себе, без регуляторов, принципиально неустойчив на всех режимах полёта;

– даны технические предложения по построению систем управления строем самолётов.

В работе [47] рассмотрены вопросы теории автоматизированных систем межсамолетной навигации, представлен большой обзор по системам управления полётом группы ЛА и методам измерения параметров относительного движения самолётов. Математической основой рассматриваемых в этой работе методов решения задач межсамолётной навигации является теория оценивания и фильтрации. В работах [43, 46] излагаются основы и специфика применения методов теории нелинейной фильтрации марковских последовательностей и процессов в задачах обработки навигационной информации, рассматриваются подходы, используемые при решении различного рода нелинейных задач. Анализ этих работ показывает, что их результаты ориентированы на построение систем межсамолетной навигации для полёта в строю с большими дальностями между ними и поэтому не могут быть в полной мере использованы в системах межсамолетной навигации БЛА, так как для них выдвигаются требования полёта в строю с дистанциями и интервалом 30 – 150 м. Развитие систем межсамолетной навигации идёт двумя путями:

1) создание автономных систем, не зависящих от наземных средств;

2) создание систем, использующих наземные радиомаяки.

Каждому из этих путей присущи свои преимущества и недостатки. Второй путь имеет один из недостатков, связанный с точностью определения взаимных координат движущихся в группе ЛА, что не позволяет использовать данный принцип для полёта БЛА в плотных групповых порядках. В то же время данная идеология может быть применена для полёта большого количества ЛА по нескольку ЛА в плотных группах, причём эти группы ЛА могут находиться между собой на расстояниях до десятков километров (по принципу «веду-

щий с ведущим»). Другим и основным недостатком такого пути является то, что он обеспечивает вождение ЛА в групповых порядках только в пределах прямой видимости радиомаячных систем. По мнению зарубежных специалистов, применение наземной аппаратуры для автоматического управления полётом группы ЛА технически легче реализуется, не накладывает ограничений на массу, объём и условия эксплуатации аппаратуры. Однако эти выводы не являются достаточно убедительными, поскольку автономная САУ позволяет решать задачи полёта строем без ограничений, накладываемых каналами связи с наземным пунктом управления, а также в условиях радиопротиводействия. Что касается вождения в строю беспилотных самолётов с использованием наземного радиотехнического комплекса, в состав которого входит обзорный радиолокатор, то относительно низкая разрешающая способность обзорного радиолокатора не может обеспечить определение координат с достаточной точностью, необходимой для вождения ЛА с требуемыми параметрами строя. Поэтому групповой полёт строем может быть осуществлен при дистанции между ЛА не менее 1,5 – 2 км. Использование методов *корреляционно-экстремальной навигации*, которые в настоящее время нашли применение в современных пилотажно-навигационных комплексах, невозможно для систем межсамолётной навигации БЛА в плотных боевых порядках из-за ограниченной точности, которая, по зарубежным данным, характеризуется сотнями метров. Таким образом, её применение недостаточно для полёта в плотных боевых порядках на основе четырёхмерной навигации каждого из ЛА. Однако этот принцип может быть использован для задачи сбора ЛА в группу. В этом случае на стадии подготовки полётного задания каждому ЛА назначается точка в трёхмерном пространстве, в которую он должен прибыть в назначенный момент времени в заданном направлении [3, 48].

Проблемы управления ЛА в группе можно объединить в три группы.

**Первая группа** проблем связана с решением задачи выбора алгоритмов управления и обработки информации для полёта ЛА в строю.

**Вторая группа** проблем определяется задачей построения САУ, которая будет вести ЛА согласно выбранному закону с точностью, получаемой из условия безопасности

**Третья группа** проблем заключается в выборе технических средств, с помощью которых можно обеспечить полёт ЛА в строю.

Технические средства, позволяющие осуществлять групповой полет ЛА, это прежде всего те приборы и устройства, которые позволяют определять параметры относительного движения ЛА. Они должны обеспечивать получение необходимой дальномерной и угломерной информации. Эта измерительная аппаратура может быть основана на самых различных физических принципах: радиотехнических, оптических, квантомеханических. Выбор алгоритмов управления и обработки информации, а в общем случи и алгоритма управления полётом ЛА в группе, реализованный в БЦВМ, должен обеспечивать решение следующих основных задач [18, 33, 47]:

– обработку результатов измерений с целью получения оценок параметров движения, используемых при определении управляющих воздействий;

– определение отклонений расчётных параметров от требуемых заданий;

– вычисление управляющих воздействий;

– отработку управляющих воздействий с помощью внутренних контуров управления и автомата управления тягой двигателя.

Ключевым вопросом при решении этой задачи является разработка математической модели относительного движения ЛА.

### 5.4.1. Ударные беспилотные летательные аппараты

В настоящее время объектом отечественных и зарубежных исследований все чаще становятся не *боевые беспилотные летательные аппараты (ББЛА*), функционирующие, как правило, в структуре особых беспилотных авиационных комплексов (БАК), а именно *беспилотные боевые самолёты (ББС)*. Такая постановка вопроса соответствует принятому в западных программах развития беспилотной боевой авиации (ББА) положению, что «особенностью ББС, отличающей их от ББЛА, является наличие определенных технических характеристик и возможность использования этих летательных аппаратов в существующей структуре боевой авиации без качественного её изменения». Согласно этой концепции «в спектре летательных аппаратов боевого применения ББС занимают промежуточное положение между истребителями 5-го поколения и перспективными крылатыми ракетами. Причем разработка беспилотных боевых самолётов направлена не на замену пилотируемой боевой авиации, а на создание некоторого ее

дополнения, способного на длительный срок продлить период эффективной эксплуатации самолетов 4- и 5-го поколения»[5, 6].

США проводят активные работы в области создания ударных беспилотных летательных аппаратов

Одной из значимых программ в области перспективных боевых БЛА является Программа единого ударного БЛА для ВВС и ВМС J-UCAS, которая осуществлялась Агентством перспективных исследовательских разработок МО США (DARPA) в интересах ВВС и ВМС США.

Программа J-UCAS ориентирована на исследования, демонстрацию и оценку перспективных технологий, необходимых для технической реализации ударных БЛА палубного и наземного базирования, способных выполнять основные боевые задачи ВВС и ВМС, а также определять мероприятия, необходимые для ускоренной разработки и производства таких боевых систем. Программой J-UCAS декларируется снижение рисков для ВВС и ВМС по созданию и приобретению эффективных и доступных боевых БЛА, способных дополнить группировки пилотируемых боевых самолетов (рис. 5.4). В Программе должна быть разработана концепция ударного БЛА, полностью интегрированного в перспективные объединенные силы будущего[5, 6, 30].

К факторам, определяющим потребность и актуальность работ в области ударных БЛА в США относятся факторы ограничения по времени реагирования и доступу к угрожаемым районам

Ударный БЛА для решения подобной задачи должен обладать следующими способностями:

- к длительному барражированию (в том числе при использовании дозаправки в воздухе);
- выживанию в условиях противодействия противника;
- поражению обнаруженных целей по оперативно выданному целеуказанию.

В 2004 г. на международной выставке в Фарнборо были представлены макеты **ББС X-45C** (рис. 5.5) и **X-47B** (рис. 5.6).

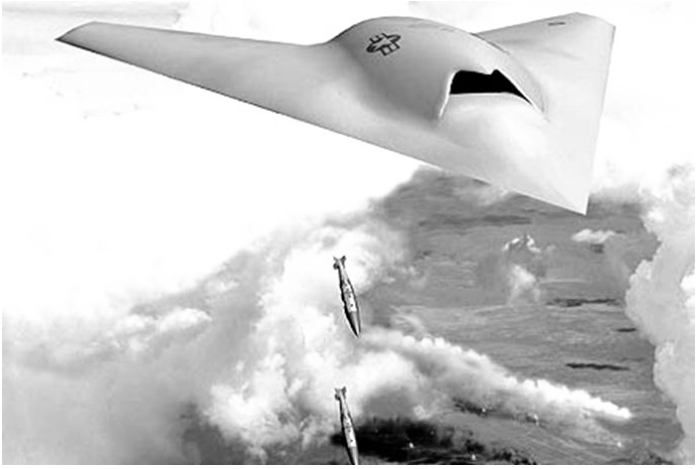

Рис. 5.4. Сетевой беспилотный ударный БЛА, обеспечивающий зону гарантированного удара в областях, недостижимых для большинства пилотируемых самолетов

Рис. 5.5. ББС X-45C фирмы Boeing

Рис. 5.6. БЛС X-47B фирмы Northrop Grumman

В настоящее время представлены новые модификации БЛА –это X-45C (рис. 5.7 ) и X-47B (рис. 5.8).

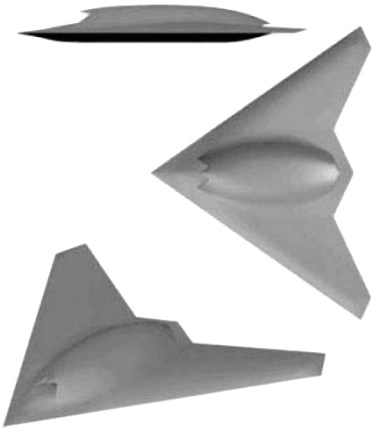

Рис. 5.7. БЛА X-45C

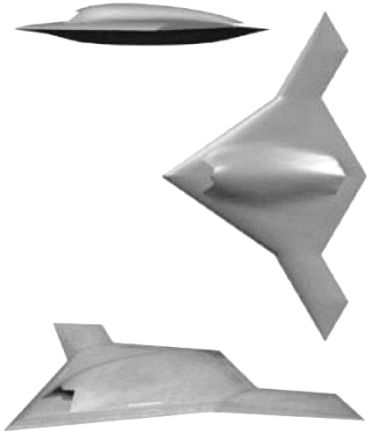

Рис. 5.8. БЛА X-47B

### 5.4.2. Беспилотная авиационная система БАС-62

ОКБ «Сухой» ведет разработку высотной системы БАС-62 [7].

25 таких аппаратов (рис. 5.9 , 5.10 ), по расчетам специалистов, способны создать над Россией сплошное радиолокационное поле. БАС-62 по ряду важнейших характеристик должен превосходить лучший зарубежный аналог «Глобал Хоук» [16].

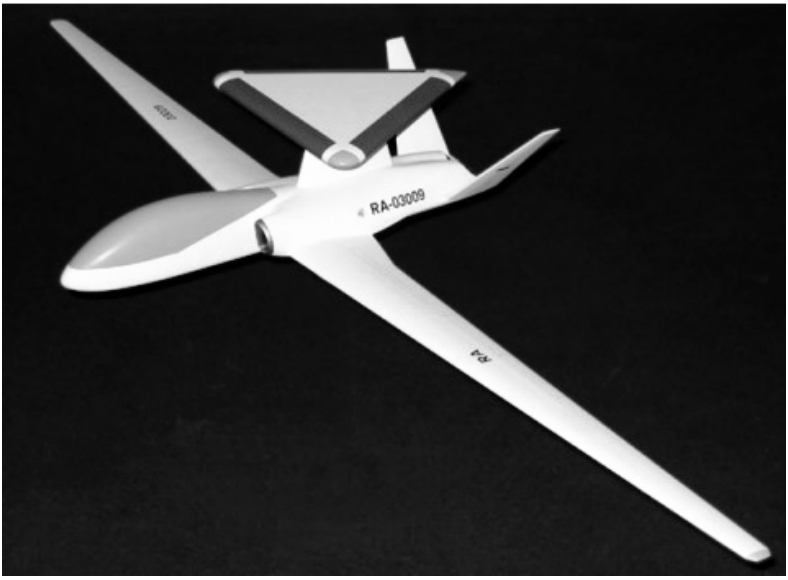


Рис. 5.9. Беспилотник системы БАС-62

БАС-62 решает предельно широкий круг задач:

– способен обнаруживать воздушные, надводные и наземные объекты различного класса (с передачей информации в реальном масштабе времени);

– бортовое оборудование позволяет осуществлять аэрофотосъемку (картографирование);

– инспекцию соблюдения договорных режимов в рамках программы «Открытое небо»;

– мониторинг гидрометеообстановки, наблюдение за активно излучающими объектами (при выполнении экологического мониторинга комплекс может вести радиационный и газохимический контроль,

определять состояние нефте- и газопроводов, а также проводить «опрос» сейсмических датчиков);

– контроль линий электропередач.

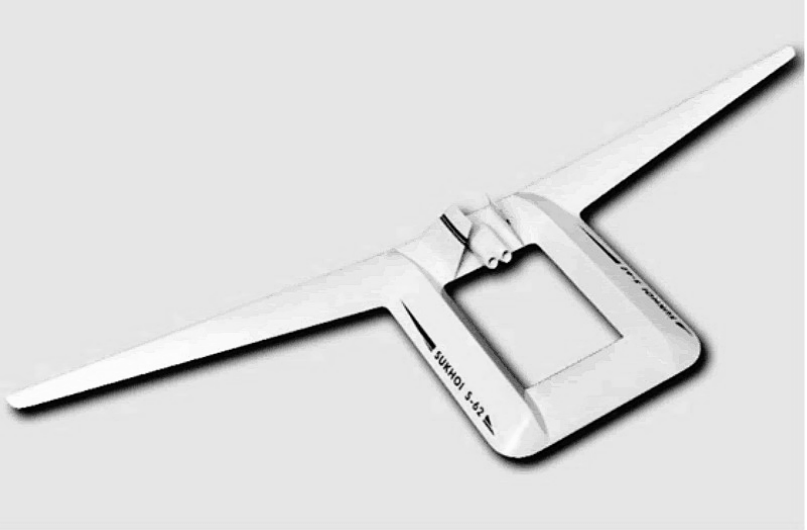


Рис. 5.10. Беспилотник системы БАС-62

БЛА С62А включает радиолокационный и оптический комплексы.

В радиолокационный комплекс входит РЛС метрового диапазона «Резонанс». Станция способна обнаруживать и устойчиво сопровождать (определяя координаты) воздушные цели различных типов: крупноразмерные магистральные самолеты, самолеты авиации общего назначения, высокоскоростные самолеты, а также вертолеты практически всех типов – на дальности до 500–600 км.

Оптический комплекс наблюдения позволяет существенно повысить точность измерения координат воздушных объектов, а также получать дополнительную информацию о ситуации в воздухе.

Перспективные БПЛА с большой высотой и продолжительностью полета могут использоваться в системе тактической противоракетной обороны. На беспилотных самолетах могут размещаться как датчики, способные обнаруживать и отслеживать тактические и оперативно-тактические баллистические ракеты противника, так и оружие, пред-

назначенное для поражения ракет на активном участке траектории, когда они наиболее уязвимы.

С62 может быть интегрирован в уже существующие системы в качестве средства [7]:

- создания эшелонированного радиолокационного поля;
- создания региональных и межрегиональных телекоммуникационных и навигационных систем,
- ретрансляторов и систем связи, в том числе и мобильных;
- аэрофотосъемки;
- контроля сухопутных и морских границ;
- обеспечения антитеррористических операций и т. д.

### 5.4.3. Семейство авиационных комплексов «Иркут»

Корпорация «Иркут» разработала семейство авиационных комплексов дистанционного зондирования земной поверхности на базе беспилотных и опционально пилотируемых летательных аппаратов в составе «Иркут-2М», »Иркут-10», «Иркут-200», «Иркут-850», «А-002М» [8].

**«Иркут-10»**

Авиационный комплекс дистанционного зондирования Иркут-10 (рис. 5.11) выполняет задачи круглосуточного мониторинга в широком диапазоне метеоусловий, обеспечивая получение и передачу на землю в реальном масштабе времени телевизионного, тепловизионного и фотографического изображений местности, определение координат наземных объектов по целеуказанию оператора, а также сбор, накопление и комплексную обработку видеоинформации.

Комплекс состоит из двух беспилотных летательных аппаратов, наземных средств управления и технического обслуживания.

Летательный аппарат выполняет полет в течение 2 часов и в реальном масштабе времени передает информацию от датчиков полезной нагрузки на наземную станцию управления, расположенную в радиусе до 70 км.

Время подготовки БПЛА к старту, включая проверку исправности, ввод полетного задания и приведение в состояние стартовой готовности, не превышает 15 минут.

Запуск БПЛА осуществляется с переносной катапульты, посадка выполняется без применения специализированных аэродромных

средств обеспечения при помощи парашюта на необорудованные грунтовые площадки.

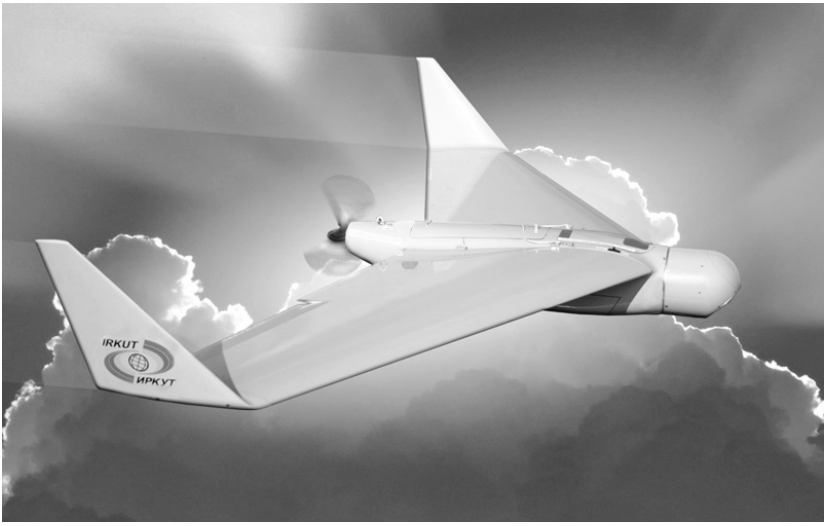


Рис. 5.11. «Иркут-10»

В конструкции БПЛА широко использованы композитные материалы, имеющие высокую прочность при относительно малой массе, а также устойчивость к воздействию внешних факторов. Конструкция обеспечивает быструю сборку и разборку без применения специальных технических средств.

Комплекс отличается гибкостью эксплуатации благодаря возможности использования различной полезной нагрузки в зависимости от решаемой задачи, а также низкой стоимостью эксплуатации и жизненного цикла [8].

**«Иркут-200»**

Авиационный комплекс дистанционного зондирования «Иркут-200» (рис. 5.12) предназначен для получения в реальном масштабе времени фотографического, телевизионного, тепловизионного и радиолокационного изображений местности, комплексной обработки полученных данных, а также определения координат наземных объектов по выбору оператора. Кроме того, «Иркут-200» может применяться для доставки компактных грузов.

Рис. 5.12. «Иркут-200»

Комплекс состоит из двух беспилотных летательных аппаратов, наземной системы управления и средств технического обслуживания.

Летательный аппарат выполняет полет в течение 12 часов и передает информацию от датчиков полезной нагрузки на наземную станцию управления, расположенную в радиусе до 200 км.

Запуск и посадка летательного аппарата выполняются без применения специализированных аэродромных средств обеспечения с необорудованных грунтовых площадок или участков дорог длиной 250 м.

Комплексы дистанционного зондирования, разнообразные по составу и решаемым задачам, представляют собой универсальный ряд летательных аппаратов, бортовых средств наблюдения, а также наземных средств управления, приема и обработки данных.

Пользователи комплексов получают возможность решения широкого спектра задач – от наблюдения с высоким разрешением и мониторинга чрезвычайных ситуаций, поиска, обнаружения и определения координат объектов до доставки грузов. Достоинством комплексов является возможность использования различной полезной нагрузки в зависимости от решаемой задачи, а также низкая стоимость эксплуатации и жизненного цикла. Кроме того, комплексы отличаются высо-

кой степенью автономности вследствие минимальных потребностей в средствах аэродромного обеспечения.

Каждый авиационный комплекс обеспечивает эффективную информационную поддержку при ликвидации чрезвычайных ситуаций в правоохранительной, природоохранной и хозяйственной деятельности. Обеспечивается эффективное применение авиационных комплексов в совместных операциях с наземными средствами и пилотируемой техникой, например с многофункциональным самолетом-амфибией Бе-200 [8].

## 5.5. ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОБЪЕКТЫ ПОРАЖЕНИЯ

Достижения научно-технической революции в военном деле кардинальным образом изменяют взгляды на характер и способы применения военной силы в международных и внутренних конфликтах, обусловили появление и развитие качественно новых средств вооруженной борьбы. Это в первую очередь относится к высокоточному оружию (ВТО), массированное использование которого позволит решать задачи не только оперативного, но и стратегического характера.

В ракетных комплексах первого поколения ВТО использовались рельефометрические *корреляционно-экстремальные системы* с предельной ошибкой около 100 м, что на порядок превышало точность нанесения ударов ракетами, снабженными классическими инерциальными навигационными устройствами.

Комплексы второго поколения ВТО снабжены датчиками мелкоструктурных геофизических полей и в отдельных случаях – системами наведения на цель, которые, как правило, комплексируются с рельефометрическими КЭС для устранения значительных начальных промахов.

В настоящее время в развитых странах проводятся исследовательские работы по созданию ВТО нового, третьего поколения – так называемого прецизионного оружия с предельной ошибкой наведения не более 10 м. Требуемый уровень эффективности поражения цели может быть достигнут лишь при условии нанесения избирательных ударов по наиболее важным и уязвимым элементам объекта, определяющим его функционирование.

Под избирательностью будем понимать способность ВТО производить выбор условий, способов или параметров воздействия на цель для нанесения объекту максимально возможного (или заданного) ущерба.

Избирательность, например, может заключаться: в поражении строго определенной элементарной цели или их комбинации – «целевая избирательность»; в определении времени воздействия (момент выхода целей из укрытий, преодоление водной преграды, посадка на аэродром и т.п.) – «временная избирательность»; в выборе поражающего фактора (ударная волна, осколочное действие) – «избирательность фактора воздействия».

Целевая избирательность является одним из важнейших свойств ВТО, в значительной степени определяющим эффективность его функционирования.

Кроме того, реализация целевой избирательности ВТО предполагает решение ряда принципиально важных задач, к которым, в частности, относятся:

– разработка наземных и бортовых систем распознавания, позволяющих определить положение и тип каждой элементарной цели, входящей в состав объекта;

– создание интеллектуальных систем поддержки принятия решения о выборе комбинации поражаемых элементарных целей в зависимости от поставленной задачи;

– выделенного наряда сил и средств, фоноцелевой обстановки и других факторов;

– оснащение средств поражения прецизионными системами наведения, выводящими ракету в точку, в которой подрыв боевой части обеспечит поражение заданной комбинации элементарных целей;

– организация системы контроля результатов нанесения ударов по объектам;

– обеспечение уровня помехоустойчивости систем разведки, целеуказания и наведения, достаточного для достижения требуемой вероятности выполнения задачи в сложной фоноцелевой обстановке [1, 11, 12].

***Крылатые ракеты «Томахок».***

ВВС и ВМС США неоднократно наносили по противнику мощные упреждающие удары крылатыми ракетами (рис. 5.13 ) воздушно-

го и морского базирования (КРВБ, КРМБ) [17]. Широкое применение крылатых ракет объясняется целым рядом причин:

- во-первых, благодаря этому резко снижаются потери авиации (как в дорогостоящей пилотируемой технике, так и в летном составе);
- во-вторых, малая отражающая поверхность по сравнению с самолетами и незначительные высоты подлета к цели резко уменьшают вероятность и дальность обнаружения КР радиолокационными станциями, что, в свою очередь, определяет низкие возможности по обстрелу и уничтожению ракет противником;
- в-третьих, преимущества крылатых ракет – их всепогодность, способность попадать в цель независимо от метеоусловий и времени суток.

Вследствие всего этого КР можно использовать в качестве передового эшелона воздушного наступления, для подавления вражеской ПВО [34, 39].

Развитие системы управления КР «Томахок» обусловлено поиском и выбором системы коррекции для повышения точности наведения ракеты на цель на конечном участке ее полета.

. В состав ее бортовой аппаратуры входят: инерциальная система управления с коррекцией траектории по рельефу местности, радиовысотомер, БЦВМ и усилитель мощности.

Накопление ошибки автономной инерциальной системой управления при пуске на большие дальности приводит к тому, что вероятное отклонение ракеты превосходит зону поражения боевой части КРМБ.

В связи с этим возникла необходимость осуществлять коррекцию инерциальной системой управления с помощью корреляционно-экстремальной системы «Терком» по рельефу местности при помощи радиовысотомера.

В систему управления и наведения стратегических КР с обычной боевой частью BGM-109C и D включена *электронно-оптическая корреляционная подсистема* DSMAC, которая позволяет существенно повысить точность стрельбы. В ней используются цифровые картины предварительно отснятых районов местности по маршруту полета КР.

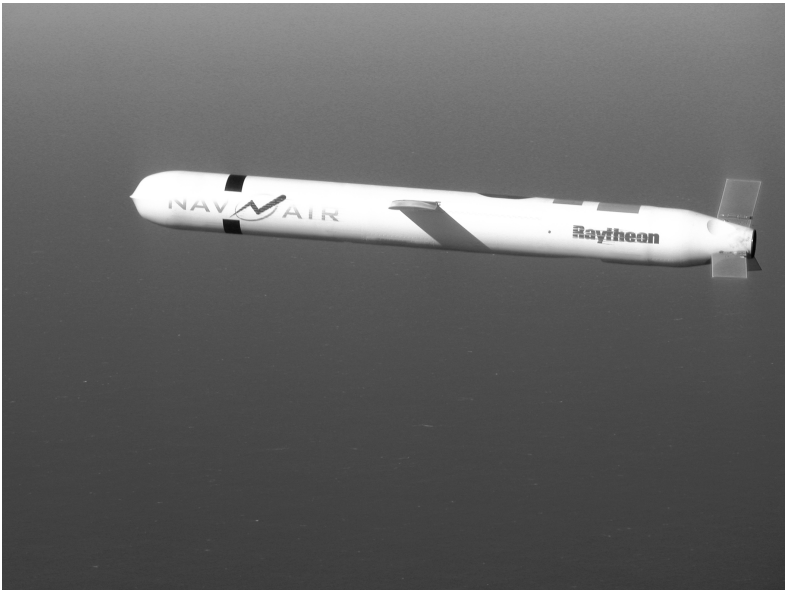


Рис. 5.13. Крылатая ракета «Томахок»

Полетное задание, загружаемое в БЦВМ ракеты, включает в себя:

– карты местности с определением нескольких зон коррекции с учетом направления захода на объект удара;

– наличие средств ПВО противника и рельефа местности;

– координаты цели и параметры траектории полета ракеты.

Основной проблемой применения «Томахок» BGM-109A в обычном варианте стало большое вероятное отклонение (в пределах 400 – 500 м). Для повышения точности стрельбы в состав бортового оборудования (кроме ИСУ с коррекцией траектории по данным КЭС «Терком») была включена оптико-электронная система коррекции траектории ракеты *по цифровым картам местности* «Диджисмэк».

Принцип, работы системы «Диджисмэк» такой же, как и у КЭС «Терком», но в отличие от последней, в ней используются цифровые карты местности, которые входят в массив данных полетных заданий и хранятся в памяти БЦВМ.

Оптико-электронное устройство работает в видимом диапазоне длин волн. Усилитель позволяет получать устойчивое изображение

ночью и при неблагоприятных условиях. Для повышения уровня освещенности используется ксеноновая лампа-вспышка. Благодаря применению системы «Диджисмэк» точность стрельбы составляет несколько десятков метров.

Применение оптико-электронной системы позволило эффективно применять обычное средство поражения массой до 450 кг.

Но оптико-электронная система в видимом диапазоне волн имеет свои недостатки:

- невозможность выполнения коррекции в туманах, облаках, сложных метеоусловиях;
- невозможность выполнения коррекции над пустыней, водным пространством, ледяной поверхностью;
- подверженность искусственным помехам в виде туманов, дымов;
- невысокие показатели выполнения коррекции ночью и в сумерках;
- выполнение пуска ракеты не должно производиться с расстояния больше 500 км из-за трудности входа в зону первой коррекции по радиовысотомеру, что затрудняло выполнение маневра носителю данного типа ракет и «привязывало» его к берегу.

Для повышения надежности выполнения коррекции в любых метеоусловиях и времени суток и выполнения пуска на большую чем 500 км дальность было предложено применять на борту «Томахок» спутниковые навигационные системы.

Крылатая ракета морского базирования «Томахок» BGM-109C предназначена для поражения различных стационарных среднезащищенных наземных объектов [15, 36].

Данная ракета отличается от предшествующих модификаций тем, что наряду с ИСУ и КЭС «Терком» она оснащена приемником космической радионавигационной системы «Навстар» и усовершенствованной системой коррекции траектории по цифровым картам местности «Диджисмэк-2А», благодаря чему точность на максимальной дальности достигла нескольких метров.

Аппаратура КРНС «Навстар» обеспечивает коррекцию ИСУ на всем протяжении маршрута полета до выхода ракеты в район цели.

Приемное устройство КРНС «Навстар» может работать совместно с системой «Терком» или самостоятельно при полете ракеты над равнинной местностью, водной поверхностью, льдом, пустыней и т. п., где работа КЭС невозможна или неэффективна.

Применение аппаратуры космической радионавигации позволяет производить пуск КРМБ без ограничений по дальности расположения зоны пуска от береговой черты, при необходимости гибко планировать маршруты полета ракет без жесткой привязки к зонам коррекции КЭС «Терком» и с учетом рельефа местности.

Разработанная модификация крылатой ракеты морского базирования «Томахок» BGM-109C является дальнейшим шагом по повышению надежности выхода на цель при помощи использования системы спутниковой навигации, что позволяет решить ряд задач, с которыми не справлялась система оптико-электронной коррекции, выполнение коррекции в тумане, в сложных метеоусловиях, при полетах над пустынной местностью, во льдах, над морем.

Для повышения помехозащищенности спутниковой системы было предложено использовать высокопомехоустойчивый приемник КРНС «Навстар» с адаптивной антенной решеткой, а так же новую оптико-электронную систему конечного наведения «Диджисмэк-2А» с новым оптико-электронным устройством ночного видения, что позволяет выполнять наведение на цель ночью.

Следующим шагом в развитии оружия этого типа явилась крылатая ракета морского базирования BGM-109E, предназначенная для поражения наиболее важных объектов военной и промышленной инфраструктуры, а также стационарных и мобильных целей.

Для данной ракеты используется автоматизированная система планирования районов патрулирования ракет LARIAT, которая включает устройство отображения тактической обстановки, что позволяет разрабатывать маршруты полета КРМБ в выбранных районах, оценивать эффективность планируемых задач и представлять изображение тактической обстановки.

Одной из основных трудностей при планировании и распределении ударов является отсутствие или получение устаревшей информации о состоянии объектов поражения и изменении обстановки в районе боевых действий. Для решения этой задачи в носовой части ракеты планируется установка видеокамеры.

Для расширения возможностей по поражению мобильных целей КРМБ имеет возможность патрулировать в течение 2 часов в заданном районе и, используя линию передачи данных, гибко реагировать на изменение оперативно-тактической обстановки и информации о целях. Время перенацеливания составит несколько минут.

Для повышения точности стрельбы КРМБ планируется установить тепловизионную систему самонаведения, которая позволит распознавать заданную цель путем сравнения ее с реальным образом цели. Также планируется установить лазерную систему конечного наведения, что позволит повысить точность наведения до 1 м.

Основными элементами данного устройства являются *оптико-электронный координатор* с подсистемой формирования и наведения лазерного луча, генератор излучения и анализатор изображения. Согласовывая трехмерные модели фактического и эталонного изображения, анализатор будет способен идентифицировать цель и выбирать оптимальную точку прицеливания (БЦВМ КРМБ «Томахок» способна хранить в памяти до 100 целей).

Особенностями данной ракеты помимо повышенной точности наведения на цель являются [17]:

– возможность оператора самостоятельно разрабатывать полетное задание;

– многовариантность при выработке огневых задач и маршрутов полета;

– нанесение ударов «по вызову» с учетом уточненных координат или по вновь выявленным целям;

– малое время реакции и короткие интервалы между пусками ракет;

– перенацеливание ракет в воздухе;

– широкая номенклатура поражаемых объектов;

– совместимость с другими морскими системами боевого управления, позволяющими координировать ракетные удары.

Специалисты обращают также внимание на жесткую зависимость полета крылатой ракеты от определенной пересеченности рельефа местности. Из-за этого приходится направлять большое количество КР по одному или нескольким близко расположенным маршрутам.

Прогнозирование маршрута полета КР позволяет выстроить эшелонированную объектовую систему ПВО. Для определения маршрутов полета КР необходимо использовать и применять моделирующие

комплексы, которые позволят оценить опасные направления и эффективно распределить силы и средства ПВО.

Основными задачами построения системы ПВО при этом являются:

– определение вероятных маршрутов полета КР;

– создание замкнутой глубокоэшелонированной системы оповещения полетов КР;

– применение самолетов дальнего радиолокационного обнаружения;

– построение глубокоэшелонированной системы ПВО, которая должна включать в себя истребительную авиацию, зенитные ракетные комплексы большой и малой дальности, зенитную артиллерию;

– непрерывное управление системой ПВО с высокой надежностью и помехозащищенностью;

– применение обеспечивающих действий: постановку помех системам спутниковой навигации, использование дымов на удалении от 25-30 км от объекта удара и инфракрасных заграждений для сбоя работ оптико-электронных и тепловизионных систем конечного наведения, применение управляемых аэростатов.

Отмечается низкая эффективность крылатых ракет при нанесении ударов по критичным по времени или движущимся целям.

Учитывая современные темпы модернизации и совершенствования крылатых ракет, круг задач, решаемых КР, еще более расширится. Вместе с тем постоянный учет возможностей модернизированных систем конечного наведения крылатых ракет позволит эффективно противодействовать этому типу оружия.

## 5.6. РАКЕТНЫЙ КОМПЛЕКС «ТОПОЛЬ-М»

В конце 1993 г. Россия заявила о разработке новой отечественной ракеты, призванной стать основой перспективной группировки ракетных войск стратегического назначения [49]. Разработка ракеты РС-12М2, получившей название «Тополь-М» (рис. 5.14), ведется российской кооперацией предприятий и конструкторских бюро.

Рис. 5.14. Ракетный комплекс «Тополь-М»

Головным разработчиком комплекса является Московский институт теплотехники.

Ракета «Тополь-М» создается как модернизация МБР РС-12М.

При создании систем и агрегатов мобильной пусковой установки, комплекса “Тополь-М” использованы принципиально новые технические решения. Так, система неполного вывешивания дает возможность развертывать комплекс “Тополь-М” даже на мягких грунтах. Улучшены проходимость и маневренность установки, что повышает ее живучесть. «Тополь-М» способен производить пуски из любой точки позиционного района, а также обладает улучшенными средствами маскировки как против оптических, так и других средств

Главные достоинства РК «Тополь-М» заключаются в особенностях полета и боевой устойчивости при проникновении сквозь системы возможной противоракетной обороны противника. Три маршевых твердотопливных двигателя позволяют ракете набирать скорость намного быстрее всех предыдущих типов ракет. Более высокая энерге-

тика ракеты позволяет снизить эффективность ПРО на активном участке траектории. Кроме того, ракета РС-12М2 несет комплекс средств прорыва ПРО больше, чем американская МХ с 10 боеголовками.

Для «Тополя-М» создана маневрирующая головная часть, что не позволяет осуществить ее перехват и уничтожение существующими и перспективными системами противоракетной обороны. Оснащение регулярных частей мобильными «Тополями-М» с новыми боеголовками началось в 2006 г. Параллельно новые боеголовки планируется установить на уже развернутые в количестве 40 единиц шахтные «Тополя-М» и перспективные морские ракеты «Булава», создаваемые для вооружения атомных подлодок. Ракета РС-12М2 «Тополь-М» унифицирована с перспективными ракетами «Булава», создаваемыми для вооружения атомных подлодок стратегического назначения проекта 955 [49].

### 5.6.1. Межконтинентальная баллистическая ракета РС-24

29 мая 2007 г. в 14.20 по московскому времени с космодрома Плесецк был осуществлен первый испытательный пуск прототипа новой межконтинентальной баллистической ракеты РС-24, оснащенной разделяющейся головной частью [41]. Запуск был осуществлен с мобильной пусковой установки, специально переоборудованной для испытаний РС-24 (рис. 5.15).

Рис. 5.15. Ракетный комплекс РС-24

Основные цели первого пуска новой МБР достигнуты, задачи выполнены в полном объеме. После завершения государственных лет-

ных испытаний и принятия этой ракеты на вооружение РС-24 вместе с РС-12М2 «Тополь-М» (имеющей моноблочную головную часть) должна составить основу ударной группировки Российских ракетных войск стратегического назначения. Разработчиком РС-24 является Московский институт теплотехники

РС-24, как и «Тополь-М», будет унифицированной как для шахтного, так и для подвижного грунтового ракетных комплексов. В конструкции РС-24 сконцентрированы все последние достижения в области ракетостроения [41].

### 5.6.2. Стратегическая ракета морского базирования «Булава»

Ракета Р-30 3М30 «Булава» (рис. 5.16) предназначена для поражения важных стратегических целей на территории противника [10].

На «Булаве» применили принцип «виноградной грозди». Машина может индивидуально «развозить» боеголовки сразу по нескольким целям. Радиус действия – не менее 8 тыс. км.

Маршевые двигатели первой и второй ступеней выполнены твердотопливными. Третья ступень для обеспечения необходимой скорости и маневрирования на заключительном участке траектории оснащена жидкостным двигателем.

В качестве полезной нагрузки ракета может нести 6 – 10 гиперзвуковых маневрирующих ядерных блоков индивидуального наведения общей массой 1,15 т., способными менять траекторию полета по высоте и курсу. Такой маловысотный профиль полета, по мнению экспертов, дает основание причислить ракету к квазибаллистическому типу.Старт ракеты наклонный, что позволяет подводному ракетоносцу осуществлять пуск ракет на «ходу».

В качестве носителей МБР «Булава» планируются новые российские подводные лодки модернизированного пр.941 «Акула» - »Дмитрий Донской», «Архангельск» и «Северсталь», а также пр.955 5 поколения «Борей» - «Юрий Долгорукий», «Александр Невский» и «Владимир Мономах», которых предполагается построить всего пять субмарин. Каждая АПЛ будет нести 16 (первая-12) МБР «Булава» с разделяющейся головной частью.

Производство ракет «Булава» будет развёрнуто на ФГУП «Воткинский завод», который производит ракеты «Тополь-М». Обе ракеты высоко унифицированы между собой [10].

Рис. 5.16 Ракета Р-30 3М30 «Булава»

По мнению руководства Московского института теплотехники, современная и перспективная системы национальной противоракетной обороны США, а также создаваемые национальные системы ПРО Германии, Франции и Японии не смогут зафиксировать полет ракеты «Булава», также как они не могут видеть и полета МБР «Тополь-М». Обе ракеты оснащены системами активного преодоления противоракетной обороны [32].

## 5.7. ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИЙ РАКЕТНЫЙ КОМПЛЕКС «ИСКАНДЕР-М»

Оперативно-тактический ракетный комплекс (ОТРК) «Искандер-Э» (рис. 5.17) – это современный образец вооружения, в котором реализованы новейшие достижения науки и конструкторской мысли [35].

Наличие на вооружении сухопутных войск оперативно-тактических ракетных комплексов «Искандер-М» позволяет вывести из строя важнейшие элементы ПРО противника еще до старта его баллистических ракет.

ОТРК «Искандер» создан с использованием современных научно-технических и конструкторских достижений в области разработки оперативно-тактических ракетных комплексов. По совокупности реализованных технических решений, высокой боевой эффективности сегодня он является высокоточным оружием нового поколения, которое по своим тактико-техническим характеристикам превосходит существующие отечественные ракетные комплексы «Скад-Б», «Точка-У», а также зарубежные аналоги Lance, ATACMS, Pluton и др.

Рис. 5.17. Оперативно-тактический ракетный комплекс «Искандер-Э»

К его основным особенностям следует отнести [35]:

– высокую огневую мощь ракетного удара за счет размещения на одной мобильной пусковой установке двух ракет;

– эффективное поражение одной-двумя ракетами большой номенклатуры целей боевыми частями обычного снаряжения за счет применения современных боевых частей, высокой точности и надежности ракеты;

– умения преодолевать противоракетную оборону противника;

– высокую эффективность нанесения ракетных ударов и оперативность управления за счет доведения автоматизации боевого управления до пусковой установки;

– широкие возможности модернизации комплекса, в том числе по наращиванию боевого оснащения, повышению точности стрельбы ракеты и в других направлениях. Благодаря своим характеристикам комплекс является “оружием сдерживания” в локальных конфликтах, а для стран с ограниченным жизненным пространством становится стратегическим оружием.

Важнейшей особенностью пусковой установки стало размещение на ней двух ракет(рис. 5.18). Через одну минуту после пуска первой из них может стартовать вторая.

«Искандер-Э» может доставлять к цели кассетную (с 54 боевыми элементами), проникающую, осколочно-фугасную, а в перспективе и другие боевые части. Это позволяет поражать малоразмерные и площадные цели, среди которых огневые средства противника, системы ПВО и ПРО, авиация на аэродромах, командные пункты и т.д

Ракета (рис.5.19) - одноступенчатая, имеет двигатель с одним соплом, небаллистическая и управляемая на всей траектории полёта с помощью аэродинамических и газодинамических рулей. Большая часть траектории полёта ракеты, изготовленной по технологии «Стелс» и имеющей малую поверхность рассеивания, проходит на высоте 50 км, что существенно уменьшает вероятность ее поражения противником. Эффект «невидимости» достигается за счет совокупности конструктивных особенностей, в частности, обработки ракеты специальными покрытиями, сбрасывания выступающих частей после пуска и др. Траектория «Искандера» является не только небаллистической, но и труднопрогнозируемой. Сразу после старта и непосредственно при подлёте к цели ракета выполняет интенсивное маневрирование. В зависимости от траектории, перегрузки колеблются в пределах от 20 до 30 единиц. Соответственно ракета-перехватчик должна выдерживать перегрузку как минимум в 2-3 раза выше, что создает

разработчикам систем борьбы с «Искандером» дополнительные трудности.

Рис. 5.18. Размещение на ОТРК «Искандер-Э» двух ракет

С задачей создания аппаратуры для «Искандера-Э» справился ЦНИИ автоматики и гидравлики (ЦНИИАГ) – ведущий разработчик систем наведения и управления для отечественных тактических и оперативно-тактических ракет, имеющий 25-летний задел в области разработки головок самонаведения.

В качестве основного способа решения этой задачи было выбрано объединение инерциальной системы с *оптическим наведением по окружающей цель местности*. Созданная в ЦНИИАГ головка самонаведения может быть использована как в составе «Искандера-Э», так и на баллистических и крылатых ракетах различных классов и типов (в том числе и межконтинентальных). Эта ГСН прошла летные испытания и показала точность не хуже, чем достигли американцы на своих «Томагавках». В настоящее времени осуществлено серийное производство этой головки [35].

Принцип действия систем самонаведения, имеющих научное название *корреляционно-экстремальных*, состоит в том, что оптическая аппаратура формирует изображение местности в районе цели, которое сравнивается в бортовом компьютере с эталонным, после чего выдаются корректирующие сигналы на органы управления ракеты. Подобный принцип управления имеет свои достоинства и недостатки.

Начнём с последних. Поскольку система распознает не саму цель, а местность вокруг неё, она не может обеспечить наведение на подвижный объект. Для формирования полётного задания необходимо иметь разведывательный снимок. Работе ГСН может помешать туман или выставленное противником аэрозольное облако, скрывающее местность. Если головка установлена на баллистической ракете, ее работе может помешать низкая облачность (для крылатых ракет, способных летать на малых высотах, этой проблемы не существует).

Рис. 5.19. Ракета ОТРК «Искандер-Э»

Однако эти недостатки с лихвой компенсируются достоинствами. Оптическая ГСН универсальна и предъявляет только одно требование

к инерциальной системе управления ракеты – *вывести последнюю в точку, в которой оптика начинает видеть цель*. Против подобной головки бессильны существующие активные средства РЭБ, которые весьма эффективно противодействуют радиолокационным системам самонаведения. Высокая чувствительность ГСН позволяет работать даже в безлунную ночь, что выгодно отличает новую систему от ранних прототипов. Кроме того, оптические системы не нуждаются в сигналах от космических радионавигационных систем, таких, как американская «Навстар», которая в кризисных случаях может быть выключена ее хозяевами или выведена из строя радиопомехами. Кстати, многие потенциальные заказчики «Искандера-Э» выдвигают требования независимости от спутниковой навигации. Вместе с тем комплексирование инерциального управления с аппаратурой спутниковой навигации и оптической ГСН позволяет создать ракету, поражающую заданную цель почти в любых мыслимых условиях.

Практика войн последних десятилетий показывает, что как бы ни было эффективно средство поражения, оно не может внести существенный вклад в победу, если не интегрировано с системами разведки и управления. «Искандер-Э» создан с учетом этой закономерности. Информация об объекте поражения передается со спутника, самолета-разведчика или беспилотного летательного аппарата на пункт подготовки информации (ППИ). На нём рассчитывается полётное задание для ракеты, которое затем по радиоканалам транслируется на командно-штабные машины (КШМ) командиров дивизиона и батареи, а оттуда – на пусковые установки. Команды на пуск ракет могут быть сформированы как в КШМ, так и поступить от пунктов управления старших артиллерийских начальников. Аппаратура ППИ и КШМ построена на локальных сетях российских ЭВМ, причем функциональное назначение комплекса средств управления зависит лишь от программного обеспечения и может быть легко модернизировано для управления различными огневыми средствами.

В России давно отказались от применения в тактических ракетах ядерных боеголовок, и «Искандер-Э» не исключение. Судите сами: эффект от попадания в цель его 480-килограммового заряда практически сопоставим с эффектом от применения ядерного, разве что не будет радиоактивного загрязнения местности. Ведь точность – плюс - минус 2 метра. Противника не спасут даже мощные бетонные укрепления. К тому же заметить и упредить подготовку к пуску ракет ком-

плекса «Искандер-Э» практически невозможно благодаря его высокой мобильности. Но даже несмотря на эти очевидные плюсы, у «Искандера-Э» есть еще целый ряд достоинств и прежде всего – его полная автономность при получении целеуказания. Комплекс не зависим от разведывательных спутников или авиации. Целеуказание может быть получено не только с них, но и со специальной общевойсковой разведывательной машины, солдата – корректировщика артиллерийского огня или с *фотоснимка местности*, который прямо на боевой позиции через сканер введут в бортовую вычислительную машину. Непосредственно на цель ракету выводит автономная *оптическая головка* самонаведения. Помешать этому не может ни туман, ни безлунная ночь, ни специально созданное противником аэрозольное облако, способное забить помехами оптическую систему наведения. Против подобной головки бессильны все существующие активные средства РЭБ. Такие задачи, кроме «Искандер-Э», не может решить ни одна тактическая система в мире [35].

## 5.8. СТРАТЕГИЧЕСКАЯ КРЫЛАТАЯ РАКЕТА Х-55

Система наведения ракеты (рис. 5.20) является одним из существенных отличий данной крылатой ракеты от предшествующих систем авиационного оружия. Ракета использует инерциальную систему наведения *с коррекцией местоположения по рельефу местности*.

Рис. 5.20. Крылатая ракета Х-55

Цифровая карта местности вводится в бортовую вычислительную машину перед пуском. Система управления обеспечивает длительный автономный полет ракеты Х-55 независимо от протяженности, погодных условий и т. д. Обычный автопилот на Х-55 заменила электронная бортовая система управления БСУ-55, отрабатывавшая заданную программу полета со стабилизацией ракеты по трем осям, удержанием скоростного и высотного режима и возможностью выполнения заданных маневров для уклонения от перехвата. Основным режимом являлся проход маршрута на предельно малых высотах с огибанием рельефа [45].

Носителями ракеты являются дальние бомбардировщики Ту-95МС и Ту-160. Каждый бомбардировщик Ту-95МС-6 может нести до шести ракет, расположенных на пусковой барабанной установке МКУ-6-5 катапультного типа в грузоотсеке самолета (рис. 5.21).

Рис.5.21. Расположение ракет
в грузоотсеке самолета

В двух грузоотсеках сверхзвукового Ту-160 может располагаться 12 крылатых ракет большой дальности Х-55СМ (с дополнительными баками) или 24 обычных крылатых ракеты Х-55.

**Х-55ОК** (изделие 121) — модификация, оснащённая *корреляционно-экстремальной оптико-электронной системой коррекции*, обеспечивающей корректировку траектории ракеты на основе сравнения

полученного от оптической системы изображения местности с эталонным, хранящимся в БЦВМ [45].

Ракета Х-55 оснащена автономной *автокорреляционной* инерциальной системой наведения с корректировкой траектории по рельефу местности. Закладываемая в ракету перед пуском программа полёта содержит цифровую эталонную карту рельефа местности по маршруту. В процессе полёта бортовая система управления БСУ-55 обеспечивает сравнение этой карты с реальными показаниями высотомера и выдачу при необходимости соответствующих команд на корректировку курса. Помимо функций автопилота и коррелятора в БСУ-55 также заложена возможность выполнения ракетой манёвров для противодействия перехвату.

Стратегическая ракета Х-55 способна с высокой точностью поражать стационарные цели на большом удалении от точки пуска. Ракета использует инерциальную систему наведения с коррекцией местоположения, основанной на п*ринципе сравнения с картой местности* (рис. 5.22*)*, введенной в бортовую вычислительную машину перед пуском. Система наведения ракеты является одним из существенных отличий данной крылатой ракеты от предшествующих систем авиационного оружия. Это и обеспечило автономный полет ракеты Х-55 независимо от протяженности, погодных условий и т. д. В этих целях было изготовлено соответствующее картографическое обеспечение (цифровые карты местности) [44].

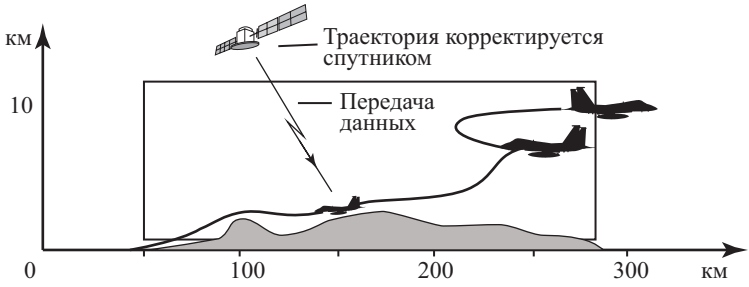


Рис. 5.22. Схема принципа сравнения с картой местности

В перспективе вооружение бомбардировщика планируется существенно усилить за счет введения в его состав высокоточных крылатых ракет нового поколения (Х-555 и Х-101), имеющих увеличенную

дальность и предназначенных для поражения как стратегических, так и тактических наземных и морских целей практически всех классов.

*Многорежимный стратегический бомбардировщик-ракетоносец Ту-160.* Самолет Ту-160 (рис. 5.23) предназначен для нанесения ударов по объектам противника с малых и больших высот. По конструкции он представляет собой свободнонесущий моноплан с крылом изменяемой геометрии, хвостовым оперением, четырьмя двигателями и трехопорным шасси [50].

В состав штатного вооружения самолета входят стратегические крылатые ракеты воздушного базирования Х-55СМ (12 штук), которые со сложенными крыльями и оперением подвешиваются на двух многопозиционных катапультных устройствах МКУ-6-5У барабанного типа. В каждом грузоотсеке находится по одному барабану с шестью ракетами.

Самолет Ту-160 снабжен самым современным пилотажно-навигационным и радиотехническим оборудованием, в том числе специально разработанным для него комплексом управления вооружением. Оборудование обеспечивает автоматический полет и боевое применение всей номенклатуры вооружения.

На Ту-160 установлена сдублированная инерциальная навигационная система, система астронавигации, аппаратура спутниковой навигации, многоканальный цифровой комплекс связи и развитая система радиоэлектронной борьбы, обеспечивающая обнаружение радиолокационных станций противника в широком диапазоне, постановку мощных активных и пассивных помех.

На борту самолета имеется большое количество электронно-вычислительных цифровых устройств. Каждое рабочее место экипажа оборудовано специализированными бортовыми ЦВМ.

Прицельно-навигационный комплекс (ПрНК) «Обзор-К» предназначен для обнаружения и опознавания на большом удалении наземных и морских целей, управления средствами их поражения, а также для решения задач навигации и самолетовождения. Основой ПрНК является многофункциональная навигационно-прицельная РЛС, размещенная в носовой части самолета. Имеется также *оптико-электронный* бомбардировочный прицел ОПБ-15Т, обеспечивающий бомбометание с высокой точностью в дневных условиях и при низком уровне освещенности. В дальнейшем возможно оснащение самолета лазерной системой подсветки наземных целей, позволяющей

применять с больших высот корректируемые авиационные бомбы различных типов.

Рис. 5.23. Самолет Ту-160

Бортовой комплекс обороны (БКО) «Байкал» позволяет обнаружить средства ПВО противника, засечь их положение, заглушить помехами или поставить за самолетом завесу из ложных целей. В хвостовом конусе размещены многочисленные контейнеры с ИК-ловушками и дипольными отражателями. В крайней задней части фюзеляжа установлен теплопеленгатор «Огонек», обнаруживающий приближающиеся со стороны задней полусферы ракеты и самолеты противника. Управление самолетом может осуществляться как в автоматическом, так и в ручном режиме. Управление по каналам тангажа, крена и рыскания обеспечивает оптимальные характеристики устойчивости и управляемости на всех режимах полета. Резервное управление осуществляется механической системой с ограниченными функциями.

Система управления самолетом состоит из подсистем управления рулями, механизацией крыла, а также бортовой системы управления. Управление самолетом осуществляется не при помощи традиционного для тяжелых бомбардировщиков штурвала, а посредством ручки управления «истребительного» типа. Система управления рулями обеспечивает отклонение стабилизатора, поворотной части киля, флаперонов и интерцепторов на всех этапах полета в режимах штурвального управления, полуавтоматического и автоматического управления при совместной работе с АБСУ (автоматическая бортовая система управления). АБСУ управляет рулевыми поверхностями путем обработки информации, поступающей от ручек и педалей постов управления экипажа, собственных датчиков, датчиков и вычислителей других бортовых систем [50].

## 5.9. ВЫВОДЫ

Приведем основные результаты, изложенные в данной главе.

1. Кратко представлены основные достижения в области развития навигационных технологий.

2. Приведены примеры использования КЭС в существующих и перспективных системах управления.

3. Из приведенных примеров видно, что использование корреляционного анализа в сочетании с последними достижениями в области параллельных вычислительных технологий, несомненно, позволит получить значимые результаты не только для военно-промышленного комплекса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Афинов В., Ольгин С.* Авиационные оптоэлектронные средства разведки наземных целей. Зарубежное Военное Обозрение. 2003, №4. С. 44–45.

2. *Афонин П.М., Голубев И.С., Колотков Н.И. и др.* Беспилотные летательные аппараты. М.: Машиностроение, 1967

3. *Баклицкий В.К.* Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В. К. Баклицкий – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.

4. *Белоглазов И.Н., Тарасенко В.П.* Корреляционно-экстремальные системы. – М.: Сов. радио, 1974., – 392 с.

5. *Беляев В.* Война в воздухе. Новая угроза. Современные зарубежные БПЛА и перспективы их развития. Авиация и Космонавтика. 2004, № 4. С. 8–17.

6. *Беляев В.* Война в воздухе. Новая угроза. Современные зарубежные БПЛА и перспективы их развития. Авиация и Космонавтика. 2004, № 9. С. 26–32.

7. *Беспилотная* авиационная система БАС-62 – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://paralay.com/s62.html, свободный.

8. *Беспилотные* авиационные комплексы – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.irkut.com/ru/services/projects/muas/, свободный.

9. *БПЛА* ДПЛА БЛА Описания и технические характеристики беспилотников – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://bp-la.ru/, свободный.

10. *Булава-30*, МБР Р-30 3М30, (SS-NX-30), межконтинентальная баллистическая ракета морского базирования – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.arms-expo.ru/site.xp/049055051051124049048055055.html, свободный.

11. *Солунин В.Л., Гурский Б.Г., Спирин Э.П.* Корреляционно-экстремальные системы для высокоточной навигации летательных аппаратов и компьютерной диагностики сложных заболеваний // Гироскопия и навигация. – 2005. – №2. – С. 56-61.

12. *Волковский Н.Л.* Энциклопедия современного оружия и боевой техники. Т. 1. М., СПб.: Полигон, 2000.

13. *Горбатенко С.А., Макашов Э.М. и др.* Механика полетов. Инженерный справочник. М.: Машиностроение, 1969, 420 с.

14. *Городейко Ю. В. и др.* Военная авиация. – Мн.: Попурри, 1999. – Т.2.

15. *Гусев А.Н.* Подводные лодки с крылатыми ракетами. СПб.: Галея Принт, 2000.

16. *Каримов А.* Беспилотные летательные аппараты большой высоты и продолжительности полета: уникальность и эффективность. Военный Парад. 2003, № 4. С30-33.

17. *Кожевников В.* Ракетный комплекс Томахок морского базирования. Зарубежное Военное Обозрение. 2000, №1.

18. *Козубовский С.Ф.* Корреляционно-экстремальные системы: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1973. – 224 с.

19. *Кориков А.М.* Корреляционно-экстремальные робототехнические системы // Корреляционно-экстремальные системы управления: Докл. 1-ой Всесоюзн. конф. по корреляционно-экстрем. системам. – Томск: ТГУ, 1979. – С. 198 – 202.

20. *Корреляционно-экстремальная* система определения координат морского или речного судна по радиолокационным изображениям берегов / М.П. Ангелов, А.Г. Карпов, О.М. Раводин, Г.А. Разумова, В.П. Тарасенко,

В.И. Сырямкин // Корреляционно-экстремальные системы обработки информации и управления. – Томск: ТГУ, 1975. – С. 131 – 143.

21. *Корреляционно-экстремальные* системы и их проектирование. /Под ред. А.Г.Буймова. – Томск: ТГУ, 1988. – N10.

22. *Корреляционно-экстремальные* системы обработки информации и управления. Вып. 2. /Под ред. В.П. Тарасенко. – Томск: ТГУ, 1977. – N 2. – 184 с.

23. *Корреляционно-экстремальные* системы обработки информации и управления./ Под ред. В.П.Тарасенко. – Томск: ТГУ, 1978.N3. – 176 с.

24. *Корреляционно-экстремальные* системы обработки информации и управления: Труды СФТИ / Под ред. В.П. Тарасенко. – Томск: ТГУ, 1975. –N 66. – 320 с.

25. *Корреляционно-экстремальные* системы управления. / Под ред. В.П. Тарасенко – Томск: ТГУ, 1980. – N 5. – 238 с.

26. *Корреляционно-экстремальные* системы управления. / Под ред. В.П. Тарасенко. – Томск: ТГУ, 1981. – N 6. – 212 с.

27. *Корреляционно-экстремальные* системы управления/ Под ред. В.П.Тарасенко. – Томск: ТГУ, 1982. – N7. – 161 с.

28. *Корреляционно-экстремальные* системы управления: Докл. 1-ой Всесоюзн. конф. по корреляционно-экстрем. системам. – Томск: ТГУ, 1979. – 317 с.

29. *Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П.* Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. – М.: Наука, 1979. – 448 с.

30. *Матвеев Е.* БЛА кардинально изменет облик авиации будущего. Авиапанорама. 2005, июль_август. С. 34–39.

31. *Медведев Г.А. Тарасенко В.П.* Вероятностные методы исследования экстремальных систем. – М.: Наука, 1967. – 456 с.

32. *Межконтинентальная* баллистическая ракета 15Ж65 Тополь-М- [Электронный ресурс] - Режим доступа http://rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/topol_m/topol_m.shtml, свободный.

33. *Мелик-Шахназаров А. М., Маркатун М. Г.* Цифровые измерительные системы корреляционного типа. – М.: Энегроатомиздат, 1985. – 128

34. *Михайлов И., Костин К.* Американские крылатые ракеты наземного базирования. Зарубежное Военное Обозрение. 1980, № 7. С. 43–45;

35. *Оперативно* тактический ракетный комплекс Искандер-Э – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.kapyar.ru/index.php?pg=218, свободный.

36. *Радомиров Р.* Американские крылатые ракеты наземного базирования. Зарубежное Военное Обозрение. 1981, № 11. С. 48–52.

37. *Расторгуев Н.* Комплексы с дистанционно пилотируемыми летательными аппаратами. Военный Парад. 2003, № 4. С. 26–28.

38. *Растригин Л.А.* Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1974. – 632 с.

39. *Родионов Б.И., Новичков Н.Н.* Крылатые ракеты в морском бою. М.: Воениздат, 1987.

40. *Ростич Р.* Разработка в США перспективных беспилотных летательных аппаратов для ВМС. Зарубежное Военное Обозрение. 2003, № 7. С. 61–67.

41. *РС-24*, межконтинентальная баллистическая ракета стратегического назначения – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.arms-expo.ru/site.xp/049050052048124049052053051.html, свободный.

42. *Справочник* по теории автоматического управления / А.Г. Александров, В.М. Артемьев, В.Н. Афанасьев и др.; под ред. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

43. *Степанов О.А.* Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. М. ЦНИИ «Электроприбор», 2000.

44. *Стратегическая* крылатая ракета – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.airwar.ru/weapon/kr/x55.html, свободный.

45. *Стратегическая* крылатая ракета Х-55 – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://worldweapon.ru/sam/x55.php, свободный.

46. *Стратонович Р.Л.* Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. М.: Издательство МГУ, 1966.

47. *Тарасов В.Г.* Межсамолетная навигация. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

48. *Терентьев В.М.* Разработка и исследование алгоритмов управления и обработки информации для СМСН БЛА. Доклад на школе-семинаре ЦАГИ по проблемам управления ЛА г. Жуковский 25.02-2.03 1991 г.

49. *Тополь-М* (SS-X-27, «Sickle»), мобильный ракетный комплекс с межконтинентальной баллистической ракетой стратегического назначения – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.arms-expo.ru/site.xp/049050052048124049048056051.html, свободный.

50. *Ту-160*, стратегический сверхзвуковой ракетоносец (Blackjack) – [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.arms-expo.ru/site.xp/049049056050124055049050.htm, свободный.

51. *Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г.* Методы теории автоматического управления. – М.: Наука, 1971. – 744 с

52. *Эйкхоф П.* Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975.

53. *Экстремальная* радионавигация / В.И.Алексеев, А.М. Кориков, Р. И. Полонников, В.П. Тарасенко; Под ред. Р.И. Полонникова и В.П. Тарасенко. – М.: Наука, 1978. – 279 с.

54. *Jazwinski A.H.* Nonlinear and adaptive estimation in reentry, AIAA Paper No. 72-874.

55. *Jazwinski A.H.*, Stochastic processes and filtering theory, NY.: Academic Press, 1970.

***Для заметок***

Научное издание

СЫРЯМКИН Владимир Иванович
ШИДЛОВСКИЙ Виктор Станиславович

# Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы

Редактор *Е.В. Лукина*
Оригинал-макет
и дизайн обложки *В.С. Шидловского*

Подписано в печать 20.12.2010 г.
Формат $60\times84^{1}/_{16}$. Бумага мелованная.
Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».
Усл. печ. л. 18,6. Уч.-изд. л. 20,8.
Тираж 500 экз. Заказ 274.