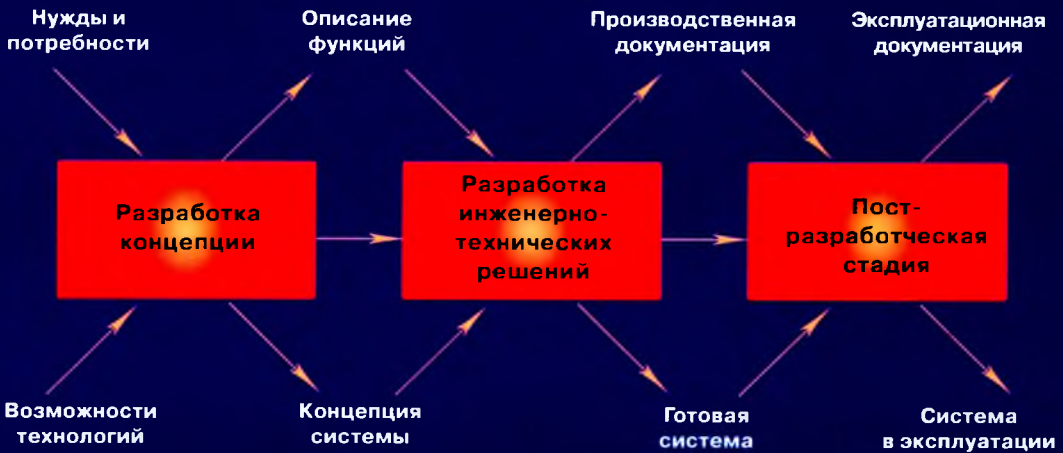




Библиотека по системной инженерии  
Русского института системной инженерии

# Системная инженерия

## Принципы и практика



Александр Косяков,  
Уильям Н. Свит, Сэмюэль Дж. Сеймур,  
Стивен М. Бимер



---

# Содержание

---

Обращение к читателям .....	21
Вступительное слово.....	23
От редактора русского издания .....	26
Предисловие авторов ко второму изданию .....	43
Александр Косяков, 1914–2005.....	43
Цели второго издания.....	43
Содержание книги.....	45
Благодарности.....	46
Предисловие авторов к первому изданию.....	47
Цели .....	47
Истоки и содержание .....	48
Благодарности.....	49

## **ЧАСТЬ I**

<b>Основы системной инженерии .....</b>	<b>51</b>
---	-----------

### **Глава 1**

<b>Системная инженерия и современные системы .....</b>	<b>53</b>
--	-----------

1.1. Что такое системная инженерия? .....	53
Системная инженерия и традиционные инженерные дисциплины.....	54
Системная инженерия и управление проектом.....	55
1.2. Происхождение системной инженерии.....	55
Технический прогресс: риски .....	57
Конкуренция: компромиссы.....	58
Специализация: сопряжения .....	59

---

1.3.	Примеры систем, нуждающихся в системном инженерере.....	61
	Примеры комплексных инженерно насыщенных систем .....	62
1.4.	Системная инженерия как профессия .....	64
	Выбор карьеры .....	65
	Ориентация технических специалистов.....	66
	Вызовы системной инженерии .....	68
	В чем притягательная сила системной инженерии?.....	69
	Отличительные черты и мотивация системного инженера .....	70
1.5.	Модель развития карьеры системного инженера .....	70
1.6.	Сила системной инженерии .....	73
	Сила мультидисциплинарного знания.....	74
	Сила приближенных вычислений .....	75
	Сила скептического позитивного мышления .....	75
1.7.	Резюме .....	76
	Что такое системная инженерия? .....	76
	Происхождение системной инженерии.....	76
	Примеры систем, нуждающихся в системном инженерере.....	76
	Системная инженерия как профессия .....	77
	Модель развития карьеры системного инженера .....	77
	Сила системной инженерии .....	77
	Задачи.....	78
	Дополнительная литература .....	79

## **Глава 2**

### **Ландшафт системной инженерии ..... 80**

2.1.	Точка зрения системного инженера .....	80
	Успешные системы.....	80
	«Наилучшая» система .....	81
	Сбалансированная система .....	83
	Сбалансированная точка зрения.....	85
2.2.	Представления в системной инженерии .....	86
2.3.	Предметные области, связанные с системами .....	88
2.4.	Сферы деятельности, связанные с системной инженерией.....	89
2.5.	Подходы системной инженерии.....	90
2.6.	Системная инженерия. Действия и результаты .....	90
2.7.	Резюме.....	92
	Точка зрения системного инженера .....	92
	Представления в системной инженерии .....	93
	Предметные области, связанные с системами .....	93
	Сферы деятельности, связанные с системной инженерией.....	94
	Подходы системной инженерии.....	94
	Системная инженерия. Действия и результаты .....	94
	Задачи.....	94
	Дополнительная литература .....	94

## Глава 3

### Структура сложных систем..... 95

3.1. Составные части и интерфейсы системы .....	95
3.2. Иерархия в сложных системах.....	95
Модель сложной системы .....	96
Области компетенции системного инженера и специалиста по проектированию .....	98
3.3. Составные части системы.....	100
Функциональные составные части: функциональные элементы.....	100
Физические составные части: компоненты .....	102
Типовые составные части .....	104
Применение составных частей системы .....	105
3.4. Окружение системы.....	105
Границы системы.....	106
Границы системы: контекстная диаграмма .....	107
Типы взаимодействий с окружением.....	111
3.5. Интерфейсы и взаимодействия.....	113
Интерфейсы: внешние и внутренние .....	113
Взаимодействия.....	113
Интерфейсные элементы.....	114
3.6. Сложность в современных системах.....	115
Системы систем.....	116
Инженерия систем масштаба предприятия.....	118
3.7. Резюме.....	120
Составные части и интерфейсы системы .....	120
Иерархия сложных систем.....	120
Составные части системы.....	120
Окружение системы.....	121
Интерфейсы и взаимодействия.....	121
Сложность в современных системах.....	121
Задачи.....	122
Дополнительная литература .....	123

## Глава 4

### Процесс разработки системы ..... 124

4.1. Применение системной инженерии на протяжении жизненного цикла системы.....	124
4.2. Жизненный цикл системы .....	125
Разработка принятой в этой книге модели жизненного цикла для системного инженера .....	125
Стадии в модели жизненного цикла для системного инженера .....	128

Этапы разработки концепции .....	131
Этапы разработки инженерно-технических решений .....	134
Этапы постразработческой стадии.....	137
4.3. Эволюционные характеристики процесса разработки.....	138
Предшествующая система.....	139
Материализация системы .....	140
Участники .....	142
Требования к системе и документация .....	143
4.4. Метод системной инженерии .....	144
Обзор существующих методов и процессов системной инженерии .....	146
Наш метод системной инженерии .....	149
Анализ требований (постановка задачи) .....	151
Функциональное описание (анализ функционирования и привязка функций).....	153
Описание физической реализации (синтез, анализ физической реализации и размещение элементов) .....	155
Валидация проектных решений (верификация и оценка).....	157
Подготовка к следующему этапу .....	159
Метод системной инженерии в применении к жизненному циклу системы .....	160
Спиральная модель жизненного цикла .....	160
4.5. Испытания на протяжении разработки системы.....	162
Неизвестные .....	163
Преобразование неизвестного в известное.....	163
Подход системной инженерии к испытаниям .....	164
Испытания и аттестация системы .....	165
4.6. Резюме.....	165
Применение системной инженерии на протяжении жизненного цикла системы .....	165
Жизненный цикл системы .....	165
Эволюционные характеристики процесса разработки.....	166
Метод системной инженерии .....	166
Испытания на протяжении разработки системы.....	167
Задачи.....	167
Дополнительная литература .....	168

## **Глава 5**

### **Управление системной инженерией ..... 169**

5.1. Управление разработкой системы и рисками .....	169
Подготовка предложения и техническое задание.....	170
5.2. Иерархическая структура работ .....	171
Элементы типичной иерархической структуры работ .....	171
Составление сметы и контроль ее исполнения.....	175
Метод критического пути .....	175

5.3.	План управления системной инженерией.....	176
	Элементы типичного плана управления системной инженерией.....	176
5.4.	Управление риском .....	178
	Снижение рисков на протяжении жизненного цикла системы.....	179
	Составные части управления риском .....	181
	Оценка рисков.....	181
	Смягчение рисков .....	186
	План управления риском.....	188
5.5.	Организация системной инженерии .....	189
	Отдел системного анализа .....	191
	Команда проектирования системы.....	191
5.6.	Резюме .....	193
	Управление разработкой системы и рисками .....	193
	Иерархическая структура работ .....	193
	План управления системной инженерией .....	193
	Управление риском .....	193
	Организация системной инженерии.....	194
	Задачи.....	194
	Дополнительная литература .....	195

## **ЧАСТЬ II**

### **Стадия разработки концепции ..... 197**

#### **Глава 6**

#### **Анализ потребностей ..... 198**

6.1.	Возникновение новой системы.....	198
	Место этапа анализа потребностей в жизненном цикле системы .....	198
	Примеры потребностей в новой системе.....	200
	Вопросы конкуренции.....	201
	Состояние материализации проектных решений .....	201
	Применение метода системной инженерии к анализу потребностей и требований .....	202
6.2.	Системный анализ .....	206
	Анализ предполагаемых потребностей .....	206
	Практические цели.....	209
6.3.	Анализ функционирования .....	212
	Преобразование практических целей в функции системы.....	212
	Функциональная декомпозиция и привязка к подсистемам .....	213
6.4.	Оценка осуществимости .....	214
	Формирование представления о реализации подсистем.....	214
	Определение осуществимой концепции .....	216
6.5.	Валидация потребностей.....	216
	Модель эксплуатационной эффективности .....	216

Показатели эффективности и показатели функционирования.....	218
Валидация осуществимости и потребности.....	220
6.6. Требования назначения системы .....	220
Сценарии практического использования.....	221
Определение требований назначения.....	222
Валидация осуществимости .....	223
6.7. Резюме.....	224
Возникновение новой системы.....	224
Системный анализ .....	225
Анализ функционирования .....	225
Оценка осуществимости .....	225
Валидация потребностей.....	225
Дополнительная литература .....	226

## Глава 7

### Исследование концепции ..... 227

7.1. Разработка требований к системе.....	227
Место этапа исследования концепции в жизненном цикле системы.....	228
Состояние материализации системы.....	229
Метод системной инженерии при исследовании концепции.....	230
7.2. Анализ требований назначения.....	232
Установление требований.....	233
Анализ требований.....	234
Валидация требований.....	235
Документирование требований.....	235
Характеристики хорошо определенных требований .....	235
Триединство разработки концепции.....	237
Концепция функционирования .....	237
Описание контекста функционирования (сценарии).....	238
Анализ альтернатив .....	239
7.3. Определение требований	
к показателям функционирования.....	241
Выделение функций подсистем .....	241
Недетерминированная природа разработки системы.....	242
Функциональное исследование и декомпозиция.....	243
Определение требований силами комплексной рабочей группы .....	248
7.4. Исследование концепций реализации .....	249
Альтернативные концепции реализации .....	249
Разработка технологии .....	251
Показатели функционирования.....	252
7.5. Валидация требований к показателям функционирования .....	254
Агрегирование показателей функционирования .....	254
Валидация показателей функционирования .....	255
Документирование требований.....	255

7.6. Резюме .....	256
Разработка требований к системе.....	256
Анализ требований назначения.....	256
Определение требований к показателям функционирования.....	257
Исследование концепций реализации .....	257
Валидация требований к показателям функционирования .....	257
Задачи.....	258
Дополнительная литература .....	259

## **Глава 8**

### **Определение концепции..... 260**

8.1. Определение концепции системы.....	260
Место этапа определения концепции в жизненном цикле системы.....	261
Состояние материализации проектных решений.....	262
Метод системной инженерии при определении концепции.....	264
8.2. Анализ требований к показателям функционирования.....	266
Анализ установленных требований к показателям функционирования .....	266
Завершение работы над требованиями к системе и их уточнение .....	267
8.3. Анализ функционирования и определение функциональных требований.....	270
Определение функций компонентов.....	270
Инструменты для графического представления функциональных блоков.....	272
Имитационное моделирование.....	275
Определение функциональных требований .....	276
8.4. Функциональная декомпозиция.....	276
Формирование альтернативных концепций.....	277
Моделирование альтернатив.....	278
8.5. Выбор концепции .....	279
8.6. Валидация концепции .....	282
Моделирование системы и ее окружения.....	282
Анализ результатов валидации.....	283
Итеративное уточнение требований и концепций системы .....	283
8.7. Планирование разработки системы .....	284
Иерархическая структура работ .....	284
План управления системной инженерией.....	285
Составление сметы затрат в течение жизненного цикла.....	286
Презентация предложения о разработке системы .....	287
8.8. Построение архитектуры системы .....	288
Архитектурные представления.....	290
Методики описания архитектуры.....	292



8.9. Языки системного моделирования.....	295
Унифицированный язык моделирования UML .....	296
Язык моделирования систем SysML.....	303
8.10. Моделе-ориентированная системная инженерия .....	309
8.11. Спецификация функциональных требований к системе .....	314
8.12. Резюме.....	315
Определение концепции системы.....	315
Анализ требований к показателям функционирования.....	316
Анализ функционирования и формирование функциональных требований.....	316
Привязка функций .....	316
Выбор концепции .....	316
Валидация концепции .....	317
Планирование разработки системы .....	317
Построение архитектуры системы .....	317
Языки моделирования систем: UML и SysML .....	318
Моделе-ориентированная системная инженерия .....	318
Спецификация функциональных требований к системе .....	318
Задачи.....	319
Дополнительная литература .....	321

## Глава 9

### **Анализ и поддержка принятия решений ..... 322**

9.1. Принятие решений.....	323
Факторы, влияющие на процесс принятия решения.....	324
Базовые принципы принятия решений .....	325
Поддержка принятия решений.....	327
Формальный процесс принятия решений.....	327
9.2. Моделирование на протяжении разработки системы.....	329
9.3. Статическое моделирование для принятия решений.....	330
Типы моделей .....	330
Схематические модели.....	331
Математические модели.....	337
Физические модели.....	339
9.4. Имитационное моделирование.....	340
Моделирование функционирования .....	341
Игры.....	341
Моделирование эффективности системы .....	342
Моделирование условий применения.....	344
Физическое моделирование.....	344
Программно-аппаратное моделирование .....	345
Техническое моделирование .....	346
Разработка самолета Боинг 777 .....	347
Моделирование окружения .....	347

Моделирование виртуальной реальности .....	348
Разработка имитационных моделей системы .....	349
Верификация и валидация модели.....	350
9.5. Анализ компромиссов.....	351
Базовые принципы компромиссов.....	351
Формальный анализ и исследование компромиссов .....	352
Пример анализа компромиссов .....	362
Ограничения числового сравнения .....	364
Принятие решения .....	365
9.6. Краткий обзор теории вероятностей .....	365
9.7. Методы оценивания .....	369
Многомерная теория полезности .....	370
Метод анализа иерархий .....	370
Деревья решений.....	371
Анализ «затраты–эффективность» .....	375
Структурирование функции качества.....	377
9.8. Резюме.....	378
Принятие решений.....	378
Моделирование на протяжении разработки системы .....	379
Моделирование для принятия решений .....	379
Имитационное моделирование.....	380
Анализ компромиссов.....	380
Краткий обзор теории вероятностей .....	381
Методы оценивания .....	381
Задачи.....	382
Дополнительная литература .....	384

### **ЧАСТЬ III**

## **Стадия разработки инженерно-технических решений..... 385**

### **Глава 10**

## **Эскизное проектирование ..... 387**

10.1. Снижение рисков программы .....	387
Место этапа эскизного проектирования в жизненном цикле системы .....	388
Состояние материализации проектных решений.....	389
Метод системной инженерии на этапе эскизного проектирования .....	389
10.2. Анализ требований .....	392
Функциональные требования к системе .....	392
Прослеживание требований .....	393
Связь с требованиями назначения .....	393
Связь с предшествующими системами .....	394
Выявление компонентов, нуждающихся в разработке .....	394

10.3. Анализ функционирования и проектирование .....	397
Повышенные показатели функционирования .....	398
Особо сложные компоненты .....	400
Плохо определенное окружение системы .....	401
Функциональное проектирование .....	402
Использование имитационных моделей .....	403
10.4. Разработка прототипа как механизм смягчения риска .....	404
Потенциальные проблемные области .....	405
Проектирование компонентов .....	408
Проверка проектных решений .....	410
Быстрое прототипирование .....	410
Испытательные установки .....	411
10.5. Стендовые испытания .....	412
Планы испытаний и анализа результатов испытаний .....	413
Специальное испытательное оборудование и испытательные установки .....	417
Определительные испытания и проверка пригодности к эксплуатации .....	419
Анализ и оценка результатов испытаний .....	420
Оценка пользовательских интерфейсов .....	421
Исправление недостатков проекта .....	423
10.6. Снижение риска .....	423
Каким должен быть объем проработки? .....	424
10.7. Резюме .....	424
Снижение рисков программы .....	424
Анализ требований .....	425
Анализ функционирования и проектирование .....	425
Разработка опытного образца как методика смягчения риска .....	425
Стендовые испытания .....	426
Снижение риска .....	426
Задачи .....	426
Дополнительная литература .....	428

## **Глава 11**

### **Инженерия программных систем ..... 429**

11.1. Преодоление сложности и абстрактности .....	430
Роль программного обеспечения в системах .....	432
11.2. Природа разработки программного обеспечения .....	434
Типы программного обеспечения .....	434
Типы программных систем .....	435
Различия между оборудованием и программным обеспечением .....	438
11.3. Модели жизненного цикла разработки программного обеспечения .....	440

Линейные модели разработки.....	442
Инкрементные модели разработки.....	443
Эволюционные модели разработки.....	444
Гибкие модели разработки.....	447
Модернизация программной системы .....	448
11.4. Разработка концепции программного обеспечения:	
анализ и проектирование .....	449
Анализ потребностей.....	449
Анализ требований к программному обеспечению .....	450
Архитектура системы.....	454
Структурный анализ и проектирование.....	456
Объектно-ориентированный анализ и проектирование .....	458
Другие методологии .....	460
11.5. Разработка методами программной инженерии: кодирование и автономное тестирование.....	462
Структура программы.....	462
Языки программирования .....	463
Средства поддержки программирования .....	465
Создание прототипа ПО.....	466
Проектирование программного продукта .....	467
Автономное тестирование .....	469
11.6. Интеграция и тестирование программного обеспечения.....	470
Верификация и валидация .....	471
Отличительные особенности тестирования программного обеспечения .....	471
Интеграционное тестирование.....	472
Регрессионное тестирование.....	472
Оценочное тестирование .....	472
11.7. Управление программной инженерией.....	473
Компьютерные инструменты для программной инженерии .....	474
Интегрированная модель зрелости возможностей.....	475
Метрики программного обеспечения.....	478
Взгляд в будущее.....	479
11.8. Резюме.....	480
Преодоление сложности и абстрактности.....	480
Природа разработки программного обеспечения .....	481
Модели жизненных циклов разработки ПО .....	481
Разработка концепции ПО: анализ и проектирование.....	482
Разработка методами программной инженерии:	
кодирование и автономное тестирование .....	483
Интеграция и тестирование ПО.....	483
Управление программной инженерией.....	483
Задачи.....	484
Дополнительная литература .....	485

## Глава 12

<b>Техническое проектирование .....</b>	<b>486</b>
12.1. Реализация составных частей системы .....	486
Место этапа технического проектирования в жизненном цикле системы .....	486
Состояние материализации проекта .....	487
Метод системной инженерии на этапе технического проектирования .....	489
12.2. Анализ требований .....	491
Технические требования к системе .....	491
Требования к внешним интерфейсам системы .....	491
Требования к сборке и установке .....	492
Смягчение рисков .....	493
Критические технические требования .....	493
12.3. Анализ функционирования и проектирование .....	493
Модульная конфигурация .....	494
Проектирование программного обеспечения .....	495
Проектирование пользовательского интерфейса .....	496
12.4. Проектирование компонентов .....	497
Предварительное проектирование .....	498
Детальное проектирование .....	499
Автоматизированное проектирование .....	500
Надежность .....	503
Ремонтопригодность .....	507
Готовность .....	509
Технологичность .....	510
Управление риском .....	511
12.5. Валидация проектных решений .....	511
Планирование испытаний .....	511
Изготовление компонентов .....	512
Стендовые испытания .....	513
Оценочные испытания .....	514
Испытательное оборудование .....	516
Роль системной инженерии .....	517
12.6. Управление конфигурацией .....	517
Элементы конфигурации .....	517
Исходные конфигурации .....	518
Управление интерфейсами .....	519
Управление изменениями .....	519
12.7. Резюме .....	520
Реализация составных частей системы .....	520
Анализ требований .....	520

Анализ функционирования и проектирование .....	520
Проектирование компонентов.....	521
Валидация проектных решений.....	522
Управление конфигурацией.....	522
Задачи.....	522
Дополнительная литература .....	523

## **Глава 13**

### **Комплексирование и аттестация ..... 525**

13.1. Комплексирование, испытания и аттестация системы в целом.....	525
Место этапа комплексирования и аттестации в жизненном цикле системы .....	526
Состояние материализации проекта.....	529
Метод системной инженерии на этапе комплексирования и аттестации .....	531
13.2. Планирование и подготовка испытаний .....	532
Генеральный план испытаний и аттестации .....	532
Аналогия между планированием испытаний и аттестации и разработкой системы.....	533
Анализ требований к системе .....	533
Ключевые вопросы.....	534
Проектирование испытательного оборудования.....	535
Планирование комплексных испытаний.....	536
Планирование доводочных испытаний системы .....	536
Планирование натуральных испытаний.....	537
13.3. Комплексирование системы.....	537
Физическая схема испытательной установки .....	538
Комплексирование подсистемы .....	540
Комплексирование системы в целом .....	544
13.4. Доводочные испытания системы.....	545
Цели испытания системы.....	545
Планирование доводочных испытаний.....	546
Схема проведения испытаний системы .....	547
Разработка сценариев испытания .....	548
Модель функционирования системы.....	548
Опытный образец.....	549
Проведение испытаний системы.....	549
Анализ и оценка результатов испытаний.....	551
Рассмотрение отклонений от расчетных показателей функционирования системы .....	551
13.5. Натурные испытания и аттестация.....	552
Цели натуральных испытаний.....	552
Планирование и подготовка испытаний .....	555
Подготовка персонала.....	557

Испытательное оборудование и установки .....	557
Проведение испытаний.....	558
Анализ и оценка результатов испытаний.....	559
Отчеты об испытаниях .....	560
13.6. Резюме.....	560
Комплексирование, испытания и аттестация системы в целом.....	560
Планирование и подготовка испытаний .....	560
Комплексирование системы.....	561
Доводочные испытания системы .....	562
Натурные испытания и аттестация.....	562
Задачи.....	563
Дополнительная литература .....	564

## **ЧАСТЬ IV**

### **Постразработоческая стадия ..... 565**

#### **Глава 14**

#### **Производство ..... 566**

14.1. Системная инженерия на заводе.....	566
Место этапа производства в жизненном цикле системы .....	567
Состояние материализации проекта.....	567
14.2. Проектирование с учетом производства .....	568
Параллельная инженерия на всем протяжении разработки системы.....	569
Учет вопросов развертывания при разработке системы .....	571
14.3. Переход от разработки к производству .....	572
Смена руководства и участников.....	572
Проблемы в процессе перехода .....	573
Подготовка к производству.....	574
Управление конфигурацией на производстве .....	575
14.4. Технологические операции .....	576
Планирование производства.....	576
Организация производства как сложная система .....	577
Производство компонентов .....	579
Приемочные испытания системы .....	580
Технология производства .....	580
14.5. Приобретение знаний о производстве .....	581
Системно-инженерные знания о компонентах .....	581
Производственные процессы.....	582
14.6. Резюме.....	583
Системная инженерия на заводе.....	583
Проектирование с учетом производства .....	584
Переход от разработки к производству .....	584

Производственные операции .....	585
Приобретение знаний о производстве .....	586
Задачи.....	586
Дополнительная литература .....	587

## **Глава 15**

### **Эксплуатация и сопровождение ..... 588**

15.1. Установка, техническое обслуживание и модернизация системы .....	588
Место этапа эксплуатации и сопровождения в жизненном цикле системы .....	589
Системная инженерия на этапе эксплуатации и сопровождения.....	589
15.2. Ввод в эксплуатацию и проверка.....	590
Ввод системы в эксплуатацию.....	590
Ввод в эксплуатацию без прерывания работы .....	593
Ограничения на технические средства и персонал .....	595
Трудности первоначальной эксплуатации системы .....	595
15.3. Сопровождение во время эксплуатации .....	596
Проверка готовности к эксплуатации .....	596
Типичные проблемы, возникающие в процессе эксплуатации.....	596
Обслуживание в полевых условиях .....	598
Плановое техническое обслуживание и доработка на месте .....	598
Серьезные аварии.....	599
Логистическое обеспечение .....	599
15.4. Существенные изменения в системе: модернизация.....	600
Жизненный цикл при изменениях в системе.....	601
Модернизация программного обеспечения .....	603
Запланированное улучшение изделия.....	604
15.5. Учет особенностей эксплуатации при разработке системы .....	604
Источники знаний об эксплуатации.....	606
Помощь со стороны производственного персонала .....	607
15.6. Резюме .....	607
Установка, техническое обслуживание и модернизация системы .....	607
Ввод в эксплуатацию и проверка.....	607
Сопровождение во время эксплуатации .....	608
Существенные изменения в системе: модернизация.....	608
Учет особенностей эксплуатации при разработке системы .....	608
Задачи.....	608
Дополнительная литература .....	609

### **Указатель ..... 610**

### **Список использованных сокращений ..... 620**