

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>Раздел 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> .....	8
<b>1.1. Система</b> .....	9
1.1.1. Понятия системы и комплекса .....	9
1.1.2. Структура и функция .....	9
1.1.3. Организация .....	10
1.1.4. Свойства систем .....	10
1.1.5. Эффективность .....	11
1.1.6. Параметры и характеристики .....	12
1.1.7. Процесс .....	14
1.1.8. Классификация систем и процессов .....	14
<b>1.2. Модель</b> .....	16
1.2.1. Основные требования к модели .....	16
1.2.2. Классификация моделей .....	16
1.2.3. Параметризация моделей .....	18
<b>1.3. Задачи моделирования</b> .....	18
1.3.1. Разработка модели .....	18
1.3.2. Анализ характеристик .....	19
1.3.3. Синтез системы .....	19
1.3.4. Детальный анализ синтезированной системы .....	20
<b>1.4. Методы моделирования</b> .....	20
1.4.1. Аналитические методы .....	21
1.4.2. Численные методы .....	21
1.4.3. Статистические методы .....	21
1.4.4. Комбинированные методы .....	22
<b>1.5. Резюме</b> .....	22
<b>1.6. Практикум: обсуждение</b> .....	24
<b>1.7. Самоконтроль: перечень вопросов</b> .....	32
<b>Раздел 2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ</b> .....	34
<b>2.1. Основные понятия и определения</b> .....	34
2.1.1. Событие, вероятность .....	34
2.1.2. Случайная величина .....	35
<b>2.2. Законы распределений случайных величин</b> .....	36
2.2.1. Закон распределения дискретной случайной величины ..	36
2.2.2. Закон распределения непрерывной случайной величины	37
<b>2.3. Числовые характеристики случайных величин</b> .....	40
2.3.1. Начальные моменты .....	41
2.3.2. Центральные моменты .....	41
<b>2.4. Производящая функция и преобразование Лапласа</b> ....	43
2.4.1. Производящая функция .....	43
2.4.2. Преобразование Лапласа .....	44
<b>2.5. Типовые распределения случайных величин</b> .....	44

2.5.1. Распределение Пуассона .....	45
2.5.2. Геометрическое распределение .....	45
2.5.3. Равномерный закон распределения .....	46
2.5.4. Экспоненциальный закон распределения .....	48
2.5.5. Распределение Эрланга .....	49
2.5.6. Нормированное распределение Эрланга .....	50
2.5.7. Гиперэкспоненциальное распределение .....	52
2.5.8. Гиперэрланговское распределение .....	55
<b>2.6. Аппроксимация неэкспоненциальных распределений .</b>	<b>57</b>
2.6.1. Аппроксимация распределения с коэффициентом вариации $0 < \nu < 1$ .....	58
2.6.2. Аппроксимация распределения с коэффициентом вариации $\nu > 1$ .....	63
<b>2.7. Резюме .....</b>	<b>67</b>
<b>2.8. Практикум: решение задач .....</b>	<b>70</b>
<b>2.9. Самоконтроль: перечень вопросов и задач .....</b>	<b>74</b>
<b>Раздел 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>77</b>
<b>3.1. Основные понятия .....</b>	<b>77</b>
3.1.1. Система массового обслуживания .....	77
3.1.2. Сеть массового обслуживания .....	79
3.1.3. Поток заявок .....	80
3.1.4. Длительность обслуживания заявок .....	82
3.1.5. Стратегии управления потоками заявок .....	83
<b>3.2. Классификация моделей массового обслуживания .....</b>	<b>87</b>
3.2.1. Базовые модели .....	87
3.2.2. Сетевые модели .....	89
<b>3.3. Параметры и характеристики СМО .....</b>	<b>92</b>
3.3.1. Параметры СМО .....	92
3.3.2. Обозначения СМО (символика Кендалла) .....	93
3.3.3. Режимы функционирования СМО .....	94
3.3.4. Характеристики СМО с однородным потоком заявок ....	95
3.3.5. Характеристики СМО с неоднородным потоком заявок .	99
<b>3.4. Параметры и характеристики СеМО .....</b>	<b>101</b>
3.4.1. Параметры СеМО .....	101
3.4.2. Режимы функционирования СеМО .....	102
3.4.3. Характеристики СеМО .....	103
<b>3.5. Резюме .....</b>	<b>105</b>
<b>3.6. Практикум: обсуждение и решение задач .....</b>	<b>109</b>
<b>3.7. Самоконтроль: перечень вопросов и задач .....</b>	<b>117</b>
<b>Раздел 4. АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ .....</b>	<b>120</b>
<b>4.1. Одноканальные СМО с однородным потоком заявок ..</b>	<b>120</b>
4.1.1. Характеристики экспоненциальной СМО M/M/1 .....	121
4.1.2. Характеристики неэкспоненциальной СМО M/G/1 .....	121

4.1.3. Характеристики неэкспоненциальной СМО G/M/1 .....	122
4.1.4. Характеристики СМО общего вида G/G/1 .....	123
4.1.5. Анализ свойств одноканальной СМО .....	125
<b>4.2. Многоканальные СМО с однородным потоком заявок</b>	126
4.2.1. Характеристики многоканальной СМО M/M/K .....	126
4.2.2. Анализ свойств многоканальной СМО .....	127
<b>4.3. Одноканальные СМО с неоднородным потоком заявок</b>	128
4.3.1. Характеристики и свойства ДО БП .....	130
4.3.2. Характеристики и свойства ДО ОП .....	132
4.3.3. Характеристики и свойства ДО АП .....	134
4.3.4. Законы сохранения .....	136
<b>4.4. Разомкнутые экспоненциальные СеМО с однородным потоком заявок</b>	138
4.4.1. Описание разомкнутых СеМО .....	138
4.4.2. Расчет коэффициентов передач и интенсивностей потоков заявок в узлах РССеМО .....	140
4.4.3. Проверка условия отсутствия перегрузок в СеМО .....	141
4.4.4. Расчет узловых характеристик РССеМО .....	141
4.4.5. Расчет сетевых характеристик РССеМО .....	142
4.4.6. Анализ свойств разомкнутых СеМО .....	145
<b>4.5. Замкнутые экспоненциальные СеМО с однородным потоком заявок</b>	149
4.5.1. Описание замкнутых СеМО .....	149
4.5.2. Расчет коэффициентов передач в узлах ЗСеМО .....	150
4.5.3. Расчет характеристик ЗСеМО .....	150
4.5.4. Анализ свойств замкнутых СеМО .....	154
<b>4.6. Резюме</b> .....	158
<b>4.7. Практикум: решение задач</b> .....	165
<b>4.8. Самоконтроль: перечень вопросов и задач</b> .....	167
<b>Раздел 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (МОДЕЛИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ)</b> .....	173
<b>5.1. Понятие случайного процесса</b> .....	173
5.1.1. Случайные процессы с дискретными состояниями .....	175
5.1.2. Понятие марковского случайного процесса .....	176
<b>5.2. Параметры и характеристики марковского случайного процесса</b> .....	177
5.2.1. Параметры марковского случайного процесса .....	177
5.2.2. Характеристики марковского случайного процесса .....	179
<b>5.3. Методы расчета марковских моделей</b> .....	180
5.3.1. Эргодическое свойство случайных процессов .....	180
5.3.2. Марковские процессы с дискретным временем .....	182
5.3.3. Марковские процессы с непрерывным временем .....	185

<b>5.4. Марковские модели систем массового обслуживания ..</b>	190
5.4.1. Одноканальная СМО без накопителя (М/М/1/0) .....	191
5.4.2. Многоканальная СМО без накопителя (М/М/Н/0) .....	196
5.4.3. Одноканальная СМО с накопителем ограниченной емкости (М/М/1/г) .....	200
5.4.4. Одноканальная СМО с накопителем неограниченной емкости (М/М/1) .....	202
5.4.5. Многоканальная СМО с накопителем ограниченной ёмкости (М/М/2/1) .....	205
5.4.6. Одноканальная СМО с неоднородным потоком заявок и относительными приоритетами .....	206
<b>5.5. Марковские модели сетей массового обслуживания .....</b>	211
5.5.1. Разомкнутая экспоненциальная СеМО с накопителем ограниченной емкости .....	212
5.5.2. Замкнутая экспоненциальная СеМО .....	216
5.5.3. Замкнутая СеМО с эрланговским обслуживанием .....	219
5.5.4. Замкнутая СеМО с гиперэкспоненциальным обслуживанием .....	223
<b>5.6. Резюме .....</b>	230
<b>5.7. Практикум: обсуждение и решение задач .....</b>	232
<b>5.8. Самоконтроль: перечень вопросов и задач .....</b>	237
<b>Раздел 6. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ .....</b>	240
<b>6.1. Основы имитационного моделирования .....</b>	240
6.1.1. Понятие имитационного моделирования .....	240
6.1.2. Принципы организации имитационного моделирования .....	241
<b>6.2. Методы формирования случайных чисел .....</b>	246
6.2.1. Формирование равномерно распределённых случайных величин .....	246
6.2.2. Проверка генераторов равномерно распределённых псевдослучайных чисел .....	249
6.2.3. Методы формирования псевдослучайных чисел с заданным законом распределения .....	250
<b>6.3. Введение в систему имитационного моделирования GPSS World .....</b>	254
6.3.1. Состав системы имитационного моделирования GPSS World .....	254
6.3.2. Элементы языка GPSS World .....	255
6.3.3. Объекты GPSS-модели .....	256
6.3.4. Состав и структура GPSS-модели .....	259
<b>6.4. Процесс моделирования в среде GPSS World .....</b>	262
6.4.1. Запуск процесса моделирования .....	262
6.4.2. Транзакты .....	262
6.4.3. Модельное время .....	263

6.4.4. Списки .....	264
6.4.5. Завершение моделирования .....	266
6.4.6. Системные числовые атрибуты .....	267
6.4.7. Встроенные вероятностные распределения .....	270
<b>6.5. Операторы блоков GPSS World .....</b>	<b>271</b>
6.5.1. Общие сведения .....	271
6.5.2. GENERATE (ГЕНЕРИРОВАТЬ) .....	272
6.5.3. TERMINATE (ЗАВЕРШИТЬ) .....	273
6.5.4. ADVANCE (ЗАДЕРЖАТЬ) .....	273
6.5.5. SEIZE (ЗАНЯТЬ) .....	274
6.5.6. RELEASE (ОСВОБОДИТЬ) .....	274
6.5.7. QUEUE (СТАТЬ В ОЧЕРЕДЬ) .....	275
6.5.8. DEPART (ПОКИНУТЬ ОЧЕРЕДЬ) .....	275
6.5.9. ENTER (ВОЙТИ) .....	275
6.5.10. LEAVE (ВЫЙТИ) .....	276
6.5.11. TEST (ПРОВЕРИТЬ) .....	276
6.5.12. TRANSFER (ПЕРЕДАТЬ) .....	277
6.5.13. PRIORITY (НАЗНАЧИТЬ ПРИОРИТЕТ) .....	278
6.5.14. PREEMPT (ЗАХВАТИТЬ) .....	278
6.5.15. RETURN (ВЕРНУТЬ) .....	279
6.5.16. LOGIC (ИЗМЕНИТЬ) .....	279
6.5.17. GATE (ВПУСТИТЬ) .....	280
6.5.18. MARK (ОТМЕТИТЬ) .....	280
6.5.19. ASSIGN (НАЗНАЧИТЬ) .....	281
6.5.20. TABULATE (ТАБУЛИРОВАТЬ) .....	281
<b>6.6. Команды GPSS World .....</b>	<b>282</b>
6.6.1. Общие сведения .....	282
6.6.2. FUNCTION (ФУНКЦИЯ) .....	282
6.6.3. STORAGE (МНОГОКАНАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО) .....	283
6.6.4. TABLE (ТАБЛИЦА) .....	283
6.6.5. QTABLE (ТАБЛИЦА ОЧЕРЕДИ) .....	284
6.6.6. VARIABLE (АРИФМЕТИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННАЯ) .....	284
6.6.7. CLEAR (ОЧИСТИТЬ) .....	285
6.6.8. CONTINUE (ПРОДОЛЖИТЬ) .....	285
6.6.9. HALT (ОСТАНОВИТЬ) .....	285
6.6.10. INCLUDE (ВКЛЮЧИТЬ) .....	285
6.6.11. REPORT (СОЗДАТЬ ОТЧЁТ) .....	286
6.6.12. RESET (СБРОСИТЬ) .....	286
6.6.13. SHOW (ПОКАЗАТЬ) .....	286
6.6.14. START (НАЧАТЬ) .....	286
6.6.15. STEP (ШАГАТЬ) .....	286
6.6.16. STOP (ОСТАНОВИТЬ) .....	287

<b>6.7. GPSS-модели массового обслуживания</b> .....	287
6.7.1. Модель 1: одноканальная СМО с детерминированным потоком заявок и равномерно распределенной длительностью обслуживания (D/U/1) .....	288
6.7.2. Модель 1.А: одноканальная СМО с простейшим потоком заявок (M/U/1) .....	292
6.7.3. Модель 2: многоканальная СМО с накопителем ограниченной ёмкости и обслуживанием заявок по закону Эрланга (M/E2/1/r) .....	293
6.7.4. Модель 2.А: дополнительная статистика в виде гистограмм .....	297
6.7.5. Модель 3: многоканальная СМО с неоднородным потоком заявок и накопителем ограниченной емкости .....	301
6.7.6. Модель 3.А: многоканальная СМО с отдельными накопителями для заявок разных классов .....	304
6.7.7. Модель 4: одноканальная СМО с относительными приоритетами .....	305
6.7.8. Модель 4.А: одноканальная СМО с абсолютными приоритетами .....	309
6.7.9. Модель 5: двухузловая разомкнутая СеМО с однородным потоком заявок .....	311
6.7.10. Модель 6: многоузловая разомкнутая СеМО с однородным потоком заявок .....	316
6.7.11. Модель 7: замкнутая СеМО с однородным потоком заявок .....	318
6.7.12. Модель 8: разомкнутая СеМО с неоднородным потоком заявок .....	323
<b>6.8. Резюме</b> .....	328
<b>6.9. Практикум: обсуждение и решение задач</b> .....	334
<b>6.10. Самоконтроль: перечень вопросов и задач</b> .....	340
<b>Заключительный раздел</b> .....	343
<b>Приложение 1. Используемые аббревиатуры</b> .....	347
<b>Приложение 2. Основные обозначения</b> .....	348
<b>Приложение 3. Вопросы для обсуждения</b> .....	351
<b>Список литературы</b> .....	353
<b>Алфавитный указатель</b> .....	354