

---

---

## Оглавление

Предисловие . . . . .	8
<b>Часть I. Общие проблемы сетевого управления</b>	<b>11</b>
<b>ГЛАВА 1. Задачи и методы сетевого управления (А. Л. Фрадков)</b>	<b>13</b>
1.1. Введение . . . . .	13
1.2. Задачи сетевого управления . . . . .	16
1.3. Математические модели сетевого управления . . . . .	19
1.4. Цели сетевого управления: синхронизация, консенсус, роение	21
1.5. Базовые результаты: теоремы Факса–Мюррея, Рена–Берда, Олфати-Сабера, Чена . . . . .	28
Литература к главе 1 . . . . .	39
<b>ГЛАВА 2. Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам (И. А. Джунусов, А. Л. Фрадков)</b>	<b>47</b>
2.1. Введение . . . . .	47
2.2. Постановка задачи . . . . .	48
2.3. Условия достижения цели управления в случае сбалансиро- ванного информационного графа . . . . .	49
2.4. Условия достижения цели управления в случае несбаланси- рованного информационного графа . . . . .	52
2.5. Условия достижения цели управления в случае неориенти- рованного информационного графа . . . . .	52
2.6. Пример. Кольцевая сеть двойных интеграторов . . . . .	53
2.7. Заключение . . . . .	54
Литература к главе 2 . . . . .	56
<b>ГЛАВА 3. Сходимость непрерывных консенсусных алгоритмов с двунаправленным взаимодействием (А. С. Матвеев, А. В. Проскур- ников)</b>	<b>59</b>
3.1. Введение . . . . .	59
3.2. Консенсусные протоколы с переменной топологией и усло- вия их сходимости . . . . .	62

3.3. Необходимое и достаточное условие консенсуса при двунаправленном графе . . . . .	64
3.4. Точная дискретизация и условие Моро . . . . .	66
3.5. Примеры и обобщения . . . . .	68
3.6. Доказательство основных результатов . . . . .	72
Литература к главе 3 . . . . .	79
<b>ГЛАВА 4. Частотные критерии консенсуса в сетях с нелинейными связями (А. В. Проскурников) . . . . .</b>	
4.1. Введение . . . . .	83
4.2. Консенсус многомерных агентов с переменной топологией . . . . .	85
4.3. Круговой критерий консенсуса . . . . .	89
4.4. Примеры . . . . .	93
4.5. Доказательство теоремы 4.1 . . . . .	96
4.6. Заключение . . . . .	99
Литература к главе 4 . . . . .	99
<b>ГЛАВА 5. Синхронизация в сетях с информационными ограничениями (Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков) . . . . .</b>	
5.1. Введение . . . . .	103
5.2. Процедуры кодирования . . . . .	107
5.3. Синхронизация систем на основе наблюдателей . . . . .	111
5.4. Управляемая синхронизация нелинейных систем через цифровой канал связи . . . . .	116
5.5. Управляемая синхронизация сетей . . . . .	121
5.6. Примеры. Синхронизация хаотических систем Чуа . . . . .	123
5.7. Заключение . . . . .	129
Литература к главе 5 . . . . .	130
<b>ГЛАВА 6. Синхронизация и управление с эталонной моделью в линейных динамических сетях (И. Б. Фуртат) . . . . .</b>	
6.1. Введение . . . . .	137
6.2. Постановка задачи синхронизации сети с произвольной относительной степенью агентов . . . . .	138
6.3. Метод динамической компенсации возмущений . . . . .	140
6.4. Численное исследование алгоритма компенсации возмущений . . . . .	142
6.5. Заключение . . . . .	145
6.6. Доказательство утверждения 6.1 . . . . .	145
Литература к главе 6 . . . . .	150
<b>ГЛАВА 7. Управление инвариантами квазиполиномиальных систем (И. В. Пчёлкина, А. Л. Фрадков) . . . . .</b>	
7.1. Квазиполиномиальные управляемые системы . . . . .	153

7.2. Управление многовидовой системой Лотки–Вольтерры . . . . .	156
7.3. Задача управления инвариантами . . . . .	156
7.4. Управление инвариантами при наличии возмущений . . . . .	159
7.5. Пример 1: управление процессом ферментации . . . . .	162
7.6. Пример 2: управление многовидовой экологической системой	165
7.7. Заключение . . . . .	171
Литература к главе 7 . . . . .	173

## **Часть II. Управление в системах и сетях с запаздыванием** **175**

<b>ГЛАВА 8. Системы с запаздыванием и дескрипторный метод</b> ( <i>Э. М. Фридман</i> ) . . . . .	177
8.1. Модели с запаздыванием . . . . .	177
8.2. Решение уравнения с запаздыванием и метод шагов . . . . .	178
8.3. Линейные стационарные системы и характеристическое уравнение . . . . .	179
8.4. Системы с запаздыванием общего вида и прямой метод Ляпунова . . . . .	181
8.5. Применение линейных матричных неравенств к исследованию систем с запаздыванием . . . . .	184
8.6. Построение регуляторов для систем с запаздыванием . . . . .	193
8.7. О дискретных системах с запаздыванием . . . . .	195
Литература к главе 8 . . . . .	198
<b>ГЛАВА 9. Децентрализованная адаптивная синхронизация динамических сетей с запаздыванием</b> ( <i>А. А. Селиванов, Э. М. Фридман, А. Л. Фрадков</i> ) . . . . .	201
9.1. Динамическая сеть с переменным запаздыванием в связях . . . . .	202
9.2. Построение адаптивного децентрализованного регулятора . . . . .	204
9.3. Условия синхронизации . . . . .	205
9.4. Предельная ограниченность возмущённых систем . . . . .	213
9.5. Пример: сеть систем Чуа . . . . .	218
Литература к главе 9 . . . . .	221
<b>ГЛАВА 10. Управление синхронизацией сетей с нелинейностями и запаздывающими связями</b> ( <i>А. А. Селиванов</i> ) . . . . .	225
10.1. Сеть систем с консенсусными регуляторами . . . . .	225
10.2. Консенсусный регулятор первого типа . . . . .	226
10.3. Консенсусный регулятор второго типа . . . . .	230
Литература к главе 10 . . . . .	234

<b>ГЛАВА 11. Условия консенсуса в сетях с нелинейными связями и переменными запаздываниями (А. В. Проскурников)</b>	237
11.1. Введение	237
11.2. Консенсусные протоколы с запаздыванием	239
11.3. Основные предположения	240
11.4. Робастность консенсуса к малым запаздываниям	241
11.5. Численное моделирование	243
11.6. Доказательство основных результатов	244
11.7. Заключение	248
Литература к главе 11	248
<b>ГЛАВА 12. Приближенный консенсус в стохастических динамических сетях с неполной информацией и задержками в измерениях (Н. О. Амелина, А. Л. Фрадков)</b>	251
12.1. Введение	251
12.2. Задача консенсуса в динамических сетях	253
12.3. Протокол управления и консенсус	254
12.4. Анализ динамики замкнутой системы	255
12.5. Заключение	259
Литература к главе 12	265
<b>Часть III. Прикладные задачи сетевого управления</b>	<b>271</b>
<b>ГЛАВА 13. Управление балансировкой загрузки в вычислительных сетях (Н. О. Амелина, О. Н. Грабичин)</b>	<b>273</b>
13.1. Балансировка загрузки сети	274
13.2. Балансировка загрузки при нестационарной постановке задачи	281
13.3. Имитационное моделирование	285
13.4. Заключение	290
Литература к главе 13	291
<b>ГЛАВА 14. Синхронизация энергетических сетей (И. Б. Фуртат)</b>	<b>293</b>
14.1. Введение	293
14.2. Постановка задачи синхронизации электроэнергетических сетей	294
14.3. Робастный алгоритм управления сетью электрических генераторов	296
14.4. Численное исследование сети четырех генераторов	298
14.5. Заключение	301

14.6. Доказательство утверждения 14.1 . . . . .	302
Литература к главе 14 . . . . .	304
<b>ГЛАВА 15. Управление и оценивание в многомаятниковых мехатронных системах (Б. Р. Андриевский) . . . . .</b>	<b>307</b>
15.1. Введение . . . . .	307
15.2. Описание мехатронного комплекса . . . . .	308
15.3. Математическая модель маятниковой системы . . . . .	311
15.4. Процедуры кодирования-декодирования . . . . .	311
15.5. Результаты экспериментов на комплексе . . . . .	314
15.6. Управление волновым движением маятниковой цепочки . . . . .	324
15.7. Заключение . . . . .	327
Литература к главе 15 . . . . .	329
<b>ГЛАВА 16. Управление синхронизацией многомашинной энергосистемы (И. В. Пчёлкина) . . . . .</b>	<b>333</b>
16.1. Постановка задачи . . . . .	333
16.2. Синтез алгоритма управления . . . . .	335
16.3. Исследование динамики замкнутой системы . . . . .	338
Литература к главе 16 . . . . .	342
<b>ГЛАВА 17. Управление синхронизацией двух маятников на тележке через сети связи (М. С. Ананьевский) . . . . .</b>	<b>345</b>
17.1. Введение . . . . .	345
17.2. Прототип облачной мехатронной лаборатории . . . . .	345
17.3. Постановка задачи управления через Интернет . . . . .	350
17.4. Результаты эксперимента . . . . .	352
17.5. Заключение . . . . .	356
Литература к главе 17 . . . . .	357
<b>ГЛАВА 18. Приложения. Вспомогательные сведения . . . . .</b>	<b>359</b>
18.1. Некоторые сведения из теории графов . . . . .	359
18.2. Метод скоростного градиента . . . . .	362
18.3. Метод пассивации . . . . .	377
Литература к главе 18 . . . . .	388