

В. В. Денисенко

КОМПЬЮТЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

**технологическим процессом,
экспериментом,
оборудованием**

Москва
Горячая линия - Телеком
2013

ББК 32.965
УДК 681.5:004.9
Д33

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *В. В. Топорков*,
доктор техн. наук, профессор *В. И. Финаев*

Денисенко В. В.

Д33 Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2013. – 606 с., ил.

ISBN 978-5-9912-0060-8.

Книга содержит систематическое изложение основных вопросов современной теории и практики промышленной и лабораторной автоматизации. Представлены только самые необходимые для практики сведения с акцентом на детальный анализ наиболее сложных и часто неправильно понимаемых вопросов. Рассмотрены широко распространенные в России промышленные интерфейсы и сети, архитектура систем автоматизации и методы их защиты от помех, тонкие нюансы техники автоматизированных измерений, ПИД-регуляторы с автоматической настройкой и адаптацией, структура и характеристики управляющих контроллеров, современные методы резервирования, средства программирования контроллеров, SCADA-пакеты и OPC серверы, юридические вопросы внедрения средств автоматизации, в том числе на опасных промышленных объектах.

Для специалистов по промышленной автоматизации, а также инженеров и научных работников, которые хотят автоматизировать свою работу с помощью компьютера. Может быть полезна студентам старших курсов технических университетов.

ББК 32.965

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Научное издание

Денисенко Виктор Васильевич
Компьютерное управление технологическим процессом,
экспериментом, оборудованием

Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышов

Редактор Ю. Н. Чернышов

Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 08.11.11. Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 50.25

Доп. тираж «по требованию». Изд. № 11060

ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия–Телеком»

ISBN 978-5-9912-0060-8

© В. В. Денисенко, 2009, 2011

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2009, 2011

Оглавление

Предисловие.....	11
Введение.....	13
Глава 1. Архитектура автоматизированной системы.....	16
1.1. Разновидности архитектур.....	16
1.1.1. Требования к архитектуре.....	18
1.1.2. Простейшая система.....	21
1.1.3. Распределенные системы автоматизации.....	23
1.1.4. Многоуровневая архитектура.....	29
1.2. Применение Интернет-технологий.....	33
1.2.1. Проблемы и их решение.....	34
1.2.2. Основные понятия технологии Интернета.....	35
1.2.3. Принципы управления через Интернет.....	36
1.2.4. Микро-веб-серверы.....	38
1.2.5. Примеры применения.....	39
1.3. Понятие открытой системы.....	40
1.3.1. Свойства открытых систем.....	43
1.3.2. Средства достижения открытости.....	45
1.3.3. Достоинства и недостатки.....	47
1.4. Заключение.....	49
1.5. Обзор публикаций.....	49
Глава 2. Промышленные сети и интерфейсы.....	51
2.1. Общие сведения о промышленных сетях.....	52
2.2. Модель OSI.....	55
2.2.1. Физический уровень.....	56
2.2.2. Канальный уровень.....	57
2.2.3. Сетевой уровень.....	57
2.2.4. Транспортный уровень.....	57
2.2.5. Сеансовый уровень.....	57
2.2.6. Уровень представления.....	58
2.2.7. Прикладной уровень.....	58
2.2.8. Критика модели OSI.....	58
2.3. Интерфейсы RS-485, RS-422 и RS-232.....	59
2.3.1. Принципы построения.....	59
2.3.2. Стандартные параметры.....	61

2.3.3. Согласование линии с передатчиком и приемником	61
2.3.4. Топология сети на основе интерфейса RS-485	65
2.3.5. Устранение состояния неопределенности линии	65
2.3.6. Сквозные токи	66
2.3.7. Выбор кабеля	67
2.3.8. Расширение предельных возможностей	69
2.3.9. Интерфейсы RS-232 и RS-422	69
2.4. Интерфейс «токовая петля»	70
2.5. HART-протокол	74
2.6. CAN	83
2.6.1. Физический уровень	85
2.6.2. Канальный уровень	90
2.6.3. Прикладной уровень: CANopen	94
2.6.4. Электронные спецификации устройств CANopen	96
2.7. Profibus	96
2.7.1. Физический уровень	98
2.7.2. Канальный уровень Profibus DP	99
2.7.3. Резервирование	104
2.7.4. Описание устройств	104
2.8. Modbus	105
2.8.1. Физический уровень	107
2.8.2. Канальный уровень	108
2.8.3. Прикладной уровень	110
2.9. Промышленный Ethernet	112
2.9.1. Особенности Ethernet	114
2.9.2. Физический уровень	115
2.9.3. Канальный уровень	121
2.9.4. Modbus TCP	121
2.9.5. Profinet	123
2.10. Протокол DCON	123
2.11. Беспроводные локальные сети	126
2.11.1. Проблемы беспроводных сетей и пути их решения	127
2.11.2. Bluetooth	137
2.11.3. ZigBee и IEEE 802.15.4	139
2.11.4. Wi-Fi и IEEE 802.11	149
2.11.5. Сравнение беспроводных сетей	152
2.12. Сетевое оборудование	153
2.12.1. Повторители интерфейса	153
2.12.2. Концентраторы (хабы)	155
2.12.3. Преобразователи интерфейса	155
2.12.4. Адресуемые преобразователи интерфейса	158

2.12.5. Межсетевые шлюзы	159
2.12.6. Другое сетевое оборудование	160
2.12.7. Кабели для промышленных сетей	161
2.13. Заключение	165
Глава 3. Защита от помех	166
3.1. Источники помех	167
3.1.1. Характеристики помех	168
3.1.2. Помехи из сети электроснабжения	170
3.1.3. Молния и атмосферное электричество	173
3.1.4. Статическое электричество	176
3.1.5. Помехи через кондуктивные связи	178
3.1.6. Электромагнитные помехи	178
3.1.7. Другие типы помех	180
3.2. Заземление	180
3.2.1. Определения	181
3.2.2. Цели заземления	182
3.2.3. Защитное заземление зданий	183
3.2.4. Автономное заземление	185
3.2.5. Заземляющие проводники	185
3.2.6. Модель «земли»	185
3.2.7. Виды заземлений	187
3.3. Проводные каналы передачи сигналов	189
3.3.1. Источники сигнала	189
3.3.2. Приемники сигнала	191
3.3.3. Прием сигнала заземленного источника	194
3.3.4. Прием сигнала незаземленных источников	195
3.3.5. Дифференциальные каналы передачи сигнала	196
3.4. Паразитные связи	198
3.4.1. Модели компонентов систем автоматизации	199
3.4.2. Паразитные кондуктивные связи	200
3.4.3. Индуктивные и емкостные связи	201
3.5. Методы экранирования и заземления	204
3.5.1. Гальванически связанные цепи	204
3.5.2. Экранирование сигнальных кабелей	206
3.5.3. Гальванически развязанные цепи	210
3.5.4. Экраны кабелей на электрических подстанциях	211
3.5.5. Экраны кабелей для защиты от молнии	211
3.5.6. Заземление при дифференциальных измерениях	212
3.5.7. Интеллектуальные датчики	212
3.5.8. Монтажные шкафы	213
3.5.9. Распределенные системы управления	215

3.5.10. Чувствительные измерительные цепи	216
3.5.11. Исполнительное оборудование и приводы	216
3.5.12. Заземление на взрывоопасных объектах	217
3.6. Гальваническая развязка	218
3.7. Защита промышленных сетей от молнии	219
3.7.1. Пути прохождения импульса молнии	220
3.7.2. Средства защиты	222
3.8. Стандарты и методы испытаний по ЭМС	224
3.9. Верификация заземления и экранирования	225
3.10. Заключение	226
Глава 4. Измерительные каналы	229
4.1. Основные понятия	229
4.1.1. Определения основных терминов	229
4.1.2. Точность, разрешающая способность и порог чувстви- тельности	234
4.1.3. Функция автокорреляции	236
4.1.4. Коэффициент корреляции	240
4.1.5. Точечные и интервальные оценки погрешности	243
4.1.6. Погрешность метода измерений	245
4.1.7. Погрешность программного обеспечения	246
4.1.8. Достоверность измерений	246
4.2. Многократные измерения	248
4.2.1. Повышение точности путем усреднения результатов измерений	248
4.2.2. Точность и продолжительность измерений	252
4.3. Динамические измерения	258
4.3.1. Теорема Котельникова	258
4.3.2. Фильтр и динамическая погрешность	260
4.3.3. Алиасные частоты, антиалиасные фильтры	270
4.4. Суммирование погрешностей измерений	275
4.4.1. Исходные данные для расчета	275
4.4.2. Методы суммирования погрешностей	276
4.4.3. Систематические погрешности	278
4.4.4. Случайные погрешности	279
4.4.5. Дополнительные погрешности	280
4.4.6. Динамические погрешности	280
4.4.7. Нахождение итоговой погрешности	281
4.5. Заключение	282
4.6. Обзор литературы	283
Глава 5. ПИД-регуляторы	284

5.1. Идентификация моделей динамических систем	285
5.1.1. Модели объектов управления	287
5.1.2. Выбор тестовых сигналов	294
5.1.3. Частотная идентификация в режиме релейного регули-	
рования	301
5.1.4. Идентификация в замкнутом и разомкнутом контурах	309
5.1.5. Аналитическая идентификация	312
5.1.6. Методы минимизации критериальной функции	315
5.2. Классический ПИД-регулятор	318
5.2.1. П-регулятор	319
5.2.2. И-регулятор	321
5.2.3. ПИ-регулятор	322
5.2.4. ПД-регулятор	324
5.2.5. ПИД-регулятор	324
5.3. Модификации ПИД-регуляторов	325
5.3.1. Регулятор с весовыми коэффициентами при уставке	325
5.3.2. Регулятор с формирующим фильтром для сигнала уставки	327
5.3.3. Принцип разомкнутого управления	328
5.3.4. Регулятор отношений	334
5.3.5. Регулятор с внутренней моделью	334
5.3.6. Эквивалентные преобразования структур ПИД-регуляторов	338
5.3.7. ПИД-регуляторы для систем с транспортной задержкой	339
5.4. Особенности реальных регуляторов	342
5.4.1. Погрешность дифференцирования и шум	343
5.4.2. Интегральное насыщение	344
5.4.3. Запас устойчивости и робастность	348
5.4.4. Сокращение нулей и полюсов	356
5.4.5. Безударное переключение режимов регулирования	356
5.4.6. Дискретная форма регулятора	357
5.5. Расчет параметров	361
5.5.1. Качество регулирования	361
5.5.2. Выбор параметров регулятора	364
5.5.3. Ручная настройка, основанная на правилах	367
5.5.4. Методы оптимизации	368
5.6. Автоматическая настройка и адаптация	368
5.6.1. Основные принципы	369
5.6.2. Табличное управление	370
5.6.3. Обзор коммерческих продуктов	371
5.6.4. Программные средства настройки	375
5.7. Нечеткая логика, нейронные сети и генетические алгоритмы	376
5.7.1. Нечеткая логика в ПИД-регуляторах	377

5.7.2. Искусственные нейронные сети.....	382
5.7.3. Генетические алгоритмы.....	384
5.8. Заключение.....	386
5.9. Обзор публикаций.....	387
Глава 6. Контроллеры для систем автоматизации.....	391
6.1. Программируемые логические контроллеры.....	393
6.1.1. Типы ПЛК.....	393
6.1.2. Архитектура.....	395
6.1.3. Характеристики.....	399
6.1.4. Пример ПЛК.....	403
6.1.5. Устройства сбора данных.....	406
6.2. Компьютер в системах автоматизации.....	408
6.2.1. Компьютер в качестве контроллера.....	409
6.2.2. Компьютер для общения с оператором.....	410
6.2.3. Промышленные компьютеры.....	411
6.3. Устройства ввода-вывода.....	414
6.3.1. Ввод аналоговых сигналов.....	415
6.3.2. Модули ввода тока и напряжения.....	419
6.3.3. Термопары.....	421
6.3.4. Термопреобразователи сопротивления.....	425
6.3.5. Тензорезисторы.....	432
6.3.6. Вывод аналоговых сигналов.....	439
6.3.7. Ввод дискретных сигналов.....	443
6.3.8. Вывод дискретных сигналов.....	445
6.3.9. Ввод частоты, периода и счет импульсов.....	447
6.3.10. Модули управления движением.....	449
6.4. Заключение.....	452
Глава 7. Автоматизация опасных объектов.....	454
7.1. Искробезопасная электрическая цепь.....	455
7.2. Блоки искрозащиты.....	458
7.4. Правила применения искробезопасных устройств.....	460
7.4. Функциональная безопасность.....	461
7.5. Выбор аппаратных средств.....	464
7.5.1. Виды опасных промышленных объектов.....	464
7.5.2. Классификация взрывоопасных зон.....	466
7.5.3. Классификация взрывоопасности технологических блоков..	468
7.5.4. Взрывопожарная и пожарная опасность.....	469
7.5.5. Требования к техническим устройствам.....	471
7.5.6. Маркировка взрывозащищенного оборудования.....	471
7.5.7. Монтаж взрывоопасного технологического оборудования....	474

7.6. Заключение.....	475
Глава 8. Аппаратное резервирование.....	477
8.1. Основные понятия и определения.....	477
8.2. Резервирование ПЛК и устройств ввода-вывода.....	482
8.2.1. Общие принципы резервирования.....	483
8.2.2. Модули ввода и датчики.....	487
8.2.3. Модули вывода.....	491
8.2.4. Процессорные модули.....	495
8.2.5. Резервирование источников питания.....	500
8.3. Резервирование промышленных сетей.....	501
8.3.1. Сети Profibus, Modbus, CAN.....	501
8.3.2. Сети Ethernet.....	502
8.3.3. Резервирование беспроводных сетей.....	508
8.4. Оценка надежности резервированных систем.....	509
8.5. Заключение.....	514
Глава 9. Программное обеспечение.....	516
9.1. Развитие программных средств автоматизации.....	516
9.1.1. Графическое программирование.....	518
9.1.2. Графический интерфейс.....	519
9.1.3. Открытость программного обеспечения.....	519
9.1.4. Связь с физическими устройствами.....	520
9.1.5. Базы данных.....	521
9.1.6. Операционные системы реального времени.....	521
9.2. OPC-сервер.....	524
9.2.1. Обзор стандарта OPC.....	524
9.2.2. OPC DA-сервер.....	526
9.2.3. OPC HDA-сервер.....	530
9.2.4. Спецификация OPC UA.....	530
9.2.5. OPC DA-сервер в среде MS Excel.....	535
9.2.6. Применение OPC-сервера с MATLAB и LabVIEW.....	539
9.3. Системы программирования на языках МЭК 61131-3.....	540
9.3.1. Язык релейно-контактных схем LD.....	542
9.3.2. Список инструкций IL.....	543
9.3.3. Структурированный текст ST.....	543
9.3.4. Диаграммы функциональных блоков FBD.....	544
9.3.5. Функциональные блоки стандартов МЭК 61499 и МЭК 61804.....	544
9.3.6. Последовательные функциональные схемы SFC.....	546
9.3.7. Программное обеспечение.....	547
9.4. Пользовательский интерфейс, SCADA-пакеты.....	549
9.4.1. Функции SCADA.....	549