

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ
РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ
УРОВНЕМЕРЫ С ЧАСТОТНОЙ
МОДУЛЯЦИЕЙ.
ПРАКТИКА ПРОМЫШЛЕННОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**

**ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ
Б.А. АТАЯНЦА**

**Рязань
2017**

УДК 621.396

ББК 32.95

О 83

Авторы: Б.А. Атаянц, И.В. Баранов, В.А. Болонин, М.Э. Боровков, В.В. Губанов, В.С. Гусев, В.М. Давыдочкин, В.В. Езерский, Ю.В. Мазалов, Д.Я. Нагорный, В.С. Паршин, В.А. Пронин.

Под общей редакцией Б.А. Атаянца

О 83 Отечественные радиолокационные уровнемеры с частотной модуляцией. Практика промышленного применения. Монография. – Рязань: ГУП РО «Рязанская областная типография», 2017. – 360 с.: ил.

ISBN 978-5-91255-241-0

Приведены краткие теоретические сведения о прецизионном измерении уровня. Рассмотрена работа уровнемеров на фоне комплекса мешающих факторов. Содержатся классификация уровнемеров, краткие исторические сведения о развитии радиолокационной уровнеметрии в России и на ООО предприятие «КОНТАКТ-1». Обсуждаются структурные схемы семейства уровнемеров «БАРС». Рассматриваются принципы построения СВЧ-модулей и антенно-волноводных систем. Приведены структурные схемы электронных модулей уровнемеров и особенности конструкции. Изложены основы оценки и подтверждения метрологических характеристик. Обсуждаются основы промышленной эксплуатации радиолокационных уровнемеров. Рассматривается оборудование, обеспечивающее использование уровнемеров для автоматизации производства и примеры конкретных автоматизированных систем управления различными производственными процессами.

УДК 621.396

ББК 32.95

Подписано в печать 10.02.17

Формат 60x90/16. Печ. л. 22,5. Бумага офсетная

Печать офсетная. Тираж 500 экз. Заказ № 527

Издано и отпечатано в ГУП РО «Рязанская областная типография»

390023, г. Рязань, ул. Новая, 69/12

ISBN 978-5-91255-241-0

© Авторы, текст, 2017

© ООО предприятие «КОНТАКТ-1», 2017

© ГУП РО «Рязанская областная типография», 2017

Посвящается

25 - летию

ООО предприятие «КОНТАКТ-1»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 9

1. МЕТОД РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ

УРОВНЯ 14

1.1. Введение 14

1.2. Требования к радиолокационному измерителю уровня 15

1.3. Основные сведения о распространении и отражении радиоволн 16

1.4. Теоретические основы измерения расстояния с помощью частотно-модулированного сигнала 26

1.4.1. Метод радиолокационного измерения расстояния 26

1.4.2. Основы работы частотного дальномера 28

1.4.3. Классический счётный метод измерения разностной частоты 32

1.4.4. Модификация счётного метода измерения расстояния 34

1.4.5. Измерение разностной частоты в спектральной области 41

1.4.6. Методическая погрешность измерения расстояния при оценке разностной частоты по максимуму спектральной плотности амплитуды 45

1.4.7. Снижение влияния шума 48

1.5. Заключение 50

1.6. Литература к главе 1 51

2. УЧЁТ ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ 53

2.1. Введение 53

2.2. Параметры, учитываемые при измерениях в резервуарах 53

2.3. Влияние электрофизических свойств контролируемых продуктов и конструктивных особенностей резервуаров на результаты измерений 55

2.4. Алгоритмы снижения влияния помех на результаты измерения расстояния 68

2.4.1. Слабая помеха 68

2.4.2. Сильная помеха 69

2.4.3. Отражение от дна резервуара 71

2.5. Методы снижения влияния нелинейности МХ 72

2.5.1. Компенсация нелинейности МХ 72

2.5.2. Учёт нелинейности МХ 74

2.5.3. Цифровой синтез частоты 75

2.6. Особенности проведения измерений в волноводе 75

2.6.1. Влияние дисперсии на свойства СРЧ и величину погрешности измерения 76

2.6.2. Возможные методы снижения влияния дисперсии в волноводе 79

2.7. Заключение 83

2.8. Литература к главе 2 83

3. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ УРОВНЕМЕРЫ

СЕРИИ БАРС 300 86

3.1. Введение 86

3.2. Классификация радиолокационных уровнемеров по назначению и структуре построения 86

3.3. История создания и выпуска радиолокационных уровнемеров на предприятии «КОНТАКТ-1» 88

3.4. Приборы первого поколения БАРС 302 и БАРС 311 92

3.5. Приборы второго поколения БАРС 321И, БАРС 322И 97

3.6. Приборы третьего поколения БАРС 331(332)И, БАРС 322(332)МИ 103

3.7. Прибор четвертого поколения БАРС 341И 111

3.8. Приборы пятого поколения БАРС 351И, БАРС 352И 119

3.9. Заключение 125

3.10. Литература к главе 3 126

4. СВЧ БЛОКИ И МОДУЛИ УРОВНЕМЕРОВ 128

4.1. Введение 128

4.2. Приёмно-передающие СВЧ модули 128

4.2.1. ППМ для приборов первого поколения 129

4.2.2. ППМ для приборов второго поколения 131

4.2.3. ППМ для приборов третьего поколения 132

4.2.4. ППМ для приборов четвёртого поколения 133

4.2.5. ППМ для приборов пятого поколения 134

4.2.6. Приемники отраженного сигнала и смесители 138

4.2.7. Технические характеристики ППМ 140

4.2.8. Особенности функциональных узлов и конструкции ППМ 142

4.3. Антенно-волноводные системы	143
4.3.1. Типы антенно-волноводных систем	143
4.3.2. Формирование диаграммы направленности апертурной антенны	147
4.3.3. Параметры антенн	149
4.3.4. Антенны, применяемые в уровнемерах БАРС	155
4.3.5. Уровеньмеры с направляющей системой в виде трубы-волновода	156
4.4. Заключение	159
4.5. Литература к главе 4	160
5. ЭЛЕКТРОННЫЕ БЛОКИ УРОВНЕМЕРОВ «БАРС»	161
5.1. Введение	161
5.2. Формирователи закона качания частоты. Модуляторы	161
5.2.1. Вводные замечания	161
5.2.2. Простой аналоговый модулятор	162
5.2.3. Модулятор с внесением предискажений	164
5.2.4. Цифро-аналоговый модулятор	166
5.2.5. Требования к частотной модуляции в прецизионных измерителях уровня	167
5.2.6. Синтезатор частоты на основе контура фазовой автоподстройки частоты	170
5.2.7. Гибридный синтезатор частоты	171
5.3. Усилители с регулируемым усилением	173
5.3.1. Необходимость регулировки усиления	173
5.3.2. Аналоговые устройства АРУ	174
5.3.3. Аналого-цифровые схемы АРУ	175
5.4. Модули обработки сигналов и вычислители уровня	177
5.4.1. Назначение модулей обработки	177
5.4.2. Схема фильтрации СРЧ	178
5.4.3. Схемы выделения особых точек СРЧ	182
5.4.4. Алгоритмы использования особых точек	184
5.4.5. Модуль обработки уровнемеров БАРС 322МИ и БАРС 332МИ	187
5.4.6. Модули обработки уровнемеров четвертого и пятого поколений	188
5.4.7. Вычислитель уровня	188
5.5. Коммуникационные модули	189
5.6. Заключение	193
5.7. Литература к главе 5	194

6. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УРОВНЕМЕРОВ	196
6.1. Введение	196
6.2. Особенности современных моделей радиолокационных уровнемеров серии БАРС 300	197
6.3. Обеспечение взрывозащиты	209
6.4. Защита электронных модулей	215
6.5. Требования к приборам, применяемым на атомных электростанциях	216
6.6. Обеспечение защиты от неблагоприятных факторов	217
6.7. Заключение	220
7. ОЦЕНКА И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УРОВНЕМЕРОВ	222
7.1. Введение	222
7.2. Метрологические характеристики	223
7.3. Установка для поверки радиолокационных уровнемеров УП-01	224
7.4. Радиолокационные отражатели для прецизионных измерений	227
7.5. Калибровка радиолокационных уровнемеров	233
7.5.1. Калибровка уровнемеров с антеннами	234
7.5.2. Калибровка волноводных вариантов уровнемеров ..	237
7.6. Поверка уровнемеров	238
7.6.1. Поверка на предприятии с использованием поверочной установки	239
7.6.2. Поверка с использованием вставки калиброванной высоты	241
7.6.3. Поверка с использованием специального отражателя	243
7.6.4. Поверка с использованием стены помещения	245
7.6.5. Поверка волноводных вариантов уровнемеров	245
7.7. Выводы	246
7.8. Литература к главе 7	246
8. ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УРОВНЕМЕРОВ	248
8.1. Введение	248
8.2. Обеспечение требований безопасной эксплуатации	248

8.3. Особенности измерения уровня жидких и сыпучих продуктов	249
8.4. Требования по монтажу, установке и ориентации уровнемеров	256
8.5. Особенности применения уровнемеров при наличии мешающих отражений	272
8.6. Настройка уровнемеров на резервуаре по условиям эксплуатации	274
8.6.1. Прибор БАРС 322(332)МИ	274
8.6.2. Прибор БАРС 341И.ХХ	278
8.6.3. Прибор БАРС 351(352)И	282
8.7. Пусконаладочные работы и профилактическое обслуживание	285
8.8. Разрешительная и сертификационная документация	289
8.9. Заключение	291
9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРОВНЕМЕРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.	293
9.1. Введение	293
9.2. Вторичное оборудование	294
9.2.1. Универсальный вторичный преобразователь УВП-02	294
9.2.2. Блок контроля и управления БУК-01	298
9.3. Программа для поверки и настройки приборов «БАРС»	304
9.4. АСУ контроля уровня «ПАРК ХРАНЕНИЯ»	309
9.5. АСУ «ЗАГРУЗКА-ВЫГРУЗКА АККУМУЛИРУЮЩИХ БУНКЕРОВ»	319
9.6. АСУ «ПНЕНВМОТРАНСПОРТ»	330
9.7. Заключение	334
ПРИЛОЖЕНИЯ	336
<i>Приложение А.</i> Поверка радиолокационных уровнемеров	336
<i>Приложение Б.</i> Сертификаты	345
<i>Приложение В.</i> Сокращения	352
<i>Приложение Г.</i> Список обозначений	355

ВВЕДЕНИЕ

В конце 2012 года в издательстве «Радиотехника», г. Москва, вышла монография «Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения». Авторы - Б.А. Атаянц, В.М. Давыдочкин, В.В. Езерский, В.С. Паршин, С.М. Смольский – сотрудники ООО предприятие «КОНТАКТ-1» (г. Рязань)

В монографии обобщены результаты многолетних теоретических и практических исследований и разработок как самих авторов, так и сведения из патентной и технической литературы. Не лишне отметить, что из 206 цитированных в монографии источников более половины – это статьи, доклады на научных конференциях и патенты на изобретения авторов. Прошедшее с момента выхода в свет монографии время показало актуальность исследованных проблем, серьезный интерес отечественной и мировой научной общественности к материалам книги. Отрадно, что книга переведена на английский язык и издана в Соединенных штатах Америки и Великобритании (Издательский дом «Артекс» Precision FMCW Short-Range Radar for Industrial Applications. Boris A. Atayants, Viacheslav M. Davydochkin, Victor V. Ezerskiy, Valery S. Parshin, Sergey M. Smolskiy).

Говоря о безусловных достоинствах монографии, мы должны отметить, что многие вопросы практического применения результатов теоретических исследований не нашли в ней должного отражения. Это и понятно, так как читательская аудитория монографии – научные работники, студенты старших курсов, а также, в меньшей степени, инженеры КИП и А, практикующие инженеры и инженеры-«эксплуатационщики».

Предлагаемая Вашему вниманию, уважаемый читатель, книга «Отечественные радиолокационные уровнемеры с частотной модуляцией. Практика промышленного применения» содержит сведения об особенностях схемного решения, особенностях конструктивного исполнения и эксплуатации радиолокационных измерителей уровня, серийно, на протяжении двух десятилетий выпускаемых приборостроительным предприятием «КОНТАКТ-1» (г. Рязань). К моменту завершения рукописи в эксплуатации находятся многие тысячи приборов. Они эксплуатируются в самых разных отраслях промышленности, в различных климатических условиях при существенных изменениях температуры, влажности, давления, при достаточно малых значениях диэлектрической проницаемости про-

дукта; диапазон измеряемых уровней – несколько десятков метров при погрешности измерения от единиц сантиметров до одного миллиметра.

Отмеченные особенности утвердили нас в необходимости представить на Ваш суд результаты практической деятельности коллектива предприятия по созданию семейства радиолокационных уровнемеров серии «БАРС».

Книга состоит из введения, девяти глав, списка литературы к каждой главе и 5 приложений.

Первые две главы содержат основные сведения о радиолокационном методе измерения уровня в промышленных резервуарах.

В первой главе приведены сведения о радиолокационном методе измерения уровня в промышленных резервуарах и сформулированы основные требования к радиолокационному измерению уровня. В доступной форме разъяснены принципы распространения и отражения радиоволн, в сжатом виде описаны алгоритмы обработки сигнала разностной частоты в уровнемерах серии «БАРС», а также рассмотрен алгоритм обработки сигналов частотно-модулированного дальномера снижающий влияние шумов на результат измерения уровня.

Во второй главе дан анализ влияния наиболее характерных факторов, увеличивающих погрешность измерения уровня в практически важных ситуациях. Для каждого мешающего фактора отмечена степень увеличения погрешности, перечислены меры организационного, технического характера и алгоритмы снижения конкретной составляющей погрешности. Особое внимание в главе уделено задаче измерения уровня с помощью волноводной направляющей системы. Предложены и рассмотрены алгоритмы управления законом ЧМ, исключаяющие негативное влияние частотной дисперсии в волноводе – основной составляющей погрешности.

В третьей главе приведена классификация по назначению и структуре радиолокационных уровнемеров, серийно выпускаемых предприятием «КОНТАКТ-1», рассмотрены конструктивные особенности и функциональные схемы пяти поколений уровнемеров серии «БАРС» от простейших (БАРС 302/311) до вариантов БАРС 351/352, использующих современные алгоритмы цифрового формирования и обработки сигналов.

Семейство уровнемеров представлено многими вариантами исполнений для самых широкого применения.

Материалы четвертой главы содержат сведения о приемопередающих модулях (ППМ) СВЧ обеспечивающих достижение требуемых точностных и эксплуатационных характеристик уровнемеров. Прослеживается совершенствование конструкции и схемы ППМ: от первых покупных изделий до самых совершенных разработанных и освоенных в производстве предприятия «КОНТАКТ-1» с цифровым синтезом зондирующего сигнала и адаптивным законом ЧМ.

Рассмотрены антенно-волноводные системы. Приведены основные параметры антенн, определяющие их выбор при практическом применении. Перечислены все виды антенно-волноводных систем, используемых в уровнемерах в различных условиях эксплуатации.

В пятой главе рассмотрены электронные блоки уровнемеров «БАРС». Подробно описаны блоки формирования закона частотной модуляции, вопросы коррекции формы модулирующего напряжения для компенсации нелинейности модуляционной характеристики СВЧ-генератора. Для двух вариантов цифровых синтезаторов частоты зондирующего сигнала с дискретной подстройкой частоты приведены структурные схемы и основные параметры.

Рассмотрены варианты исполнения усилителей с автоматической регулировкой усиления. Описаны модули обработки сигналов разностной частоты, обеспечивающие фильтрацию мешающих сигналов. Отдельно описаны вычислители уровня и коммутационные модули, позволяющие передавать результаты измерения до отдельного потребителя, и при большом числе уровнемеров, используемых в автоматизированных системах предприятий.

Глава 6 содержит сведения об особенностях конструкции уровнемеров «БАРС», об унифицированных взрывобезопасных оболочках. Дано описание конструкций антенн, применяемых в различных климатических условиях, в агрессивной и высокотемпературной среде. Рассмотрены варианты конструкций с волноводной направляющей системой. Подробно проработаны вопросы обеспечения взрывозащиты в уровнемерах «БАРС», даны пояснения о конкретных путях её достижения.

Отдельно рассмотрены требования к уровнемерам, применяемым на атомных электростанциях; особенности конструктивных решений, обеспечивающих электромагнитную совместимость, сейсмостойкость и устойчивость к воздействию дезактивирующих растворов.

Глава 7 посвящена вопросам оценки и подтверждения метрологических характеристик радиолокационных уровнемеров.

Подробно описана сертифицированная поверочная установка. Сформулированы условия обеспечения высокой точности эталонного отражателя и снижения влияния мешающих отражений. Приведены варианты поверки радиолокационных уровнемеров в условиях предприятия-изготовителя и на объекте эксплуатации.

В главе 8 рассмотрены особенности промышленной эксплуатации радиолокационных уровнемеров, обеспечивающие достижения минимальной погрешности; названы главные причины увеличения погрешности. Основное внимание уделено выбору места установки, монтажу и ориентации; приведены типичные примеры правильной и неправильной установки. Отдельно рассмотрены варианты применения специальных алгоритмов для снижения влияния мешающих отражений специфичных для резервуаров.

Описан порядок и содержание пуско-наладочных работ обеспечивающих надёжный ввод уровнемеров в эксплуатацию.

В заключительной части главы приведены необходимые сведения о разрешительной и сертификационной документации, подтверждающие право ООО предприятие «КОНТАКТ-1» на изготовление и реализацию уровнемеров серии «БАРС».

Материал главы 9 содержит сведения о применении уровнемеров БАРС в автоматизированных системах управления технологическими процессами (далее АСУТП). Достаточно подробно описано вторичное оборудование, обеспечивающее электрическое питание и съём измерительной информации, в частности, универсальный вторичный преобразователь УВП-02 для работы с одним уровнемером и блок контроля и управления БУК-01, позволяющий объединить в систему резервуарный парк. Приведены примеры программной оболочки верхнего уровня для проверки и настройки приборов БАРС.

Подробно описаны системы АСУТП, практически реализованные на промышленных предприятиях. Это: АСУ контроля уровня «Парк хранения», АСУ «Загрузка-выгрузка аккумулярующих бункеров» и АСУ «Пневмотранспорт». Для каждой системы подробно указано назначение, особенности интерфейса и порядок функционирования.

В приложениях А, Б, В и Г приведены основные сведения о поверке метрологических характеристик, государственной поверке уровнемеров, внесённых в государственный реестр средств измере-

ний, даны ссылки на соответствующие документы, утверждённые ГНИ ФГУП «ВНИИМС». Приведены также копии сертификатов соответствия и свидетельств об утверждении типа средств измерения.

Авторы выражают исключительную признательность всему коллективу предприятия «КОНТАКТ-1» за постоянную помощь и масштабную работу по созданию и производству отечественных радиолокационных уровнемеров серии «БАРС».

Мы с благодарностью примем все замечания и пожелания по содержанию книги от Вас, наш уважаемый читатель.