

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Кафедра «Диагностические информационные технологии»

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗА УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Практикум
для студентов, обучающихся по направлениям
09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»,
12.03.01 «Приборостроение»,
27.03.04 «Управление в технических системах»

Под редакцией В.Д. Глушнева

ISBN 978-5-7046-2948-1

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

УДК 681
ББК 31.32
И 374

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре диагностические информационные технологии

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. Н.А. Серов;
докт. техн. наук, проф. Ю.С. Бехтин

Авторы: С.И. Герасимов, В.Д. Глушнев, Е.А. Долгачева,
Д.А. Чумаченко

И 374 Измерение расхода жидкостей и газа. Ультразвуковые расходомеры [Электронный ресурс]: практикум/ С.И. Герасимов, В.Д. Глушнев, Е.А. Долгачева и др.; под ред. В.Д. Глушнева. – Электрон. дан. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – 1 электрон. опт. диск DVD-R.

Даны основные понятия и определения в расходометрии. Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения расходомеров и счетчиков количества жидкости и газа. Основное внимание удалено исследованию ультразвукового метода измерения расхода, рассмотрены схемы построения современных ультразвуковых расходомеров и конструкции их основных узлов, произведен анализ метрологических и эксплуатационных характеристик расходомеров. Приведено описание трех лабораторных работ, посвященных средствам и методам поверки счетчиков воды, исследованию работы ультразвуковых расходомеров и используемых в них измерителей интервалов времени.

Предназначено для студентов института информационных и вычислительных технологий (ИВТИ).

Минимальные системные требования:

Тип ЭВМ: ПК на базе Pentium IV и выше.

ОС: Windows XP и выше.

Дополнительные программные средства: просмотр документов в формате PDF (Adobe Reader или аналоги).

ISBN 978-5-7046-2948-1

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
1.1. Основные понятия и определения в расходометрии.....	5
1.2. Проверка расходомеров и счётчиков количества	8
1.2.1. Общие положения.....	8
1.2.2. Типовая схема и принцип действия расходомерной установки	9
1.2.3. Автоматизация процесса поверки.....	13
1.3. Ультразвуковые расходомеры.....	14
1.3.1. Обобщённый принцип работы УЗР.....	14
1.3.2. Общий анализ погрешности ультразвукового метода	18
1.3.3. Первичные преобразователи расхода в УЗР	19
1.4. Методы измерения времён распространения УЗС в УЗР.....	24
1.4.1.Метод прямого счёта	25
1.4.2.Метод растяжки дробной части интервала времени	27
1.4.3.Кратно-частотный метод.....	30
1.4.4.Использование калиброванных линий задержек.....	32
1.4.5.Метод цифровой обработки сигналов	34
1.5. Модель пьезоэлектрических преобразователей	38
1.5.1. Физическая модель работы пьезоэлементов	38
1.5.2. Пьезоэлектрический преобразователь – электромеханический четырехполюсник.....	41
1.5.3. Принцип взаимности для пьезоэлектрических преобразователей	51
2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	52
2.1. Лабораторная работа №1. Средства и методы поверки счётчиков и расходомеров воды	52
2.1.1.Описание лабораторной поверочной установки.....	52
2.1.2.Задание для выполнения работы	53
Вопросы и задачи к лабораторной работе № 1	54
2.2. Лабораторная работа №2. Исследование работы ультразвуковых расходомеров времязимпульсного типа.....	55
2.2.1.Цель работы	55
2.2.2.Задание на проведение исследований.....	56
2.2.3.Содержание отчёта о выполненной практической работе	58
Вопросы и задачи к лабораторной работе № 2	58
2.3. Лабораторная работа № 3. Исследование измерителя интервалов времени УЗР.....	59
2.3.1. Цель работы	59
2.3.2. Задание на проведение исследований.....	59
2.3.3. Расчётная часть	60
2.3.4. Содержание отчёта по лабораторной работе	61
Вопросы и задачи к лабораторной работе № 3	61
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	63

ВВЕДЕНИЕ

Трудно найти сферу практической деятельности человека, где не использовалось бы измерение расхода жидкостей и газа [10]: такие далекие друг от друга области, как медицина и добыча полезных ископаемых, энергетика, системы жизнеобеспечения, торговля, научные исследования и многие другие требуют применения **средства измерения количества и расхода** жидкостей [7]. Расходометрия характеризуется как большим диапазоном измеряемых расходов, так и большим многообразием условий измерения: измерение как при сверхнизких температурах, так и при температурах, превышающих 400°C , в широком диапазоне давлений, жидкостей и газов с разнообразными химическими и физическими свойствами (агрессивные, взрывоопасные, непроводящие и проводящие, и т.п.). Именно поэтому расходометрия отличается чрезвычайно большим многообразием методов и средств измерения. Наиболее универсальным методом, с нашей точки зрения, является ультразвуковой метод измерения расхода. Ультразвуковая расходометрия – сравнительно молодое направление, так как серийный выпуск ультразвуковых расходомеров в России был освоен только в 90-х г. прошлого столетия, выпускаемые приборы имели узкую область применения: измерение расхода воды в трубопроводах большого диаметра (с условным диаметром $400\ldots1200$ мм).

Стремительное развитие электронной и микропроцессорной техники позволило существенно расширить область применения ультразвуковых расходомеров (УЗР), расширить функциональные возможности, улучшить метрологические характеристики, снизить цену приборов, улучшив их конкурентную способность [14, 15].

Целью настоящего пособия является обзор существующих ультразвуковых методов измерения расхода (УЗМИ) [10, 14, 15], построение обобщённой метрологической модели ультразвуковых расходомеров и анализ их погрешности. Наибольшее вниманиеделено современным методам измерения времён распространения ультразвуковых сигналов (УЗС) и конструктивным особенностям первичным преобразователям расходомера. Отметим, что, существующая на сегодняшний день научно-техническая литература по УЗМИ, носит либо узконаправленный характер (в основном, это научные статьи), либо имеет рекламный характер, с поверхностным изложением проблем и задач расходометрии. Излагаемый материал частично устраняет указанные пробелы, будет полезен студентам для более глубокого изучения дисциплины «Измерение расхода жидкости и газов» и необходим для выполнения лабораторных работ, приведенных в практической части пособия.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Основные понятия и определения в расходометрии

Предметом нашего изучения являются методы и средства измерения количества и расхода жидкости. Остановимся кратко на основных понятиях. **Количество жидкости (газа¹)** – это **масса или объём жидкости**, прошедший через сечение трубопровода. Масса, как мера количества, не зависит ни от температуры, ни от давления среды, т.е. является инвариантной величиной по отношению к указанным параметрам измеряемой среды [1, 7].

Однако в большинстве средств измерений расхода количество жидкости выражается в единицах объёма, и, в случае необходимости, данный объём пересчитывается в массу, через расчётное или специально измеренное значение плотности ρ жидкости (газа) [1]:

$$m = \rho \cdot V, \quad (1.1.1)$$

где V – объём жидкости или газа, м^3 .

Под **расходом жидкости** в расходометрии понимают количество жидкости, прошедшей через трубопровод за единицу времени, и поэтому различают **массовый** и **объёмный** расходы [1], единицы измерения которых, соответственно, кг/с и $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q = \frac{V(\Delta t)}{\Delta t}. \quad (1.1.2)$$

Определение: приборы, измеряющие **количество** жидкости, называются **счётчиками**, а приборы, измеряющие **расход** – **расходомерами** [7].

Как правило, все расходомеры имеют функцию измерения количества, и в этом случае их часто называют «расходомер-счётчик».

Принцип действия многих расходомеров основан на измерении скорости движения жидкости.

¹ С точки зрения гидродинамики движение жидкостей и газов, при скоростях много меньших скорости распространения в них звука описывается одними и теми же законами. Кроме того, принцип действия ряда расходомеров таков, что они с одинаковым успехом могут применяться как для жидкостей, так и для газов. Поэтому в дальнейшем, если не будут сделаны специальные оговорки, мы будем использовать термин «жидкость», полагая, что приведённые рассуждения справедливы и для газа [1].

Связь скорости жидкости с её расходом определяется следующим очевидным соотношением [7]:

$$Q = \int_S v_{ds} ds = v_s \cdot S, \quad (1.1.3)$$

где v_{ds} – скорость жидкости через элементарную площадку поперечного сечения трубопровода ds (нормальная к площадке составляющая скорости); v_s – средняя по сечению скорость жидкости; S – площадь поперечного сечения трубопровода.

Здесь и далее мы не будем рассматривать **безнапорные трубопроводы**, когда жидкость течёт неполным сечением трубопровода, например, самотёк воды в канализационных трубопроводах.

Следует отметить, что распределение скорости жидкости по сечению трубопровода – существенно не равномерное, и это распределение (эпюра скоростей) зависит от гидродинамических характеристик подводящего трубопровода и характера течения жидкости. Большинство типов расходомеров не может обеспечить точного интегрирования скорости жидкости² по сечению трубопровода согласно (1.1.3), что приводит к влиянию эпюры скоростей на результат измерения [7]. Возникающую при этом погрешность обычно называют **гидродинамической погрешностью измерения**.

Приведем основные метрологические характеристики расходомеров и счётчиков жидкости (газа), принятые для оценки их точности:

- **диапазон измерения R** , в котором определены погрешности прибора и в котором эксплуатация прибора является легитимной; диапазон выражается через отношение максимального расхода Q_3 к минимальному Q_1 : $R = Q_3/Q_1$, кроме того могут быть промежуточные (переходные) расходы, например, $Q_2 = 1,6Q_1$; $Q_t = 1,6Q_2$.
- **пределы относительной погрешности** измерения (нормировать абсолютную погрешность измерения не имеет смысла для счётчиков); для каждой области диапазона измерения устанавливаются свои предельные значения погрешности. Например, для счётчиков воды класса «С» [6] устанавливается диапазон $R = 250$, причём в области расходов $Q_t > Q \geq Q_3$ погрешность не должна превосходить

² Укажем некоторые типы расходомеров, для которых можно пренебречь гидродинамической погрешностью: кориолисовы, турбопоршневые и идеальные электромагнитные расходомеры (последние, в силу сложности их реализации не нашли практического применения).

$\pm 1\%$, в диапазоне $Q_2 > Q \geq Q_t$, погрешность не более $\pm 2\%$, и для расходов $Q_1 > Q \geq Q_2$, погрешность – не более $\pm 5\%$.

- В ряде случаев пределы допускаемой погрешности расходомеров могут задаваться формулой [8] (без указания диапазона измерения), например, для расходомеров класса 1 (используемых в составе теплосчётчиков):

$$\delta \leq \pm \left(1 + 0,001 \frac{Q_3}{Q} \right), \%$$

но не более 5% [2].

Качество расходомеров, их достоинства и недостатки во многом определяются их **эксплуатационными характеристиками** (ЭХ). Кроме обычных ЭХ, присущих всем измерительным приборам (диапазоны изменения параметров окружающей среды (температуры, давления, влажности и др.), надёжность, срок службы, степень защиты от внешних воздействий и т.п.), расходомерам присущи специфические ЭХ. Отметим следующие из них:

- потери давления на первичном преобразователе расходомера (ППР);
- минимально допустимые длины прямых участков перед и после ППР, необходимые для стабилизации эпюры скоростей в трубопроводе и уменьшения гидродинамической погрешности до допустимых значений. Длины прямых участков выражаются в условных диаметрах трубопровода. Их значения зависят от типа местного гидравлического сопротивления. Например, в технической документации может быть определено следующее требование «для местного сопротивления в виде колена длина прямого участка до ППР должна быть не менее 10 Ду, а после ППР – не менее 3 Ду».

Примечания:

1. Колено – это изгиб трубопровода под углом 90° ; Ду – условный диаметр, м.
2. Актуальность минимизации потерь давления очевидна: потери давления приводят к увеличению затрат энергии на транспортировку жидкости или газа.
3. Использование расходомеров, требующих большие длины прямых участков, может быть проблематичным на ряде промышленных объектов, на которых трубопроводы, из-за особенностей технологии, не имеют прямых участков, а изменение конфигурации трубопроводов требует больших затрат на строительство.

1.2. Проверка расходомеров и счётчиков количества

1.2.1. Общие положения

Основная задача при разработке, производстве и эксплуатации средств измерения (СИ) – это обеспечение единства измерения [5]. Важной составляющей при этом является **первичная и периодическая поверка СИ** [3]. В процессе поверки проверяются характеристики СИ и их соответствие характеристикам, заявленным в технической документации.

Проверка СИ проводится в соответствии с утверждёнными методиками поверки, в которых определены порядок, методы и средства поверки, содержание и требования к выполнению операций поверки, обработке и оформлению результатов поверки [3].

Основным средством поверки являются эталоны [4]. По своему смыслу эталон – это *мера* [8]. Его назначение – хранить и воспроизвести физическую величину заданного размера. С помощью эталонов производится передача единицы измерения от эталона наивысшей точности к эталонам и средствам измерения низшей точности. Физическая сущность **первичных эталонов**, их конструкция и принцип действия во многих случаях вытекают из **определения единицы физической величины**, которую они воспроизводят. Понятие «эталон» определено стандартом [4]. Ниже курсивом приведены выписки из данного стандарта:

1. Эталоны единиц величин *предназначены для воспроизведения, хранения и передачи единиц величин и (или) шкал величин (шкал измерений) (далее – единицы величин).*
2. *Передачу единиц величин от государственных первичных эталонов средствам измерений осуществляют непосредственно или через совокупность иерархически подчинённых эталонов единиц величин различного уровня точности, обеспечивая тем самым «прослеживаемость» измерений на всех уровнях передачи единиц величин сверху донизу.*

В тоже время следует обратить внимание на следующее уточнение, сделанное в данном стандарте [4]:

5.3 В состав эталонов единиц величин включают основные технические средства, в том числе средства измерений, при помощи которых:

- воспроизводят и (*или*) хранят единицу величины;
- осуществляют передачу единицы величины;
- контролируют условия измерений и неизменность хранимой единицы величины (это приборы, которые контролируют нормальные условия поверки: температуру и давление воздуха, влажность, вибрации, электромагнитные поля и т.п.).

То есть, совсем не обязательно этalon должен **воспроизвести** единицу величины, достаточно, чтобы с помощью него можно было **хранить и передавать** её значение [4]. Например, не существует эталона, воспроизводящего скорость движения автомобиля, но существуют технические средства (эталоны) с помощью которых могут быть поверены автомобильные спидометры. Для нас данное замечание принципиально, так как во многих случаях **калибровка** [5] и **проверка расходомеров** и счётчиков производится **косвенным методом** (так называемая имитационная поверка), при которой не воспроизводится никакого потока жидкости (газа) через ППР (именно поэтому её называют также – беспроливной поверкой). В большинстве случаев, исходя из экономических соображений, расходомеры с условным диаметром выше 200 ... 300 мм калибруются и поверяются косвенным методом, так как расходомерные установки, реализующие проливной метод поверки на большие расходы (и диаметры), являются весьма дорогостоящими техническими устройствами.

1.2.2. Типовая схема и принцип действия расходомерной установки

Расходомерные установки, как правило, являются эталонами массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов. Схема установки приведена на [рис. 1.2.1](#).

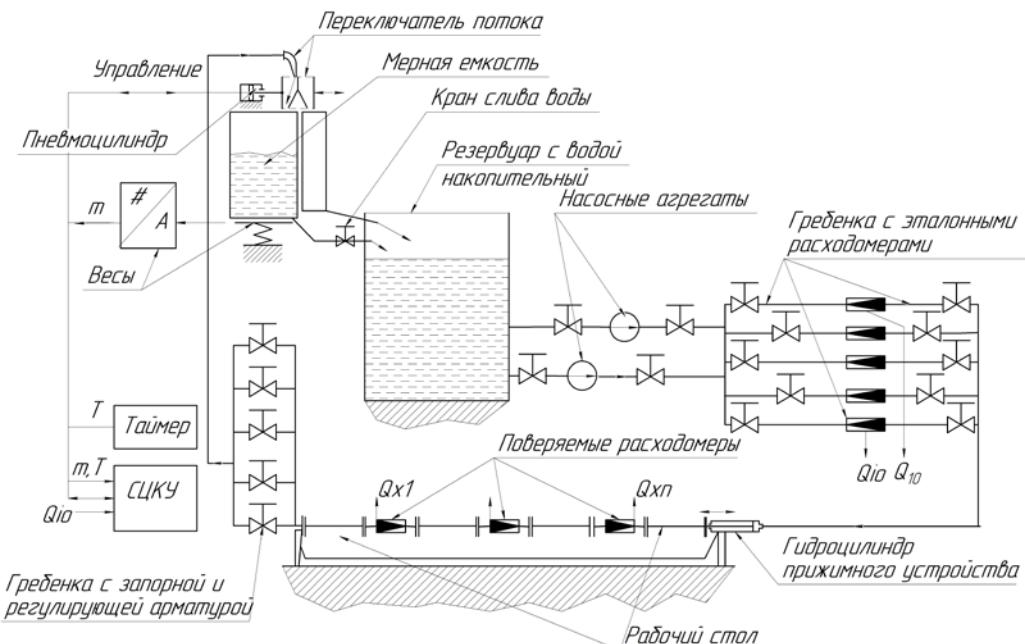


Рис. 1.2.1. Упрощенная гидравлическая схема расходомерной установки

СЦКУ – система централизованного контроля и управления. Обозначения информационных сигналов:

m – показание весов (масса воды в мерном баке); T – показание таймера, т.е. – время измерения расхода (объема); Q_{x1}, Q_{xn} – показания по расходу поверяемых расходомеров 1-го, 2-го ... n -го;

Q_{i0} – показания по расходу эталонных расходомеров: $i = 1, 2 \dots m$; (m – число эталонных расходомеров). Переключатель потока находится в положении «измерение».

Принцип действия расходомерной установки (РУ) вытекает из определения величин объёмного (Q) и массового (G) расходов жидкости в трубопроводах:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}; \quad (1.2.1)$$

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (1.2.2)$$

где ΔV , Δm – объём и масса жидкости, протекшей через расходомер (счётчик) за время Δt .

Таким образом, чтобы воспроизвести единицу расхода, необходимо:

- создать в трубопроводах установки и расходомерах стабильный (неизменный во времени) поток жидкости;
- на определённое (заданное оператором) время Δt направить эту жидкость в мерную ёмкость;
- измерить время заполнения мерной ёмкости Δt и количество жидкости в этой ёмкости (Δm или ΔV);
- рассчитать объёмный (или массовый) расходы согласно формулам (1.2.1), (1.2.2).

При построении РУ учитываются требования к её универсальности: установка должна обеспечивать поверку широкого ассортимента расходомеров, различающихся как внутренними диаметрами, например, от 50 мм до 300 мм, так и давлениями воды. Для этих расходомеров насосы должны обеспечивать регулируемые и стабильные значения расходов (для указанных типоразмеров желательно иметь расходы в диапазоне от 0,1 м³/ч до 3000 м³/ч, но обычно ограничиваются расходом 1000 м³/ч). Чтобы оценить техническую сложность такой расходомерной установки отметим, что суммарная мощность насосов, для обеспечения указанного расхода, должна составлять около 300 кВт.

Рассмотрим принцип действия РУ. Согласно приведённой на [рис. 1.2.1](#) схеме РУ, после включения насосов вода циркулирует по следующей замкнутой гидравлической цепи: через **гребёнку эталонных расходомеров** ([рис. 1.2.2](#)) вода поступает на **рабочий стол** (пример рабочего стола на [фото рис. 1.2.3](#)) и протекает через проверяемые расходомеры, установленные на этом столе. Далее вода поступает на **гребёнку с запорной и регулирующей арматурой**, на [рис. 1.2.1](#) – это затворы, установленные на основном трубопроводе (Ду300, т.е. 300 мм), и затворы, установленные на байпасах (затворы малого диаметра). После затворов вода поступает на **переключатель потока** (детальное изображение [рис. 1.2.4](#)), который в «холостом» режиме (при настройке и проверке работы РУ) сдвинут влево и направляет воду в **накопительный резервуар**, из которого и происходит питание всей гидравлической системы.

Чтобы произвести точное измерение установленного в расходомерной установке расхода, переключатель потока быстро перемещают в противоположное положение (на [рис. 1.2.1](#) – вправо), и одновременно с этим включают таймер (измеритель интервалов времени) и инициируют счёт количества жидкости поверямыми расходомерами. При этом вода направляется в мерную ёмкость. После заданного времени измерения (определяемого оператором, осуществляющим поверку) переключатель потока перемещается в исходное состояние, вода вновь поступает в накопительный резервуар, минуя мерную ёмкость, счет времени таймером и счёт количества жидкости расходомерами – останавливаются. Масса воды в мерной ёмкости измеряется весами. Таким образом осуществляется измерение времени заполнения и количества жидкости в мерной ёмкости.

Информация об этих параметрах передается на компьютер системы централизованного контроля и управления (СЦКУ), в котором производится вычисление расхода по формулам³ [\(1.2.1\)](#), [\(1.2.2\)](#). В СЦКУ передаются также показания поверяемых расходомеров. Компьютерная программа, реализующая обработку результатов измерения, вычисляет погрешность измерения каждого поверяемого расходомера и представляет результаты поверки, как правило, в табличном виде.

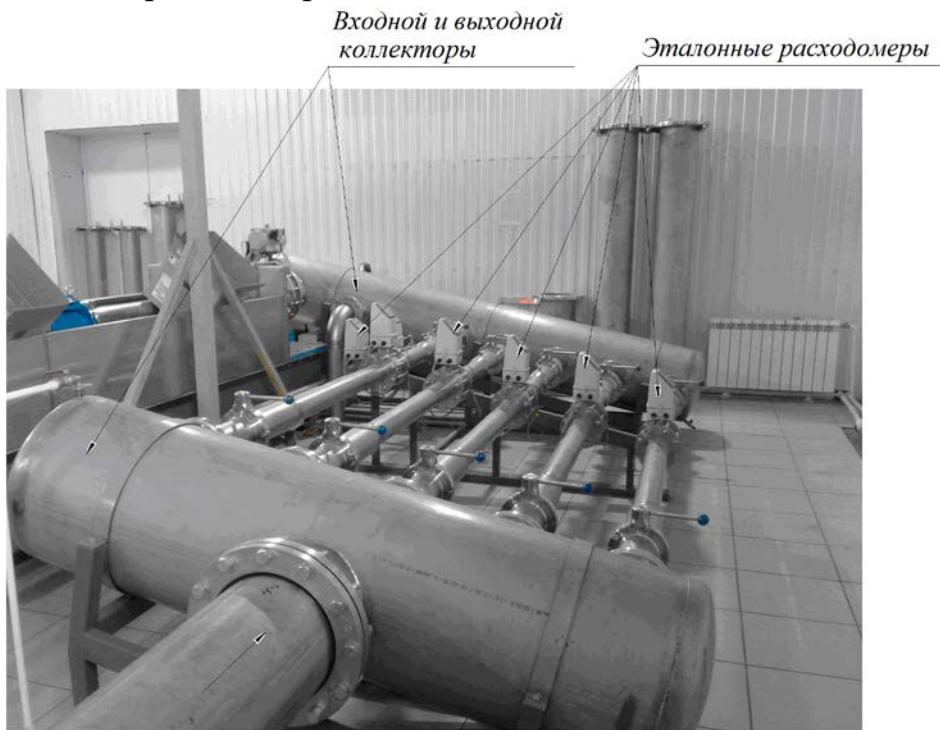


Рис. 1.2.2. Пример гребенки с эталонными расходомерами (расходомерная установка Тайфун 1000, ООО «Водомер» г. Мытищи)

³ Вычисление плотности воды производится по известной её зависимости от температуры. Информация о температуре передаётся в компьютер с термометров, установленных в трубопроводах РУ (на схеме – не показаны).

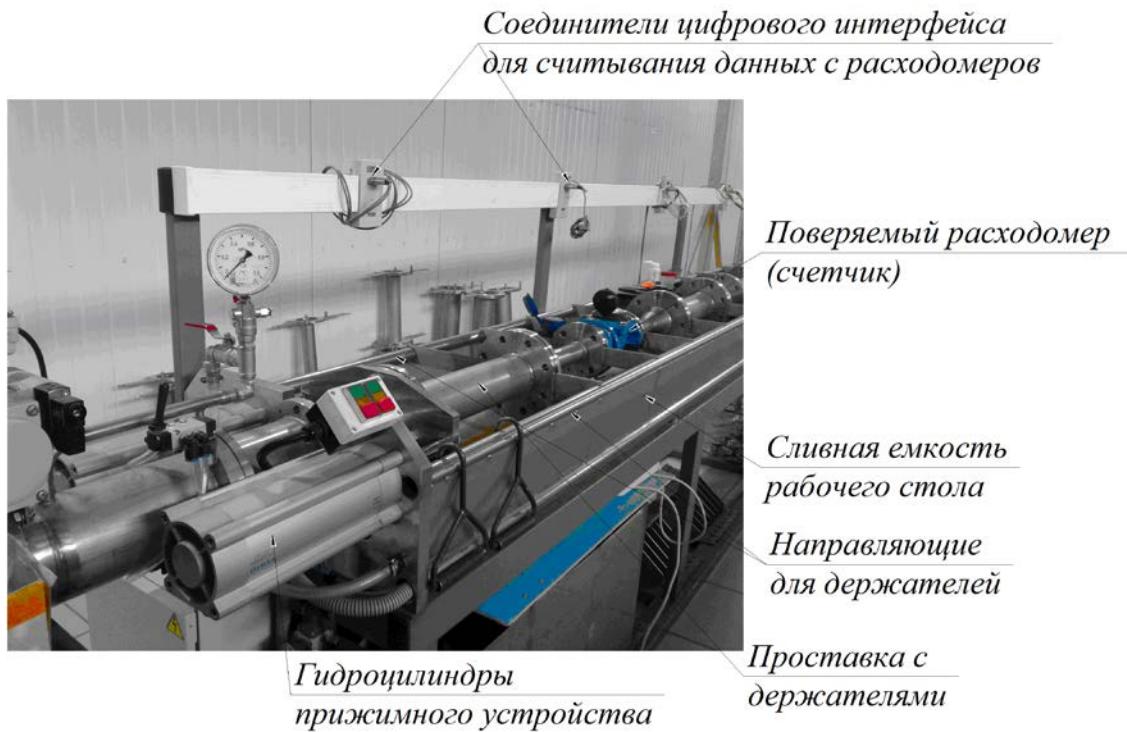


Рис. 1.2.3. Пример рабочего стола (расходомерная установка Тайфун 1000, ООО «Водомер» г. Мытищи)

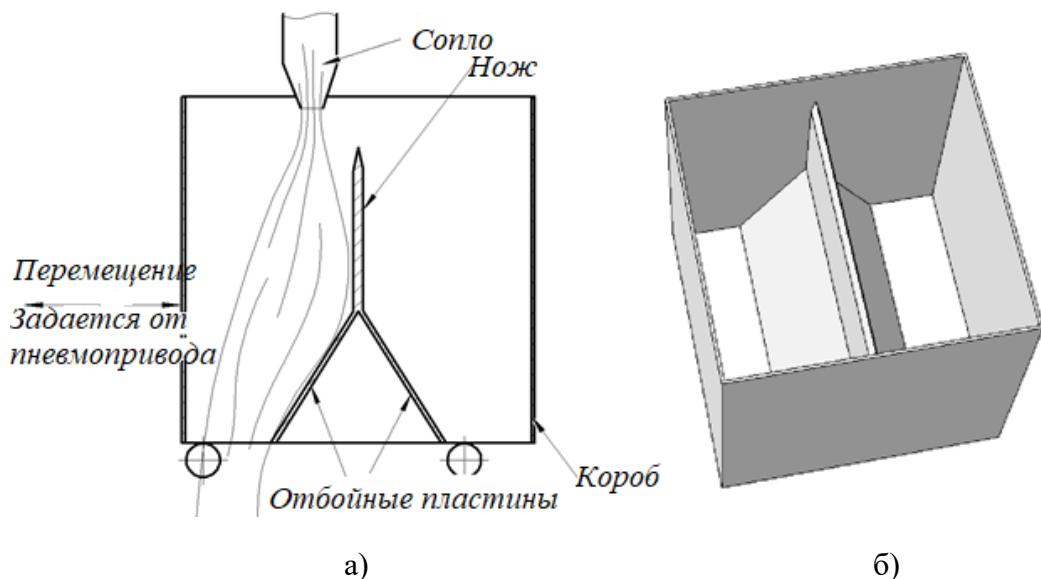


Рис. 1.2.4. Конструкция (а) и внешний вид переключателя потока (б)

Весовой метод обеспечивает наивысшую точность определения **эталонного** значения расхода, но трудно реализуем на больших расходах. Поэтому при поверке расходомеров и счётчиков с основной погрешностью 0,5 % и более в большинстве случаев используется **метод сличе-**

ния [8]. При этом методе эталонное значение расхода определяется по показаниям высокоточных расходомеров, расположенных в так называемой «гребёнке», реализующей выборочное параллельное соединение этих расходомеров. В результате измерение большого расхода в установке может быть обеспечено несколькими расходомерами среднего диаметра. Эти приборы работают в узком диапазоне расходов (близких к максимальному), контроль их точности периодически подтверждается весовым методом на самой РУ, и это обеспечивает высокую точность определения эталонного значения расхода.

1.2.3. Автоматизация процесса поверки

Для повышения производительности расходомерных установок (т.е. для уменьшения времени на поверку одного расходомера), обеспечения безопасности и надёжности их работы ряд поверочных операций производится в автоматическом режиме. Это, прежде всего:

- автоматическое считывание показаний с измерительных приборов, входящих в состав эталона: время измерения, масса жидкости в мерной ёмкости, температура жидкости, показания эталонных расходомеров. Кроме того, считывание показаний с вспомогательных приборов, определяющих условия поверки (температура наружного воздуха, давление, влажность);
- считывание результатов измерения с поверяемых расходомеров (объём жидкости, прошедший за время измерения);
- вычисление в каждой поверочной точке погрешности измерения и формирование протокола поверки.

Для автоматизации требуется, чтобы поверяемые приборы имели внешний интерфейс, совместимый с линиями связи РУ. В ряде случаев поверяемое СИ не имеет требуемого интерфейса (например, механические счётчики жидкости, как правило, снабжены только визуальными отсчётными устройствами и не имеют электронных выходных преобразователей). Для поверки таких приборов используются специальные адаптеры, преобразующие изменения показаний прибора в электрический сигнал. Например, все механические турбинные счетчики снабжаются, так называемой, «звездочкой» [6], скорость вращения которой равна (пропорциональна) скорости вращения «турбинки» (а, следовательно, и расходу жидкости). Адаптер для таких счётчиков содержит оптоэлектронную пару, модуляция светового потока в этой паре кон-

цами звёздочки приводит к формированию электрических импульсов. В результате количество импульсов будет пропорционально измеренному объёму жидкости.

1.3. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые расходомеры (УЗР) [10, 11, 13] – это современные, динамично развивающиеся электронные средства измерения расхода, их отличает высокая универсальность: они способны измерять расход разнообразных жидкостей, в широком диапазоне температур и давлений, как в трубопроводах малого диаметра (5…10 мм), так и в трубопроводах сверхбольших размеров (3000 мм и более). Отсутствие подвижных частей в УЗР обеспечивает их высокую надёжность, возможность излучения и приёма ультразвуковых сигналов через стенки трубопровода делает эти приборы незаменимыми для экспресс-исследований разнообразных технологических процессов, связанных с транспортировкой жидкости.

1.3.1. Обобщённый принцип работы УЗР

Различают два основных ультразвуковых метода измерения расхода: **времяимпульсный** (за рубежом он получил название «время-пролётный», «Time-of-Flight» или «Transit-Time») и **доплеровский**. Принцип действия доплеровских расходомеров основан на эффекте Доплера: частота сигналов, рассеянных неоднородностями в жидкости, движущимися вместе с потоком, зависит от скорости их движения [7]. Разность частот опорного (излучаемого) УЗС – f_0 и рассеянного (принимаемого) УЗС – f_p в этих расходомерах пропорциональна скорости жидкости $\Delta f_d = f_p - f_0 = f_0 \cdot v / (c - v)$, где c – скорость ультразвука в жидкости, v – жидкости. Эту разность частот принято называть доплеровским смещением частоты.

Для коммерческого учёта расхода жидкостей доплеровские расходомеры не нашли широкого применения, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только времяимпульсный метод, получивший в расходометрии наибольшее распространение [9, 10, 12]. Он основан на измерении **разности времен** распространения ультразвуковых сигналов, излучаемых по потоку и против потока жидкости. На [рисунке 1.3.1](#) изображена обобщённая схема этого типа УЗР [7].

В этих расходомерах пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП⁴) установлены вдоль оси или под углом к оси трубопровода (как показано на [рис. 1.3.1](#)). Формирователь импульсов (ФИ), под действием управляющего сигнала из контроллера, формирует электрические импульсы, которые через коммутатор поочередно поступают то на ПЭП1, то на ПЭП2. Пьезоэлектрические преобразователи преобразуют электрические сигналы в механические колебания, поэтому с поверхности ПЭП, контактирующей с жидкостью (или другой упругой средой), излучается ультразвуковая волна (**УЗВ**).

В первом приближении, данную волну можно считать плоской, и она распространяется практически по прямой линии (как луч света). Пройдя через жидкость и достигнув противоположного ПЭП, волна (а точнее, колебания давления жидкости) преобразуется в электрический сигнал. Приёмное устройство, также подключённое к ПЭП через коммутатор, формирует из принятых сигналов, прошедших через жидкость, сигналы «СТОП».

При движении в жидкости скорость УЗВ – C складывается векторно со скоростью жидкости⁵. Это приводит к изменению времени распространения сигналов. Сигналы против потока движутся медленнее, а сигналы по потоку – быстрее. В результате, интервалы времени между импульсами «СТАРТ» и «СТОП» для сигналов по потоку жидкости – $T1$ будут меньше, чем для сигналов против потока $T2$ [\[7\]](#):

$$T1 = \frac{La}{C + v_l \cdot \cos(\alpha)} + \frac{L_k}{C}, \quad (1.3.1)$$

$$T2 = \frac{La}{C - v_l \cdot \cos(\alpha)} + \frac{L_k}{C}, \quad (1.3.2)$$

где $T1$, $T2$ – времена распространения ультразвуковых сигналов по и против потока; La – активная база – часть пути ультразвукового сигнала, на котором скорость жидкости отлична от нуля ([рис. 1.3.1](#)); $L_{\text{ПП}}$ – расстояние между поверхностями ПЭП; C – скорость ультразвука (УЗ) в неподвижной жидкости; v_l – средняя скорость жидкости (продольная составляющая) вдоль луча УЗВ; L_k – длина пути УЗ в карманах ПЭП (в положениях, образованных гнёздами ПЭП); α – угол распространения УЗВ в трубопроводе.

⁴ Принцип действия, конструкция и теория пьезоэлектрических преобразователей кратко рассмотрены в разделах 1.3.3 и 1.5.

⁵ Ультразвуковая волна смещается вместе с жидкостью, как например, плывущие в ней предметы, поэтому относительно неподвижных ПЭП их скорости складываются.

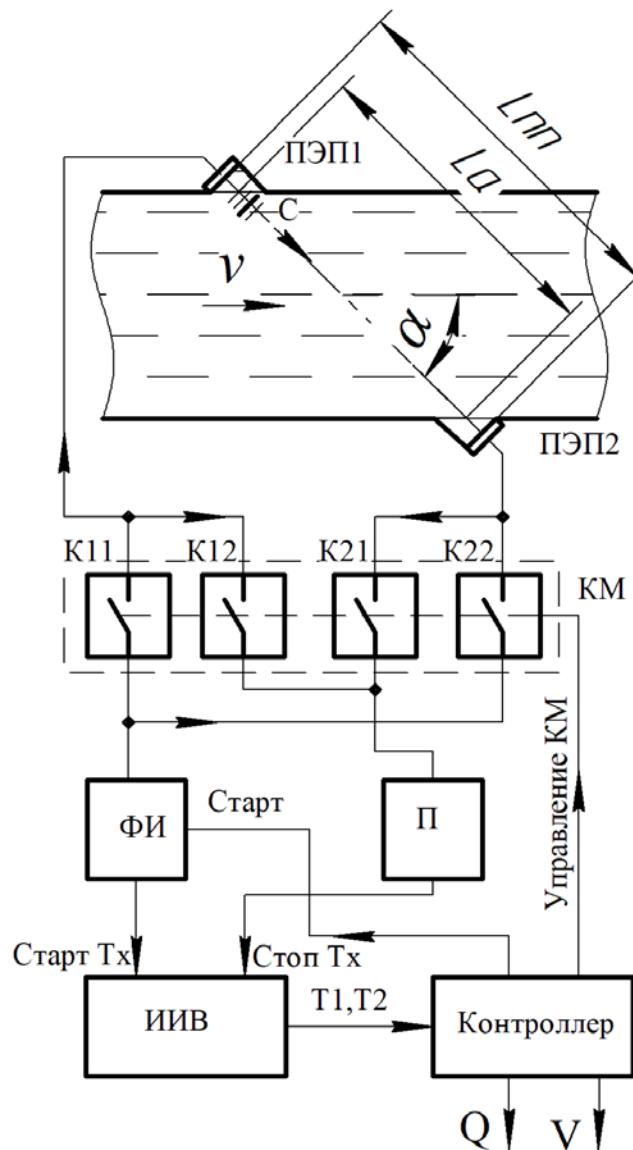


Рис. 1.3.1. Обобщенная схема времяимпульсного УЗР

Обозначения на рисунке: ПЭП1,2 – пьезоэлектрические преобразователи; КМ – коммутатор сигналов; ФИ – формирователь излучаемых импульсов; П – приемное устройство; ИИВ – измеритель интервалов времени. Вектор скорости потока обозначен стрелкой V

Разность времен распространения, как следует из (1.3.1) и (1.3.2) будет пропорциональна скорости и расходу жидкости. Таким образом, УЗР являются преобразователями расхода в разность времён распространения $\Delta T = T2 - T1 = f(Q)$.

$$\Delta T = \frac{2La \cdot \cos\alpha}{c^2 - (v_l \cdot \cos\alpha)^2} v_l, \quad (1.3.3)$$

Функция преобразования (ФП) в виде выражения (1.3.3) имеет один важный недостаток: выходная величина сильно зависит от неин-

формативного параметра: скорости УЗ – C . Для устранения этой зависимости вычислительными средствами расходомера, разность времён делится на произведение времён $T1 \cdot T2 \cong \frac{L_{\text{пп}}^2}{C^2}$; в результате деления функция преобразования УЗР приобретает вид, инвариантный по отношению к скорости ультразвука C :

$$\frac{\Delta T}{T1 \cdot T2} = \frac{2L_a \cdot \cos\alpha}{L_{\text{пп}}^2} \nu_l. \quad (1.3.4)$$

Ещё раз отметим, что в УЗР разность времён формируется в узкой зоне ультразвукового луча и несёт информацию **о средней скорости жидкости вдоль этого луча**. Напомним, что расход жидкости определяется средней скоростью по сечению трубопровода – ν_s . Связь между этими скоростями определяется коэффициентом гидродинамической поправки: $\nu_l = K_r \nu_s = K_r \frac{4Q}{\pi D^2}$.

Подставив это выражение в формулу (1.3.4), окончательно получим следующую ФП:

$$\frac{\Delta T}{T1 \cdot T2} = \frac{8K_r L_a \cdot \cos\alpha}{\pi D^2 L_{\text{пп}}^2} Q. \quad (1.3.5)$$

Таким образом, микропроцессорное устройство (контроллер) расходомера, получив от ИИВ информацию о временах распространения $T1$ и $T2$, может вычислить значение измеряемого расхода. Очевидно, что вычисление производится согласно калибровочной функции – обратной функции преобразования:

$$Q = \frac{\pi D^2 L_{\text{пп}}^2}{8K_r L_a \cdot \cos\alpha} \cdot \frac{\Delta T}{T1 \cdot T2}. \quad (1.3.6)$$

Причём первая дробь в формуле (1.3.6) является постоянным коэффициентом, в расходометрии такой коэффициент (для ряда расходомеров) называют коэффициентом расхода K_Q . Значение K_Q может быть определено экспериментально, с использованием расходомерной установки, а может быть определено расчётным путем, по результатам обмера геометрических параметров первичного преобразователя. Последний способ определения коэффициента расхода получил название **«косвенная калибровка»**.

1.3.2. Общий анализ погрешности ультразвукового метода

Расход в формуле (1.3.6) можно рассматривать как результат косвенных измерений [8]. В этом случае оценку погрешности измерения можно определить, задав вариацию величинам в правой части этой формулы. Для получения относительной погрешности измерения удобно воспользоваться логарифмическим дифференциалом для функции нескольких переменных:

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta K_Q}{K_Q} - \frac{2\Delta T_{1,2}}{T_{1,2}} + \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}, \quad (1.3.7)$$

где $\frac{\Delta K_Q}{K_Q} = 2\delta_D + 2\delta_{L_{\text{пп}}} - \delta_{K_{\Gamma}} - \delta_{L_a} + \text{tg}(\alpha) \cdot \Delta\alpha$ – относительная погрешность определения коэффициента расхода (погрешность косвенной калибровки); δ_D , $\delta_{L_{\text{пп}}}$, δ_{L_a} – относительные погрешности измерения внутреннего диаметра трубопровода (проточной части расходометра), расстояния $L_{\text{пп}}$, и активной базы L_a соответственно; $\Delta\alpha$ – абсолютная погрешность измерения угла наклона оси ПЭП, рад; $\delta_{K_{\Gamma}}$ – гидродинамическая погрешность (погрешность определения коэффициента K_{Γ}); $\frac{\Delta T_{1,2}}{T_{1,2}}$ – относительная погрешность измерения времён распространения УЗС; $\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}$ – относительная погрешность измерения разности времён распространения УЗС.

Знаки сложения и вычитания в формуле (1.3.7) условны и указывают на то, что это композиция случайных величин, а их сложение должно производиться по известным законам теории вероятностей, например, для 100 % достоверности полученной погрешности необходимо арифметическое суммирование составляющих погрешности по модулю. Исключение составляет величина L_a , которая однозначно определяется диаметром – D , углом – α и смещением оси ПЭП относительно стенки трубопровода – X . В УЗР с одним акустическим каналом ось ПЭП располагают по центру трубы, т.е. смещение $X = D/2$.

Из формулы (1.3.7) следует, что основными источниками погрешностей УЗР являются:

- **гидродинамическая погрешность** $\delta_{K_{\Gamma}}$, причиной которой является неопределенность эпюры скоростей (распределение скоростей жидкости по сечению проточной части расходометра), и как след-

ствие, неопределенность коэффициента гидродинамической поправки – K_{Γ} ; пути устранения данной погрешности рассмотрены в [разделе 1.3.3](#);

- **погрешности измерения геометрических параметров ППР** при косвенной калибровке;
- **погрешности измерителя времён распространения УЗС** δ_{T12} , $\delta_{\Delta T}$. Данная погрешность существенным образом зависит от используемого метода и схемы измерителя интервалов времени. Вопросы построения ИИВ рассмотрены в [разделе 1.4](#).

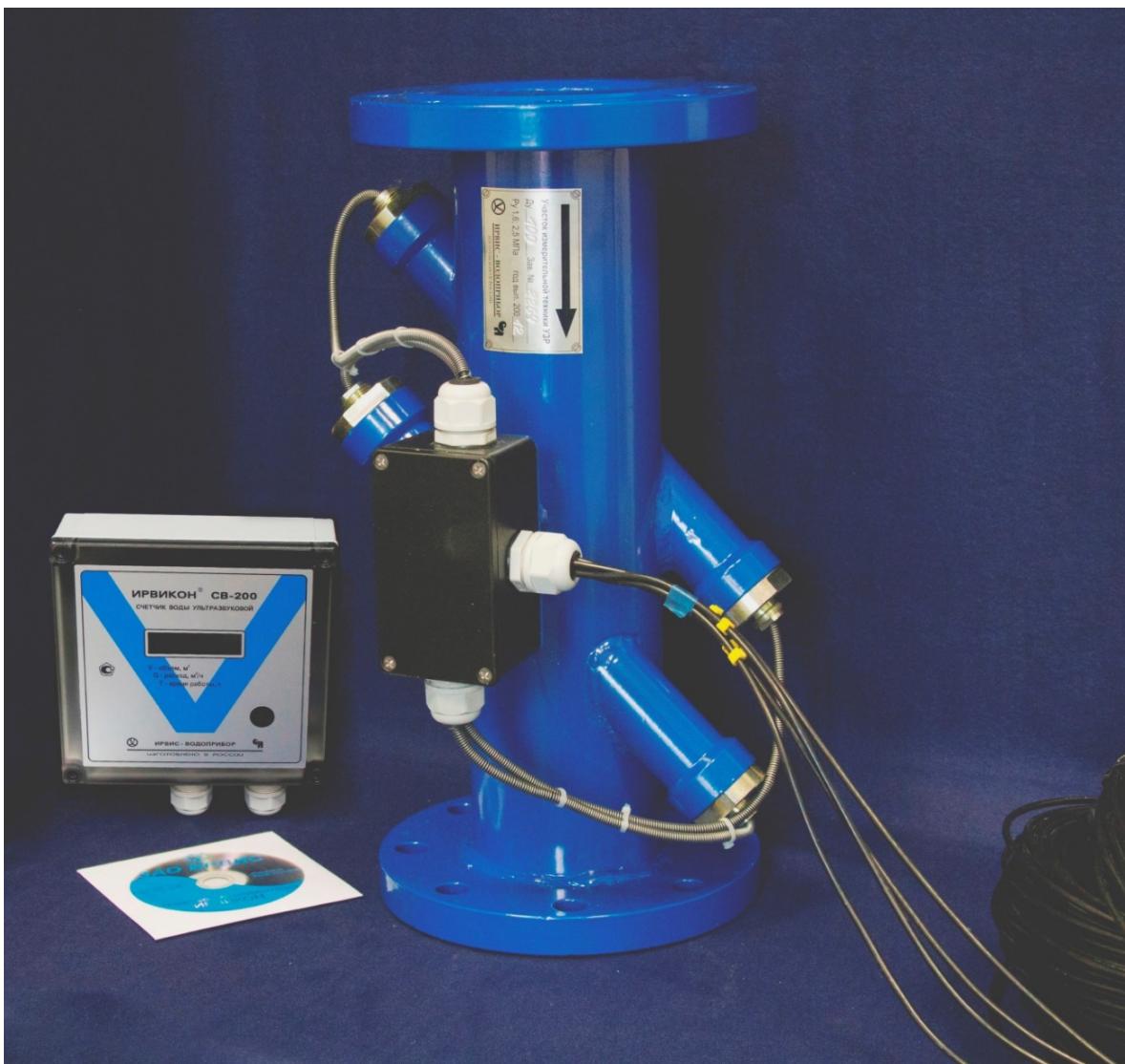
1.3.3. Первичные преобразователи расхода в УЗР

Первичные преобразователи расхода, используемые в ультразвуковых расходомерах, можно условно разделить на три типа: врезные, осевые и накладные (бесконтактные) [\[7, 11, 12\]](#).

Во врезных ППР пьезоэлектрические преобразователи устанавливаются под углом к оси проточной части в специальных гнёздах (схематично этот тип ППР представлен на [рис. 1.3.1](#)). Для уменьшения гидродинамической погрешности используют многолучевые УЗР [\[12\]](#): на патрубке ППР устанавливаются соосно несколько пар ПЭП. Каждая пара образует акустический канал измерения скорости жидкости вдоль оси ПЭП (луча ультразвука). Суммирование результатов измерения по образованным акустическим каналам позволяет произвести приближенное интегрирование эпюры скоростей жидкости и уменьшить влияние эпюры скоростей на результат измерения расхода.

На [рисунке 1.3.2](#) изображен внешний вид двухлучевого ППР. Патрубок этого ППР снабжен фланцами, для его герметичного монтажа в трубопроводную систему. Оси УЗ лучей (и противолежащих ПЭП) параллельны друг другу и смещены относительно стенки на половину внутреннего радиуса трубы ППР.

Подключение ПЭП к электронному блоку осуществляется с помощью клеммной коробки и комплекта сигнальных кабелей (4x75 м)). Для герметичного исполнения ППР, допускающего его затопление, клеммная коробка используется в качестве протяжной, т.е. кабели герметично заделаны в ПЭП и пропущены через коробку, чтобы образовать единый жгут для последующей защиты в металлическом кабеле.



**Рис. 1.3.2. Пример двухлучевого ППР
(в составе ультразвукового счетчика воды)**

Коаксиальный радиочастотный кабель позволяет вынести электронный блок из зоны возможного затопления ППР в помещение, удобное для обслуживания прибора и считывания из него накопленных данных.

В ультразвуковой расходометрии применяется и компактное исполнение, когда электронный блок располагается непосредственно на корпусе ППР. В этом случае приборы, как правило, имеют автономное питание и средства дистанционного считывания результатов измерения.

На [рисунке 1.3.3](#) изображен безфланцевый ППР. Он непосредственно врезается в трубопровод (посредством сварного соединения). Такое соединение – неразборное, и применимо только для трубопроводов большого диаметра (600 мм и более). Периодическая поверка таких УЗР производится косвенным методом, при этом геометриче-

ские параметры ППР считаются неизменными, и, как правило, не подвергаются повторным обмерам. Для обеспечения стабильности геометрических параметров на патрубок ППР привариваются ребра жёсткости. В наиболее ответственных случаях, для контроля состояния внутренних поверхностей трубопровода и патрубка ППР устраиваются герметичные люки-лазы.

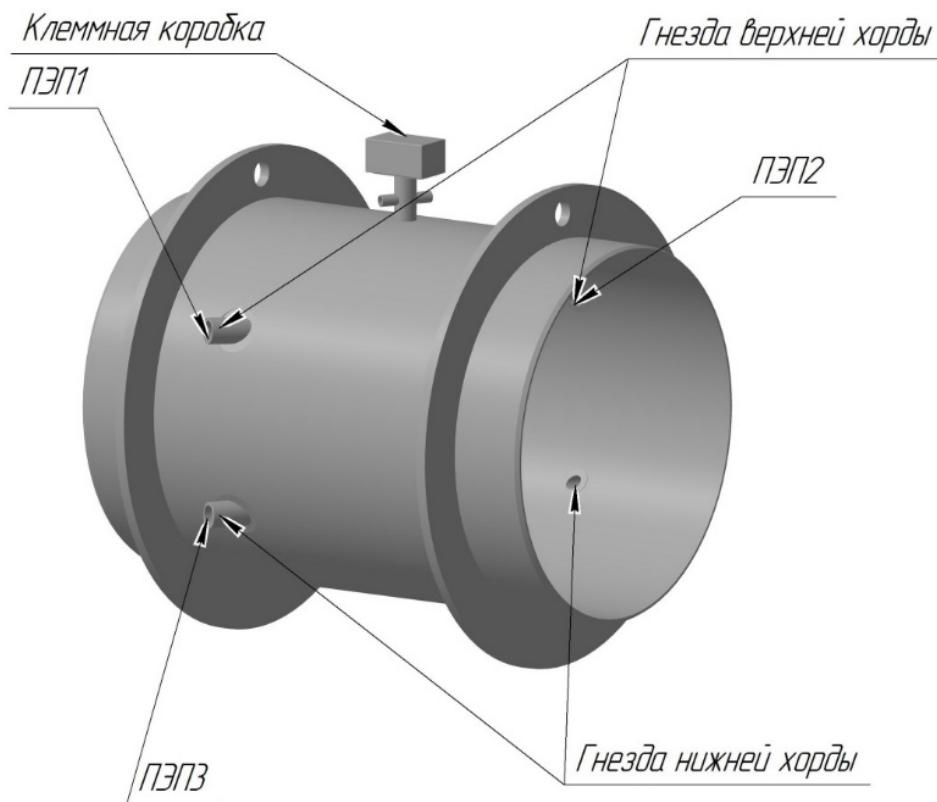
На [рисунке 1.3.4](#) изображена типовая конструкция осевого ППР для УЗР малого диаметра (от 15 до 40 мм)

Одним из достоинств ультразвукового метода измерения является возможность бесконтактного измерения расхода жидкости в трубопроводах [\[7, 11\]](#). В этих расходомерах ПЭП крепятся с наружной стороны трубопровода. Ультразвуковые волны проходят через клинообразный звукопровод, стенку трубопровода, измеряемую жидкость, противоположную стенку и попадают в звукопровод противоположного ПЭП ([рис. 1.3.5](#)).

Важными элементами ППР, является пьезоэлектрические преобразователи. Именно ПЭП во многом определяют метрологические характеристики и надёжность работы УЗР.

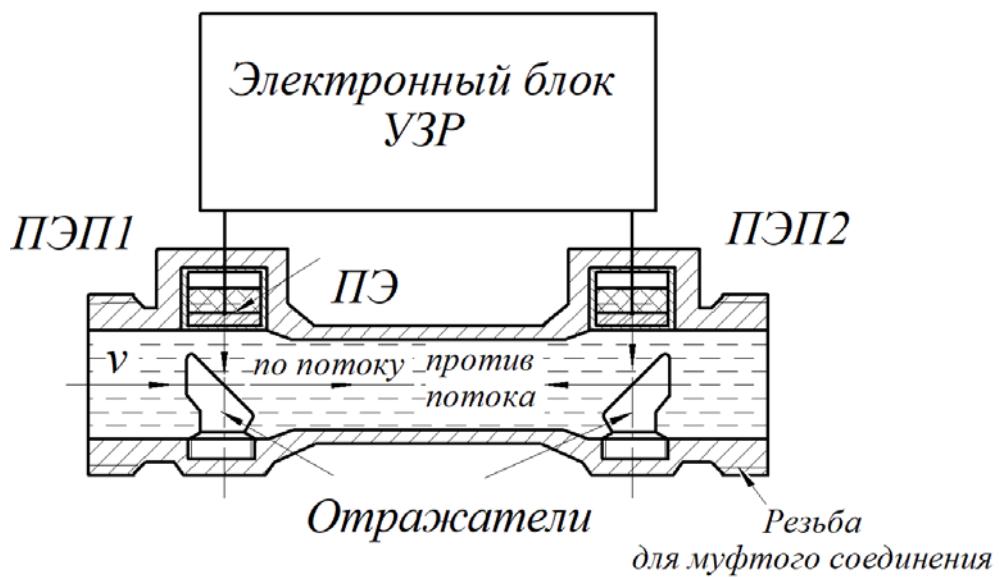
На [рисунке 1.3.6](#) представлена типовая конструкция пьезоэлектрических преобразователей, используемых в УЗР врезного типа. Приём и излучение УЗС осуществляется пьезоэлементом (ПЭ). ПЭ способен преобразовывать механические воздействия (например, колебательное давление в ультразвуковой волне) в электрический сигнал, и наоборот, электрические сигналы преобразовывать в механическое воздействие на окружающую среду, возбуждая в упругой среде звуковые волны. Объяснение пьезоэффекта и модель ПЭП более подробно рассмотрены в [разделе 1.5](#). Здесь отметим только, что в УЗР используют плоские ПЭ, совершающие колебания по толщине. С механической точки зрения, они являются полуволновыми вибраторами, а их колебания носят резонансный характер.

Для защиты от разрушающих воздействий окружающей среды ПЭ размещают в корпусе. При этом донышко корпуса (выполненного в виде стакана) выполняет дополнительно роль согласующего акустического слоя, с толщиной равной половине или четверти длины волны. Электрическое напряжение на ПЭ подаётся через серебряные электроды: один электрод контактирует с корпусом ПЭП, к другому электроду может быть припаян вывод, однако технологичнее и надёжнее электрический вывод припаивать к плоскому контакту, который прижимается к электроду ПЭ. Эффективная передача звуковой энергии через донышко стакан (мембрану) обеспечивается при «плотном» контакте ПЭ с мембраной.



Маркировка датчиков (ПЭП) приведена
для направления потока слева направо

**Рис. 1.3.3. Пример конструкции первичного преобразователя УЗР (ППР)
для трубопроводов большого диаметра (Ду 700 мм)**



**Рис. 1.3.4. Конструкция осевого ППР и схема распространения
в нём ультразвуковых волн**

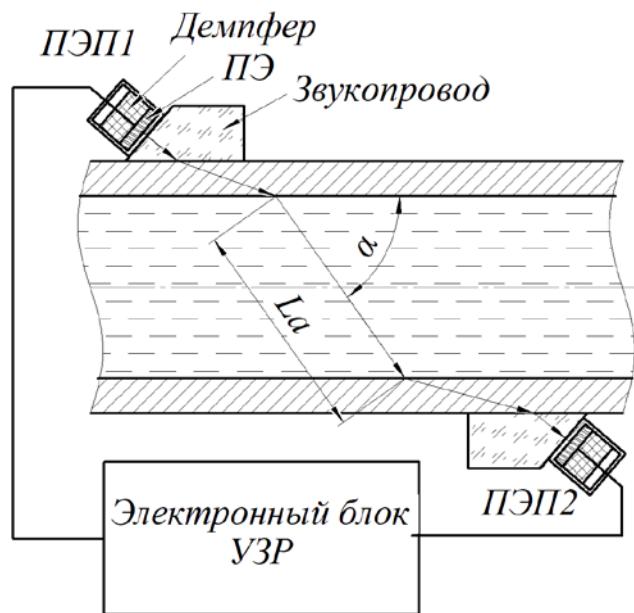


Рис. 1.3.5. Схема ультразвукового расходомера с накладными ПЭП

Ход лучей ультразвука (УЗВ) в накладных УЗР: на границах акустических сред: звукопровод (призма) – стенка – жидкость, происходит преломление УЗВ.

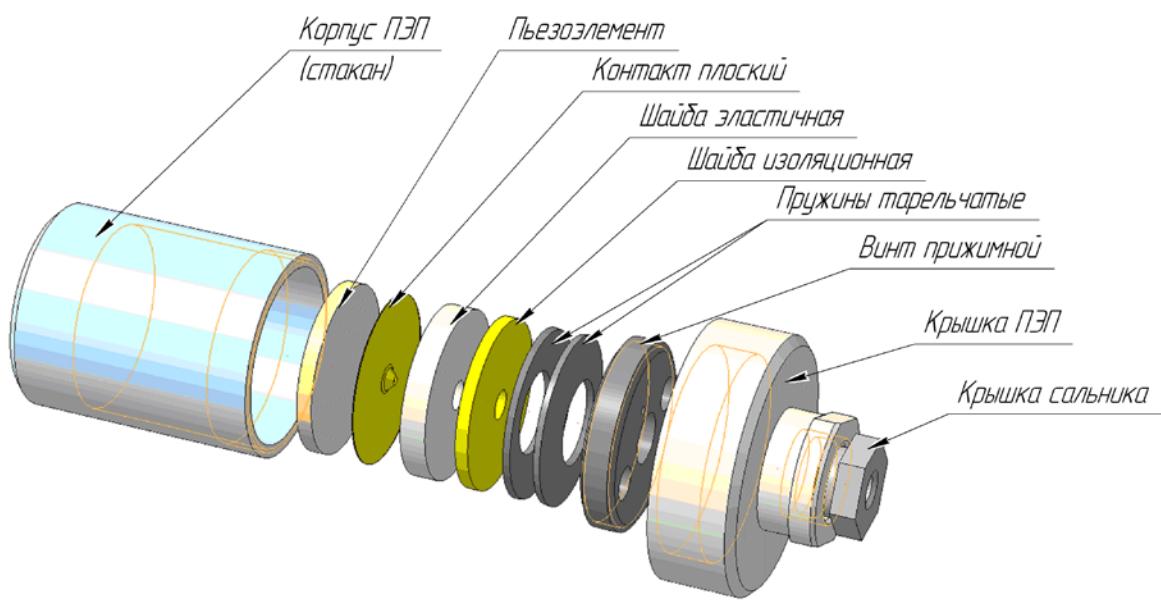


Рис. 1.3.6. ПЭП в разобранном виде (один из возможных вариантов конструктивного решения)

С этой целью контактирующие поверхности донышка и ПЭ тщательно обрабатывают, обеспечивая малую их шероховатость и отклонения от плоскостности, для устранения воздушной прослойки, ПЭ ставят на специальные смазки, приклеивают или припаивают к донышку. В ряде случаев с помощью винта и пружин создают значительные сжимающие силы, позволяющие уменьшить толщину контактного слоя.

Для изоляции сигнального электрода ПЭ от корпуса используют эластичную и изоляционную шайбы. Эластичная шайба дополнительно выполняет роль демпфера и позволяет равномерно распределить прижимное усилие по поверхности ПЭ. Пружины тарельчатые обеспечивают стабильность силы прижима ПЭ в процессе эксплуатации. Электрические сигналы передаются на ПЭП, как правило, с помощью радиочастотных кабелей, при этом экран кабеля припаивается к контакту внутри корпуса ПЭП, а центральная жила – к электрическому выводу от сигнального электрода.

Поскольку попадание влаги внутрь ПЭП не допустимо, ввод кабеля в ПЭП герметизируют с помощью сальникового уплотнения.

1.4. Методы измерения времён распространения УЗС в УЗР

Введение. Одной из проблем разработки высокоточных УЗР являются чрезвычайно высокие требования к точности измерения разности времён распространения. Как показывают расчёты (см. задачу № 1 и № 2 в разделе вопросы и задачи к лабораторной работе №2), разность времён распространения на нижнем пределе измерения (при скорости жидкости порядка 0,02...0,05 м/с) составляет 2–4 нс. Данная разность времён должна быть измерена с погрешностью не более $\pm 1\%$.

Таким образом, погрешность измерения разности времён не должна превосходить $(20\text{--}40) \cdot 10^{-12}$ с. Перечислим основные пути достижения указанной точности:

- обеспечение идентичности условий распространения УЗС по потоку и против потока жидкости, которая может быть охарактеризована **асимметрией** электроакустического и электронного трактов УЗР [18, 19]: т.е. ультразвуковых и электрических сигналов при излучении в прямом (по потоку) и обратном направлении при скорости жидкости равной 0; анализ асимметрии электроакустического тракта и методы её устранения рассматриваются в [разделе 1.5](#).
- формирование интервалов времени, соответствующих временам распространения УЗС. Проблема в том, что форма принимаемого

УЗС (рис. 1.4.1) не позволяет однозначно определить истинный момент его приёма, чтобы сформировать «стоп»-сигнал и завершить интервал времени. Для решения данной проблемы, обычно, «стоп»-сигнал формируют по моменту пересечения одной из волн сигнала 0-го уровня [16, 18]. Для получения истинного времени распространения из длительности полученного интервала вычитают число волн, предшествующих детектируемому моменту, умноженному на период колебаний УЗС. На рисунке 1.4.1 показан момент формирования интервала времени T_x по моменту пересечения 0-го уровня 1-ой волной УЗС.

- измерение полученного интервала с указанной выше точностью. Ниже рассматриваются методы высокоточного измерения времени и разности времен распространения.

1.4.1. Метод прямого счёта

Метод прямого (дискретного) счёта импульсов заключается в подсчёте количества импульсов от генератора образцовой частоты в течение действия измеряемого интервала времени. Количество импульсов, которое попадёт в счётчик, определяется очевидным соотношением: $n_x = \text{Int}(f_0 T_x)$ ⁶. Именно такой метод используется в цифровых частотомерах [9].

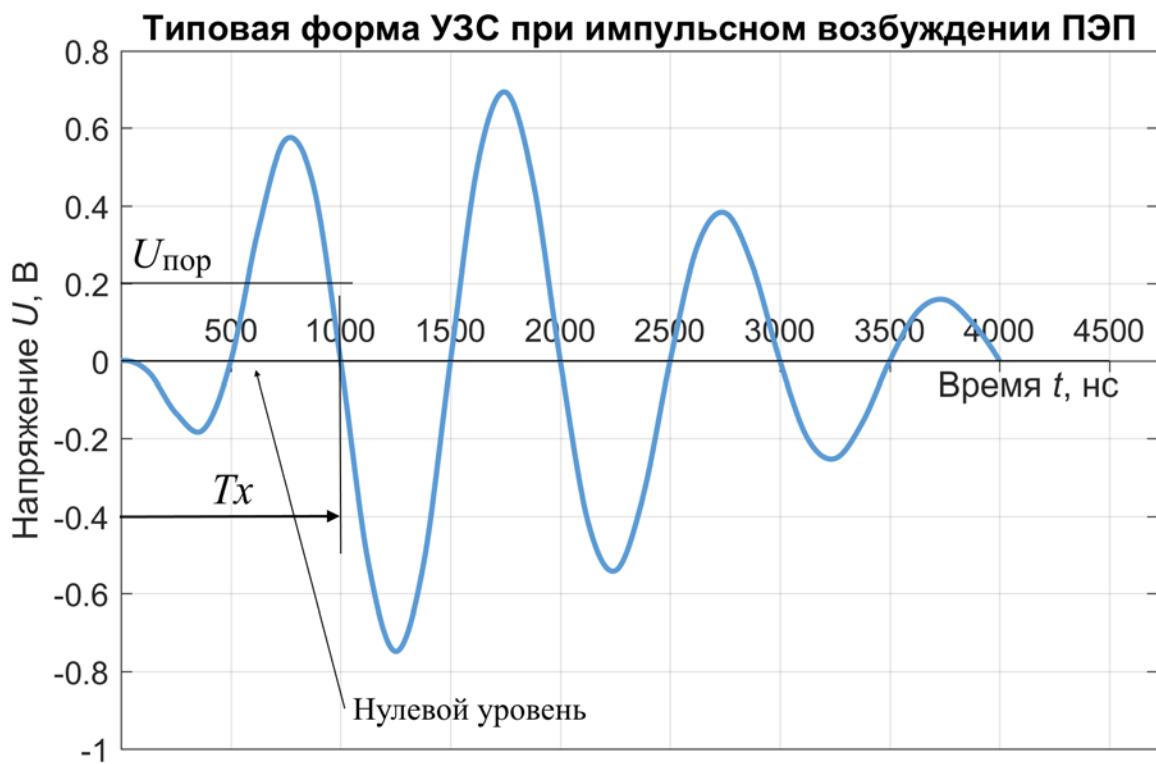
Измеренное значение интервала времени, с учётом математического ожидания погрешности дискретности и при условии, что начало интервала синхронизировано с импульсом генератора образцовой частоты (ГОЧ), определится формулой:

$$T_x = t_0(n + 0,5) \pm 0,5t_0, \quad (1.4.1)$$

где t_0 – период генератора опорной частоты.

В этой формуле добавление к целому числу значения «0,5» производится, естественно, средствами вычислительной техники, чтобы минимизировать случайную погрешность дискретности.

⁶ Функция Int означает целую часть действительного числа (название получено от сокращения «Integer» – целое число), например, $\text{Int}(99,91) = 99$, т.е. указанная функция «отбрасывает» дробную часть числа.



**Рис. 1.4.1. Форма принимаемого сигнала
при возбуждении излучающего ПЭП импульсом.**

Параметры сигнала: длительность импульса 0,5 мкс (резонансная частота обоих ПЭП – 1 МГц, добротность, приблизительно – 5). Упор – порог срабатывания компаратора, обнаруживающего сигнал на фоне шумов; T_x – длительность сформированного интервала времени: время распространения УЗС, плюс один период колебаний УЗС.

Таким образом, погрешность измерения данного метода составляет половину периода ГОЧ, т.е. $\Delta t = \pm 0,5t_0$. С учётом ранее определённых требований к точности измерения времени, частота ГОЧ (и скорость счёта импульсов электронными счётчиками) при прямом методе счёта должна составлять (25...50) ГГц. Как правило, скорость счёта для современных быстродействующих счётчиков импульсов не превосходит 1 ГГц.

Для уменьшения погрешности метода прямого счёта в ультразвуковых расходомерах используют, так называемые, «синхрокольца» [9]. «Синхрокольцо» образуется путём подключения выхода приёмника (П) ультразвуковых сигналов к входу формирователя импульсов (ФИ) (рис. 1.4.2). Благодаря этому приёмно-генерирующий тракт оказывается замкнутым на электроакустический тракт (ЭАТР).

В образованном кольце, однажды поданный на ФИ импульс («старт»), будет циркулировать до тех пор, пока из контроллера не будет подан сигнал «стоп». Период циркуляции импульсов, за вычетом времени задержки в электронных цепях, равен времени распространения УЗС в измеряемой среде, может быть измерен с высокой точностью при использовании цифровых элементов с не очень высоким быстродействием (частота ГОЧ не превышает (20...50) МГц). Для этого циркулирующие импульсы поступают на делитель частоты ($1/N$), на выходе которого формируется интервал времени в (100...200) раз больше периода следования, что позволяет во столько же раз уменьшить частоту ГОЧ.

Основной недостаток таких схем УЗР состоит в возникновении в акустическом тракте помех реверберации (сигналов «эхо»): при приёме УЗС только небольшая часть звуковой энергии преобразуется в электрический сигнал. Большая часть сигнала отражается в противоположном направлении, и при повторном отражении от излучающего ПЭП, складывается с полезным сигналом и искажает его фазу, т.е. изменяет момент приёма УЗС.

Данная погрешность может быть уменьшена при включении между приёмником и ФИ линии задержки (ЛЗ) [9], но полностью исключить влияние помех реверберации – не удается. По этой причине данный метод не получил широкого применения в современных УЗР.

1.4.2. Метод растяжки дробной части интервала времени

Идея метода растяжки дробной части заключается в том, чтобы измеряемый интервал представить в виде двух интервалов времени: целой части, **кратной** периоду импульсов ГОЧ, и дробной части, которая включает в себя погрешность дискретности. На [рисунке 1.4.3](#), приведены диаграммы работы селектора дробной и целой части, из которых следует формула для вычисления измеряемого интервала:

$$T_x = T_{\text{int}} - T_{\text{др}}, \quad (1.4.2)$$

где $T_{\text{int}} = t_0 \cdot (\text{Int}(f_0 T_x) + 2)$ – целая часть времени T_x ; $T_{\text{др}}$ – дробная часть времени T_x .

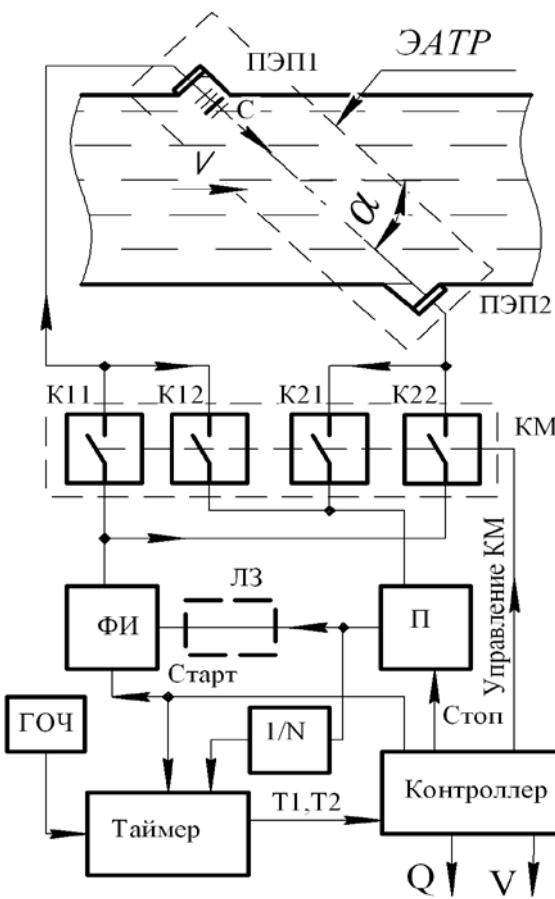


Рис. 1.4.2. Схема УЗР с синхрокольцами

Сигнал «Стоп», подаваемый из контроллера после приёма N импульсов, блокирует приёмник (П), и дальнейшая циркуляция импульсов прекращается.

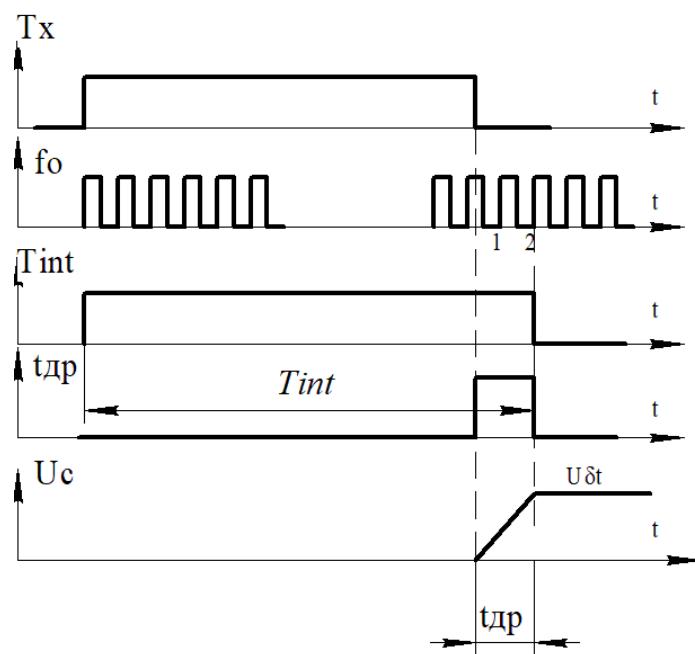


Рис. 1.4.3. Диаграммы работы измерителя дробной части

Целая и дробная части интервала T_X формируются с помощью схем цифровой логики. Целая часть T_{int} заканчивается после окончания измеряемого интервала T_X , по моменту окончания двух полных периодов ГОЧ (т.е. по окончанию T_X включается дополнительный счётчик, после подсчёта 2-го импульса T_{int} – «обрывается»). Дробная часть формируется как разность интервалов T_{int} и T_X , что легко выполняется с помощью элемента, реализующего «сложение по модулю 2». Целая часть измеряется методом прямого счёта без погрешности. Дробная часть измеряется аналоговыми методами. Например, быстрым зарядом конденсатора током большой величины.

Полученное на конденсаторе напряжение $U_{\delta t}$ будет пропорционально длительности $T_{\text{др}}$, и преобразуется с помощью аналогового цифрового преобразования (АЦП) непосредственно в цифровой код [рис. 1.4.3](#). Данный метод измерения используется во многих современных отечественных и зарубежных расходомерах.

Анализ погрешности метода растяжки дробной части.

Функция преобразования измерителя дробной части (ИДЧ), согласно изложенному принципу действия определяется формулой:

$$M_{\delta t} = \frac{U_{\delta t}}{q_{\text{ацп}}} = K_{\text{идч}} t_{\text{др}}, \quad (1.4.3)$$

где $K_{\text{идч}} = \frac{I}{q_{\text{ацп}} C}$ – коэффициент преобразования ИДЧ, с^{-1} ; $M_{\delta t}$ – цифровой код АЦП, результат измерения напряжения $U_{\delta t}$; $q_{\text{ацп}}$ – цена младшего разряда АЦП, В; I – ток заряда конденсатора; C – емкость конденсатора.

Для устранения неопределённости значений коэффициента преобразования $K_{\text{идч}}$, вызванных различиями тока заряда и ёмкости конденсатора от своих номинальных значений, ИДЧ периодически калибруют. С этой целью на его вход от ГОЧ подают импульсы длительностью $2t_0$ и t_0 . По полученным в АЦП результатам преобразования определяют коэффициент преобразования:

$$K_{\text{идч}} = \frac{K_{2t_0} - K_{t_0}}{2t_0 - t_0}, \quad (1.4.4)$$

где K_{2t_0} , K_{t_0} – калибровочные коды, результаты преобразования длительностей $2t_0$ и t_0 .

Согласно формулам (1.4.3) и (1.4.4) значение дробной части вычисляется по формуле:

$$t_{\text{др}} = \frac{M_{\delta t}}{K_{2t_0} - K_{t_0}} t_0, \quad (1.4.5)$$

Если предположить, что погрешность АЦП не превосходит цены младшего разряда, и что данная погрешность носит случайный характер, то результирующая погрешность единичного измерения не будет превосходить значения:

$$\delta_{\text{др}} = \frac{\Delta t_{\text{др}}}{t_{\text{др}}} = \sqrt{\frac{1}{M_{\delta t}^2} + \frac{2}{(K_{2t_0} - K_{t_0})^2}}. \quad (1.4.6)$$

Пусть в УЗР используются ГОЧ с частотой 10 МГц и 16 разрядный АЦП, тогда при измерении $t_{\text{др}} = 1,5t_0$ абсолютная погрешность измерения, рассчитанная согласно (1.4.6), составит $\pm 4,43$ пс. Это значение вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к измерителям интервалов времени в УЗР, однако данная погрешность – не единственная. **Основным источником погрешности рассматриваемого ИИВ является нелинейность интегрирования дробной части.** В выражении (1.4.3) предполагалось, что коэффициент преобразования ИДЧ не зависит от длительности $t_{\text{др}}$. В действительности он зависит от искажений вершины импульса, от нелинейности паразитных емкостей электронных цепей, включенных параллельно ёмкости конденсатора C . Данная погрешность зависит от конкретного исполнения ИДЧ и её исследование проще проводить, используя программы моделирования электронных компонентов и электронных схем.

1.4.3. Кратно-частотный метод

Кратно-частотный метод основан на подстройке частоты управляемых генераторов (ГУН) таким образом, чтобы период повторения их импульсов был точно в N раз меньше измеряемого интервала времени [10]:

$$t_{\text{ГУН}} = T_x/N, \quad (1.4.7)$$

где $t_{\text{ГУН}}$ – период следования импульсов на выходе ГУН; T_x – длительность измеряемого интервала.

Поскольку импульсы на выходе генератора следуют непрерывно, их период может быть измерен с очень высокой точностью.

Для реализации данного метода используют разнообразные схемы автоматической подстройки частоты, которые, по сути, представляют собой следящие системы. Как правило, в этих схемах частота ГУН делится в N раз. Сформированный при этом интервал времени $T_0 = t_{\text{ГУН}} \cdot N$ сравнивается с измеряемым интервалом T_x , величина рассогласования интегрируется и, с определенным знаком, подается на вход регулирования частоты ГУН. Таким образом, в данной следящей системе замыкается отрицательная обратная связь, за счет которой и обеспечивается выполнение равенства (1.4.7).

На рисунке 1.4.4 приведены возможные варианты схемы УЗР, реализующие рассмотренный метод, и схемы автоматической подстройки частоты (АПЧ).

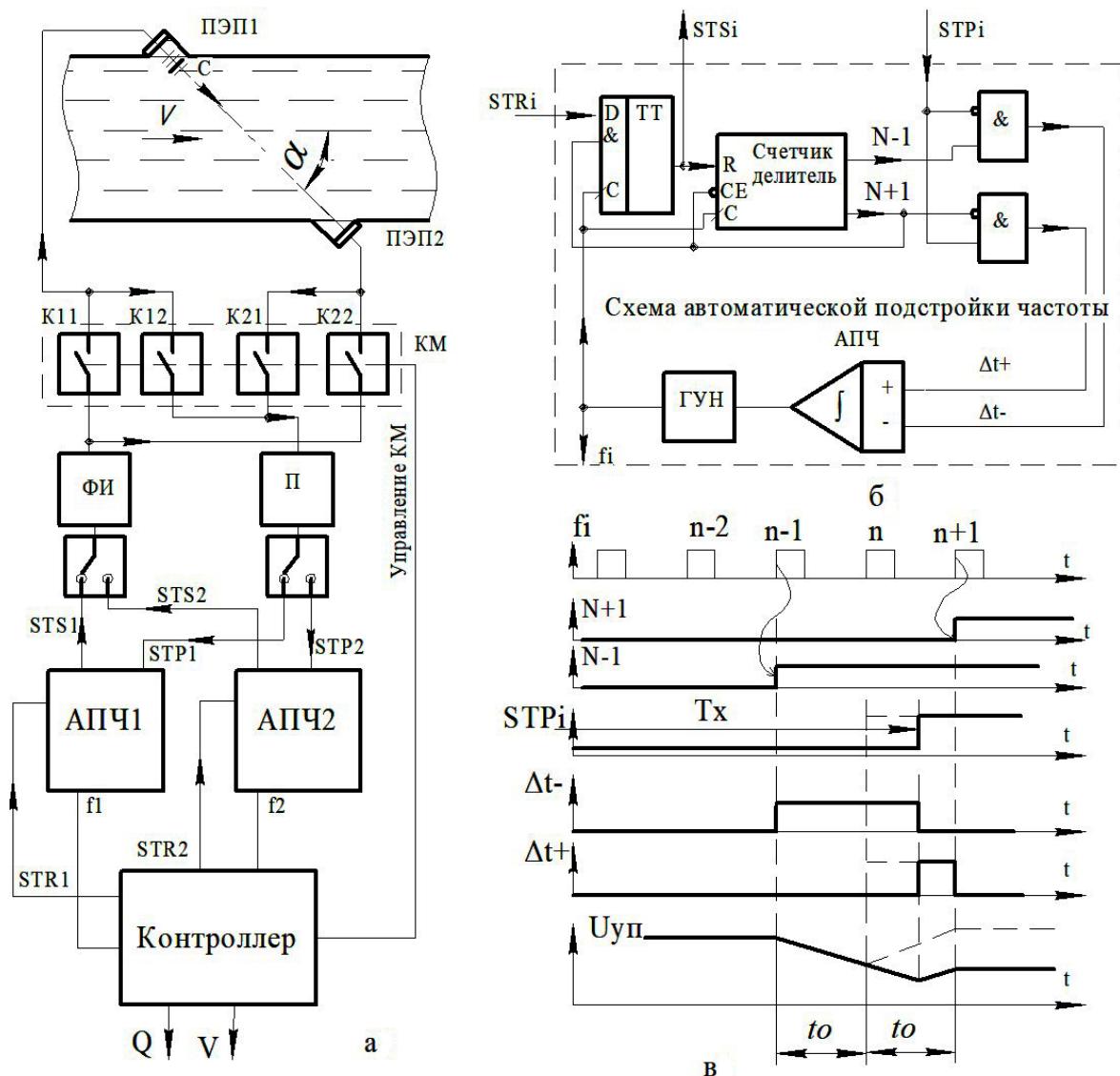


Рис. 1.4.4. Функциональная схема УЗР, использующая кратно-частотный метод измерения времени распространения УЗС (а), схема автоподстройки частоты (б) и диаграммы её работы (в)

Поясним кратко принцип работы АПЧ. В момент поступления на вход АПЧ стартового импульса STR потенциалы $N-1$ и $N+1$ находятся в единичном состоянии, поэтому в момент поступления импульса с ГУН тактируемый D-триггер ТТ устанавливается в «1» состояние, счётчик-делитель и его выходные триггера, формирующие потенциалы $N-1$ и $N+1$ сбрасываются в «0». Поэтому вторым импульсом триггер ТТ устанавливается в «0», и счётчик начинает счёт импульсов, а на выходе АПЧ формируется стартовый импульс STS, синхронный с импульсами ГУН. Когда в счётчик попадёт $n-1$ импульсов, на его соответствующем выходе сформируется потенциал $N-1$, после $n+1$ импульсов аналогично сформируется потенциал $N+1$. Совместно с сигналом «стоп» (STP), положительный фронт которого определяет время распространения УЗС – T_x , из этих потенциалов формируются управляющие импульсы: Δt^+ и Δt^- . Если N -ый импульс совпадает с началом сигнала STP (т.е. период генератора ГУН точно в N раз меньше времени T_x), то, как следует из диаграмм работы АПЧ, длительности импульсов Δt^+ и Δt^- равны, и их интегрирование не приводит к изменению напряжения управления U_{up} , следящая система находится в уравновешенном состоянии. При нарушении равновесного состояния, например, при $\Delta t^- > \Delta t^+$, как показано на диаграмме, напряжение управления на выходе интегратора, после воздействия импульсов изменится (в рассмотренном случае уменьшится), что приведёт к изменению частоты ГУН (уменьшится), и схема АПЧ приблизится к равновесному состоянию.

Погрешность кратно-частотного метода, также, как и предыдущего метода, определяется точностью выделения интервалов времени Δt^+ и Δt^- , а также – точностью интегрирования данных интервалов.

1.4.4. Использование калиброванных линий задержек

Германская фирма (основана в 1996 г., в настоящее время ScioSense) выпустила серию микросхем цифровых преобразователей интервалов времени (Time-to-Digital Converter) специально для построения ультразвуковых расходомеров [13]. В качестве **меры времени** в этих преобразователях используют **задержку** распространения импульсного сигнала в **вентилях** (логических инверторах). Принцип действия этих цифровых преобразователей интервалов времени (ЦПВ) поясняется его функциональной схемой на [рис. 1.4.5](#).

Импульс «Start» (начало интервала времени) поступает на вход цепочки вентилей, которая является аналоговой линией задержки (ЛЗ).

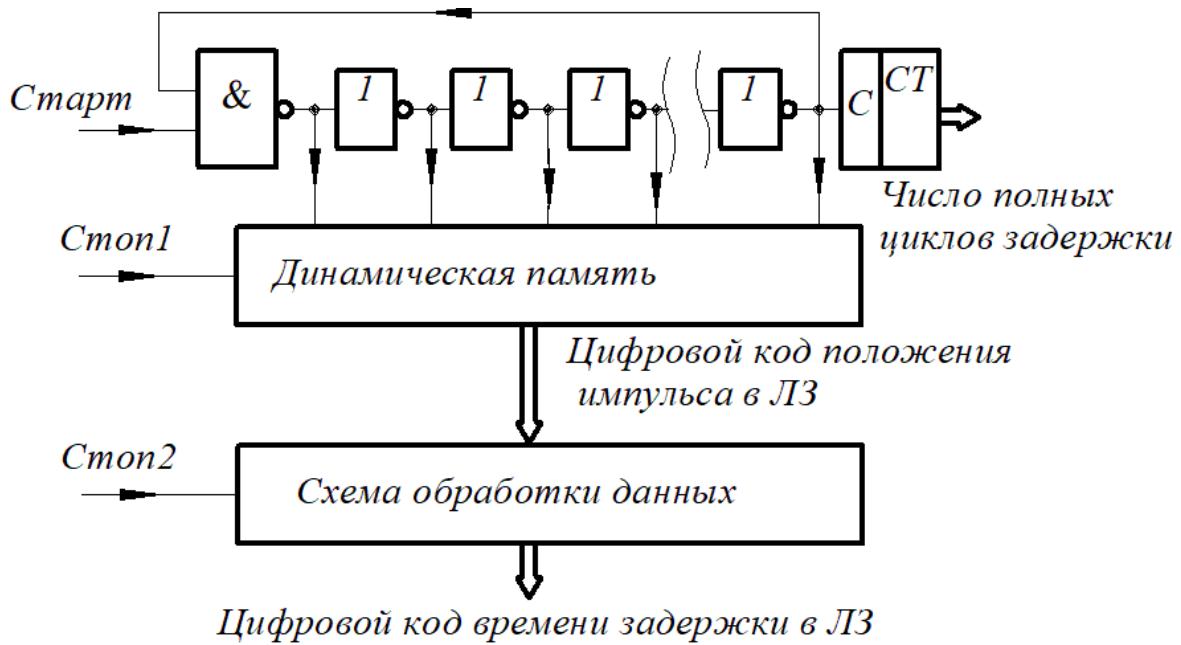


Рис. 1.4.5. Цифровой преобразователь интервалов времени с использованием линии задержки на логических элементах

Линия задержки – закольцована, т.е. после прохождения всей линии задержки импульс попадает в счётчик грубого счёта и обратно на вход ЛЗ, что обеспечивает непрерывную его циркуляцию в ЛЗ. В момент поступления сигнала «СТОП1» параллельный код из линии задержки записывается в динамическую память. Этот код несёт информацию о времени задержки циркулирующего импульса в ЛЗ. Этот цифровой код, по сигналу «СТОП2» переписывается из сверхбыстрой динамической памяти в схему обработки данных. Схема преобразует полученный код в номер вентиля n , до которого успел распространиться циркулирующий импульс, и вычисляет полное время между сигналами «СТАРТ» и «СТОП»:

$$T_x = n \cdot t_0 + M \cdot T_N, \quad (1.4.8)$$

где t_0 – время задержки в одном вентиля, среднее значение определяется в процессе калибровки ЛЗ $t_0 = T_N / k$; k – число вентиляй в линии задержки; M – число импульсов, подсчитанных в счётчике грубого счета; T_N – период циркуляции импульсов в ЛЗ.

Время задержки импульса в одном вентиле (LSB) (по данным изготавителя) составляет **обычно 90 пс** при напряжении питания 3,3 В и при температуре среды +25 °С. Среднеквадратичные шумы⁷ (RMS) составляют 60 пс (0,7 LSB – единиц младшего разряда или квантов). Число вентилей достаточно для прямого измерения импульсов длительностью 2,5 нс (т.е. около 280 шт). Поскольку на время задержки в вентилях существенное влияние оказывают температура, напряжение питания, процессы старения, то для уменьшения влияния данных факторов ЛЗ периодически калибруется путем измерения периода циркуляции в ней импульсов.

Погрешность данного метода, как следует из принципа действия, определяется разрешающей способностью, т.е. временем задержки в одном вентиле, и среднеквадратическим отклонением этого времени от среднего (номинального) значения. По сведениям изготавителя, за счёт дополнительных схемотехнических решений удаётся уменьшить разрешающую способность этих ИИВ до 45 пс, что вполне удовлетворяет требованиям большинства УЗР. Отметим, что на базе этого метода были разработаны функционально полные микросхемы УЗР [14, 15], реализующие излучение и приём УЗС в двух направлениях, вычисление времени и разности времён распространения УЗС и ряд других сервисных функций, позволяющих повысить надежность и точность работы расходомеров.

1.4.5. Метод цифровой обработки сигналов

Одним из перспективных методов **высокоточного** измерения времени распространения сигналов в УЗР является метод цифровой обработки сигналов [16, 17]. Суть данного метода заключается в следующем. Принимаемый сигнал $Y(t)$ с помощью АЦП преобразуется в цифровую последовательность, которая запоминается в памяти процессора. Период дискретизации задаётся кварцевым генератором, с помощью сигналов которого производится «грубое» измерение времени распространения УЗС (т.е. каждому отсчёту соответствует целая часть интервала времени T_X).

График получаемой цифровой последовательности показан на [рис. 1.4.6](#). Более точное определение момента приёма УЗС (т.е. момента

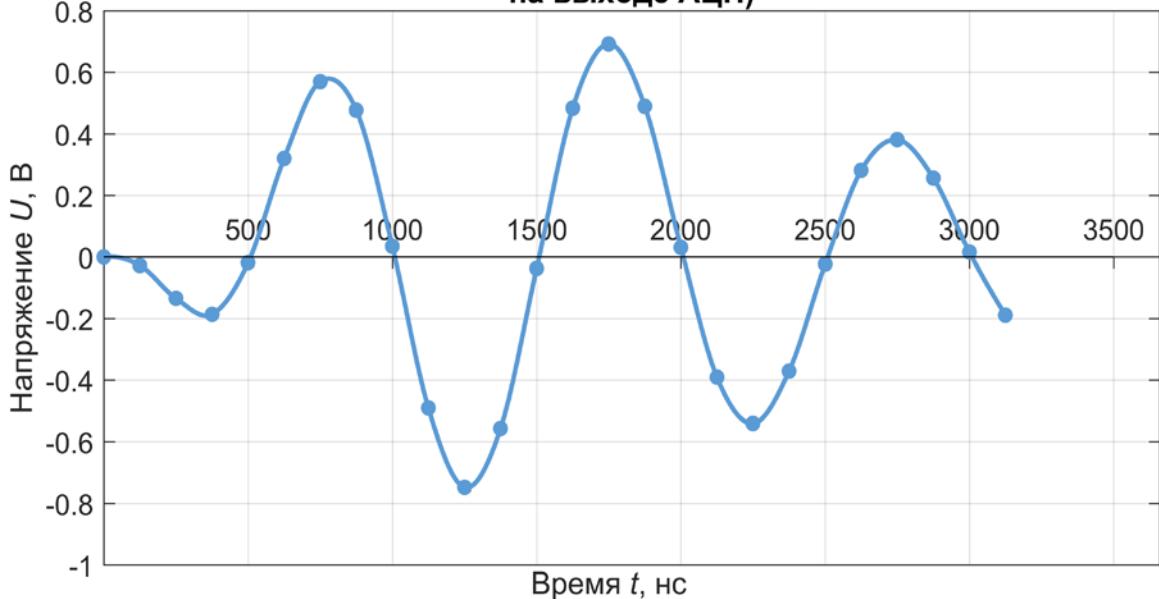
⁷ По сути, данная величина должна включать в себя как случайную составляющую, вызванную шумами, так и отклонение от номинального значения времени задержки за счет различия динамических параметров вентилей.

пересечения некоторой полуволной нулевого уровня) может быть произведено путём интерполяции сигнала между двумя отсчётами, имеющими разные знаки. Например, можно представить сигнал между двумя отсчётами в виде линейной функции времени, тогда время распространения определяется следующим очевидным соотношением (1.4.9):

$$T_X = nt_0 - \frac{U_n}{U_n - U_{n-1}} t_0, \quad (1.4.9)$$

где n – номер отсчёта, при котором сигнал «пересекает» нулевой уровень, т.е. напряжение отсчёта $U_n > 0$, а предыдущее значение $U_{n-1} < 0$.

**Форма ультразвукового импульса
(точками отмечена цифровая последовательность
на выходе АЦП)**



**Рис. 1.4.6. График цифровой последовательности на выходе АЦП
при оцифровке ультразвукового сигнала**

Возможна и более точная, кубическая интерполяция по 4-ём точкам.

Следует сделать важное замечание: результаты «оцифровки» содержат не только сигнал, но и шумы. Поэтому **перед осуществлением интерполяции** и вычислением точного значения T_X следует **произвести фильтрацию сигнала**, «пропустив» цифровую последовательность через цифровой фильтр. Отметим, что при использовании рассмотренного метода интерполяции приемлемая точность измерения времени распространения получается при достаточно высокой частоте дискретизации:

в 20...40 раз превосходящей частоту УЗС, что требует применения весьма быстродействующих АЦП $(30...50) \cdot 10^6$ выборок в секунду с высокой разрешающей способностью (10...12 разрядов). Для уменьшения требований к быстродействию АЦП можно воспользоваться повышающей передискретизацией сигнала и, посредством цифровой фильтрации, произвести интерполяцию сигнала вблизи момента пересечения сигналом «0» уровня [16]. При использовании цифровых фильтров 8...10 порядков требования к быстродействию АЦП можно снизить до 10^7 выборок в секунду. Использование цифровых фильтров позволяет также существенно подавить помехи и снизить их влияние на точность измерения [16].

Отметим, что наибольшее распространение для измерения разности времён распространения УЗС получил корреляционный метод измерения [16-18]. Сущность корреляционного метода состоит в определении положения максимума непрерывной взаимной корреляционной функции (ВКФ) для сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t) = y_1(t + \Delta T_X)$, т.е. для сигналов, распространяющихся по потоку и против потока жидкости.

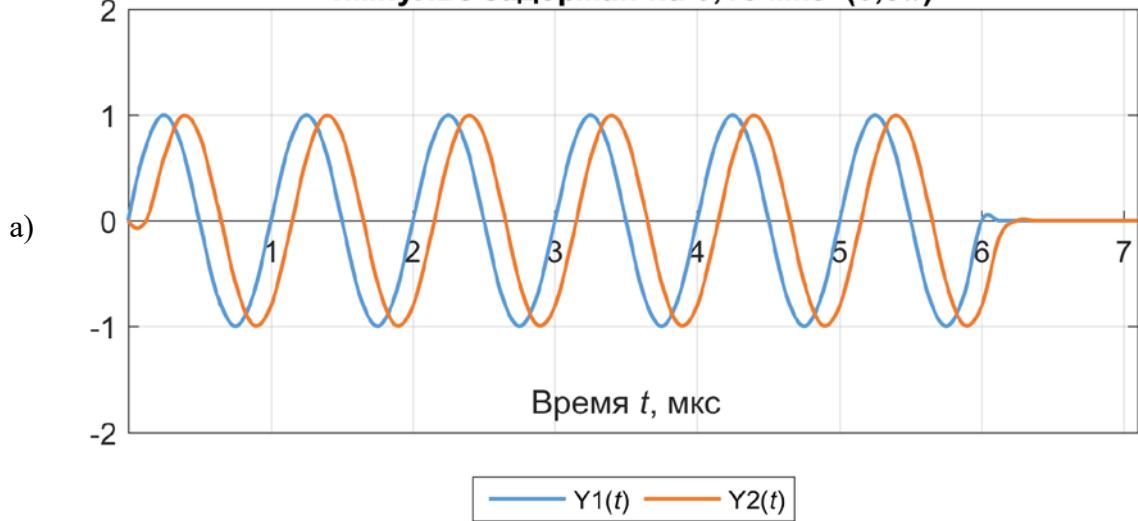
$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{t_m - t_0} \int_{t_0}^{t_m} y_1(t) \cdot y_2(t + \tau) dt , \quad (1.4.10)$$

где $R(\tau)$ – ВКФ непрерывных сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$, определённых на интервале от t_0 до t_m .

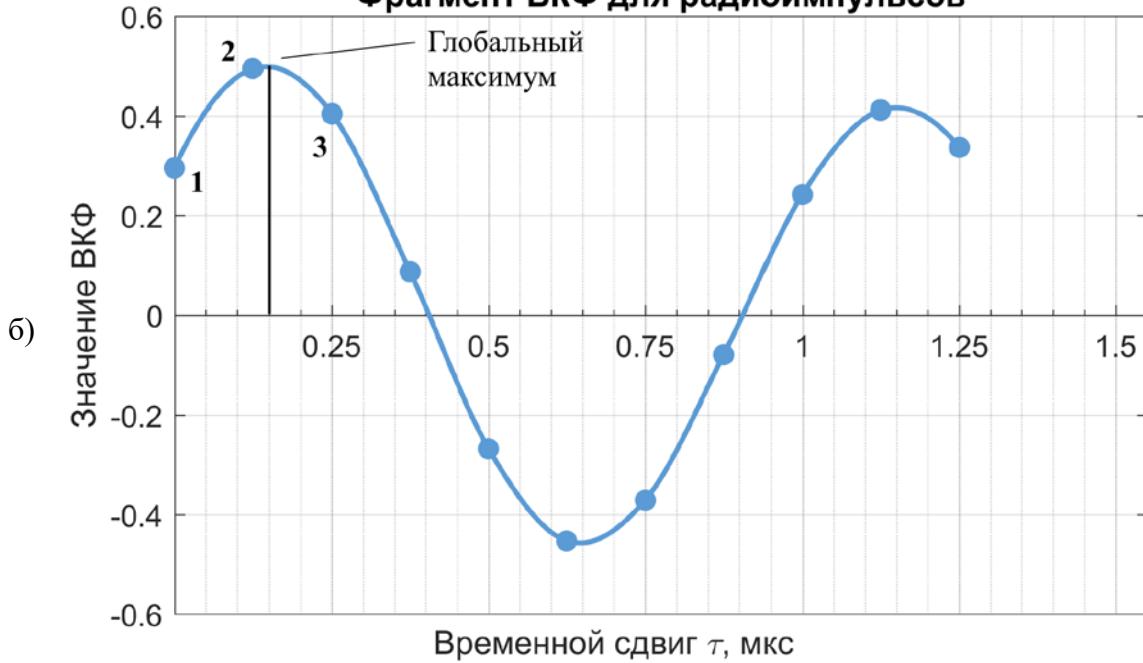
Если пренебречь шумами, и считать сигналы Y1 и Y2 полностью идентичными по своей форме, то положение максимума ВКФ – τ_{\max} , будет точным значением разности их времён распространения. Для примера на [рис. 1.4.7а](#) приведены два УЗС, имеющих форму радиоимпульсов и задержанных на 0,15 мкс, а на [рис. 1.4.7б](#) приведена ВКФ этих сигналов. Точками отмечены значения дискретной ВКФ (ДВКФ) для этих сигналов при частоте дискретизации равной 10 МГц (частота сигнала равна 1 МГц).

Несложно показать, что для одинаковых по форме сигналов ВКФ симметрична относительно своего глобального максимума. Для приведённых радиоимпульсов огибающая ВКФ имеет треугольную форму. Полная «длительность» (область определения) ВКФ равна удвоенной длительности радиоимпульса. Форма ВКФ, для рассмотренных сигналов, в области максимума близка к косинус-функции [17, 18].

**Синусоидальные радиоимпульсы, 2-ой
импульс задержан на 0,15 мкс (0,3π)**



Фрагмент ВКФ для радиоимпульсов



**Рис. 1.4.7. Синусоидальные радиоимпульсы (а)
и их взаимная корреляционная функция (б)**

Как следует из приведённого графика, максимальное значение ДВКФ будет совпадать с реальным максимумом ВКФ только в случае, если время распространения кратно периоду дискретизации и периоду колебаний сигнала. Для точного нахождения максимума ВКФ, при произвольном значении T_X , полученные значения ДВКФ интерполируют (в

области максимума) непрерывными функциями, например, квадратичным полиномом или косинус-функцией. Более подробно корреляционный метод измерения времени распространения УЗС рассмотрен в упомянутых ранее работах [17, 18].

1.5. Модель пьезоэлектрических преобразователей

Введение. Существенное влияние на точность и надёжность работы УЗР оказывают параметры и качество изготовления ПЭП. Как было показано ранее, для уменьшения погрешности измерения времени распространения необходимо повышение отношения сигнала-шум [16]. Поэтому при разработке УЗР, в первую очередь, стремились увеличить сквозной коэффициент преобразования электроакустического тракта (ЭАТР) [19], что достигается выбором оптимальных параметров ПЭП (рабочей частоты, геометрических размеров ПЭ, способа согласования волновых сопротивлений ПЭ и жидкости, согласованием электрических параметров ПЭП и приёмногенерирующих цепей УЗР). Другим существенным источником погрешности в УЗР является, так называемая, «асимметрия» ЭАТР, т.е. разность времён распространения УЗС (по потоку и против потока) в неподвижной жидкости, вызванная разным временем задержки сигналов в электрических и электронных цепях расходомера [20]. Рассматриваемые ниже модели пьезоэлектрических преобразователей необходимы для расчёта оптимальных параметров ПЭП и уменьшения указанных выше погрешностей.

1.5.1. Физическая модель работы пьезоэлементов

Основным элементом ПЭП является пьезоэлемент, который изготавливают из пьезоэлектрических материалов. Эти материалы обладают прямым и обратным пьезоэффектом: при деформации пьезоэлектрика на определённых его гранях появляются заряды, а между гранями – электрическое напряжение, и наоборот: **приложении к этим граням** электрического напряжения материал испытывает деформацию. Рассмотрим физику процессов, протекающих в пьезоэлектриках при прямом и обратном пьезоэффектах. На [рисунке 1.5.1](#) пьезоэлектрическая пластина представлена в виде сильно поляризованного диэлектрика с преимущественным направлением поляризации перпендикулярным её граням.

Образующийся на поверхности граней заряд определяется вектором поляризации диэлектрика [22]:

$$q = (\vec{D} \cdot \vec{A}_0), \quad (1.5.1)$$

где \vec{D} – вектор поляризации диэлектрика (он же – вектор электрической индукции):

$$\vec{D} = \frac{1}{\Delta V} \sum_i^N \vec{P}_i = \frac{N}{\Delta V} \langle \vec{P}_i \rangle, \quad (1.5.2)$$

где \vec{A}_0 – вектор, перпендикулярный грани ПЭ, модуль которого равен площади этой грани; $\langle \vec{P}_i \rangle$ – среднее значение дипольных моментов \vec{P}_i .

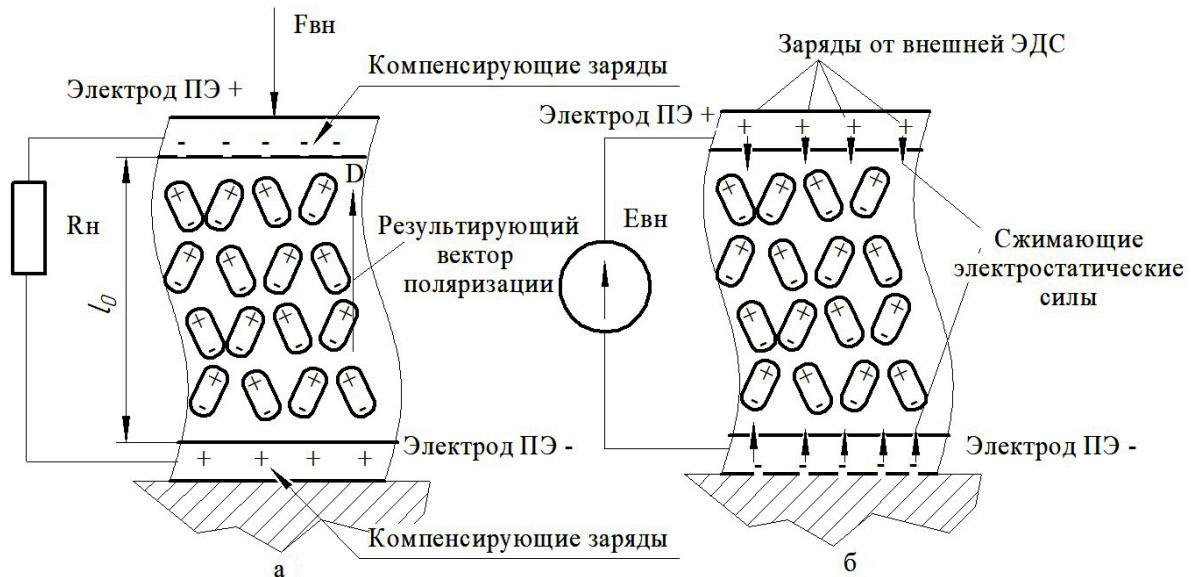


Рис. 1.5.1. Фрагменты плоского пьезоэлемента, поясняющие прямой (а) и обратный (б) пьезоэффекты

Если пьезоэлемент находится в статическом состоянии, то заряд q компенсируется зарядами, протекающими через нагрузочный резистор R_H (даже при очень большом значении R_H , ёмкость пьезоэлемента, в конечном счёте, будет разряжена). Приложим к граням ПЭ силу, при действии которой толщина пластины l_0 изменится на величину Δl .

Внешняя сила совершил работу $A = F \cdot \Delta l$, и механическая энергия внешнего воздействия преобразуется, прежде всего, в механическую потенциальную энергию упругой деформации (энергия сжатия-растяжения

упругого тела), в кинетическую энергию элементарных объёмов деформируемого тела (так как деформация сопровождается относительным движением этих объемов). Кроме того, в пьезокерамическом материале при деформации будет изменяться среднее значение дипольных моментов, причём эти изменения (для пьезоэлектрика) будут больше изменений объёма тела, и вектор поляризации \vec{D} уменьшится при сжатии и увеличится при растяжении. На поверхностях пластин (покрытых тонкими электродами) появится нескомпенсированный заряд⁸, а между электродами ПЭ – напряжение:

$$q_d = \Delta D \cdot A_0, U_{\text{пэ}} = \frac{q_d}{C_{\text{пэ}}},$$

где $C_{\text{пэ}} = \epsilon \epsilon_0 \frac{A_0}{l_0}$ – электрическая ёмкость пьезоэлемента, Φ ; ϵ, ϵ_0 – диэлектрические проницаемости, относительная (диэлектрика) и абсолютная (вакуума), $\Phi/\text{м}$.

В результате ПЭ приобретет электрическую энергию $W_{\text{эл}} = \frac{q_d^2}{2C_{\text{пэ}}}$, которая при разряде ПЭ через активное сопротивление рассеется в виде тепловой энергии. Т.е. при прямом пьезоэффекте (ПЭФ) пьезоэлемент преобразует подведённую механическую работу в электрическую, при этом часть подведённой энергии аккумулируется в ПЭ в виде механической энергии.

Таким образом, баланс энергии при прямом ПЭФ (без учёта тепловых потерь) определяется следующим уравнением [23]:

$$W_{\text{пм}} = W_{\text{эл}} + W_{\text{мех}}, \quad (1.5.3)$$

где $W_{\text{пм}}$ – подведённая механическая энергия; $W_{\text{эл}}$ – накопленная (за счёт ПЭФ) в ПЭ электрическая энергия; $W_{\text{мех}}$ – накопленная в ПЭ механическая энергия.

При реализации обратного пьезоэффекта, на электроды ПЭ подаётся электрическое напряжение. При этом, ёмкость ПЭ приобретет электрический заряд и накопит потенциальную электрическую энергию $W_{\text{эл}} = \frac{U_c^2 C_{\text{пэ}}}{2}$. Возникающее между электродами ПЭ электрическое поле приведёт к деформации диполей: если вектор напряжённости электрического поля противоположен вектору поляризации, диполи будут сжи-

⁸ Считаем, что деформация производится «достаточно быстро», и заряды не успевают стечь с электродов.

маться, в противном случае – растягиваться. Это приведёт к соответствующей деформации всего ПЭ, внутри пьезоэлемента накапится механическая энергия, часть которой может быть передана среде, с которой взаимодействует ПЭ (например, излучена в виде звуковой волны). Т.е. при обратном ПЭФ пьезоэлемент является **преобразователем электрической энергии в механическую**. Баланс энергии при обратном ПЭФ определяется уравнением [23]:

$$W_{\text{пэл}} = W_{\text{эл}} + W_{\text{мех}}, \quad (1.5.4)$$

где $W_{\text{пэл}}$ – подведенная электрическая энергия.

Таким образом, ПЭ – это типичный **электромеханический преобразователь** (ЭМП), который способен преобразовывать электрическую энергию в механическую (режим двигателя), а механическую энергию – в электрическую (режим генератора). Можно доказать, что данный преобразователь является обратимым, и его эффективность определяется коэффициентом электромеханической связи, одинаковым для прямого и обратного преобразований:

$$k_t = \frac{W_{\text{эл}}}{W_{\text{пм}}} = \frac{W_{\text{мех}}}{W_{\text{пэл}}}.$$

1.5.2. Пьезоэлектрический преобразователь – электромеханический четырехполюсник

Для получения математических моделей электромеханические преобразователи, обычно, представляют в виде четырехполюсников (рис. 1.5.2). Свойства четырехполюсников определяют с помощью уравнений, устанавливающих связь между входными и выходными величинами.

Из известных шести форм уравнений четырёхполюсников нам удобно использовать уравнения в G-форме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= G_{11}\dot{U}_1 + G_{12}\dot{v}_2, \\ \dot{F}_2 &= G_{21}\dot{U}_1 + G_{22}\dot{v}_2, \end{aligned} \quad (1.5.5)$$

где \dot{I}, \dot{U}_1 – входные ток и напряжение ПЭ (величины с электрической стороны ПЭ); \dot{F}_2 – сила взаимодействия среды и поверхности ПЭ; \dot{v}_2 – скорость движения поверхности ПЭ при его деформации.

Поскольку ПЭ является сложной динамической системой, для анализа его характеристик удобно пользоваться гармоническими сигналами, поэтому все величины в (1.5.5) представлены в виде комплексных чисел.

Коэффициенты G_{ij} в уравнениях (1.5.5) позволяют производить расчёт характеристик ПЭП, анализировать его свойства, находить оптимальные параметры входящих в него элементов. Чтобы упростить задачу, определим уравнения только для пьезоэлемента, являющегося активным элементом ПЭП. В УЗР, в основном, используются плоские пьезоэлементы, совершающие продольные колебания по толщине (рис. 1.5.3). Полная система уравнений для продольного пьезоэффекта в плоском пьезоэлементе имеет вид [21]:

$$\begin{aligned} D_3 &= \epsilon_{33}^S E_3 + e_{33} s_3, \\ T_3 &= -e_{33} E_3 + c_{33}^E s_3 \end{aligned} \quad (1.5.6)$$

где D_3 – z-компоненты вектора поляризации ПЭ, Кл/м² (рис. 1.5.3); ϵ_{33}^S – диэлектрическая проницаемость пьезокерамики в направлении оси Z, Ф/м; E_3 – z-компоненты вектора электрической напряженности В/м; e_{33} – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/м²; s_3 – z-компоненты деформации $s = \Delta l/l_0$; T_3 – z-компоненты вектора механического напряжения, Н/м² (Па); Δl , l_0 – изменение толщины и исходная толщина ПЭ, м; c_{33}^E – модуль упругости материала ПЭ в отсутствии электрического поля (например, при замкнутых электродах ПЭ), Па.

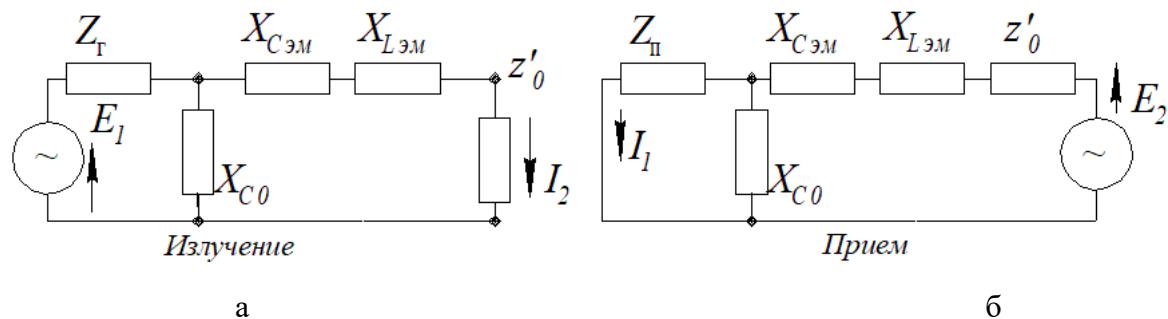


Рис. 1.5.2. Линейный электромеханический преобразователь (ЭМП), представленный в виде четырёхполюсника: а) – режим двигателя (в случае ПЭП – излучение УЗС); б) – режим генератора (приём УЗС)

Уравнения (1.5.6) определяют состояние **элементарного** объёма⁹ ПЭ. Уравнения четырёхполюсника для всего ПЭ получим путём инте-

⁹ в механике сплошных сред элементарный объём – это область среды, в которой макропараметры можно считать неизменными, например, $\frac{\partial v}{\partial x_i} = 0$, где x_i – i-ая пространственная координата.

грирования левой и правой части уравнений (1.5.6) по площади и толщине ПЭ [21, с.136]. При этом учтём, что и вектор поляризации, и механические напряжения практически постоянны по площади, а напряжённость и величина деформации (в квазистатическом режиме) распределены равномерно¹⁰ по толщине ПЭ. Поэтому интегрирование сводится к простому умножению левой и правой частей уравнения на площадь ПЭ:

$$q_1 = D_3 A_0 = (\varepsilon_{33}^S \frac{U_1}{l_0} + e_{33} \frac{\Delta l_2}{l_0}) A_0$$

$$F_2 = T_3 A_0 = (-e_{33} \frac{U_1}{l_0} + c_{33}^E \frac{\Delta l_2}{l_0}) A_0,$$

где q_1 , U_1 – электрический заряд и напряжение на электродах ПЭ – входные величины электромеханического четырехполюсника; Δl_2 , Δl_1 – смещения передней и задней граней ПЭ, (разность смещений – определяет деформацию ПЭ по толщине).

Запишем это уравнение в более компактном виде, для простоты будем считать, что ПЭ опирается на абсолютно жёсткую стенку, и $\Delta l_1 = 0$:

$$q_1 = C_0 U_1 + n \Delta l_2$$

$$F_2 = -n U_1 + K_\Delta^E 2 \Delta l_2, \quad (1.5.7)$$

где $n = e_{33} \frac{A_0}{l_0}$ – коэффициент электромеханической трансформации (КЭМТ) [Кл/м]; $C_0 = \varepsilon_{33}^S \frac{A_0}{l_0}$ – ёмкость ПЭ в заторможенном состоянии; $K_\Delta^E = c_{33}^E \frac{k A_0}{l_0}$ – упругость ПЭ.

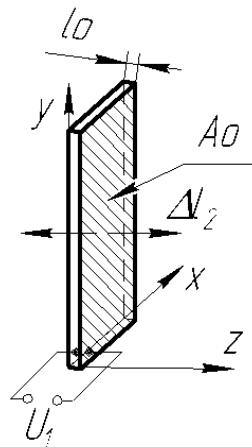


Рис. 1.5.3. Пьезоэлемент, совершающий продольные колебания по толщине

Обозначения: l_0 – толщина пластины, A_0 – площадь пластины, U_1 – напряжение, приложенное к электродам ПЭ, Δl_2 – смещение граней пластины

¹⁰ данные предположения верны только для квазистатического режима работы плоского ПЭ, когда инерционностью (и кинетической энергией) его элементарных объёмов можно пренебречь.

Уравнениям (1.5.7) соответствует следующая эквивалентная схема [21], изображённая на рис. 1.5.4.

Схема имеет электрическую и механическую части, соединённые с помощью идеального электромеханического трансформатора. Трансформатор производит преобразование электрических величин (заряда и напряжения) в механические величины: электромеханическую силу $F_{\text{эм}}$ и смещение граней ПЭ, а также – обратную трансформацию сигналов (механических – в электрические). Схема на рис. 1.5.4 не учитывает распределённой массы ПЭ, так как в квазистатическом режиме (на низких частотах) её влияние чрезвычайно мало.

Чтобы привести схему ПЭ к виду четырёхполюсника, изображённого на рис. 1.5.4, продифференцируем уравнения (1.5.7) по времени, при этом все переменные будем считать гармоническими сигналами, представленными в виде комплексных экспонент:

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= j\omega C_0 \dot{U}_1 + n \dot{v}_2 \\ \dot{F}_2 &= -n \dot{U}_1 + \frac{1}{j\omega C_M} \dot{v}_2,\end{aligned}\quad (1.5.8)$$

где $\dot{I}_1 = \frac{dq_1}{dt}$ – входной ток эквивалентной схемы ПЭ; $\dot{v}_2 = \frac{dl_2}{dt}$ – скорость колебания поверхности ПЭ; $C_M = \frac{A_0}{c_{33}^E l_0}$ – механическая гибкость ПЭ.

Очевидно, что данным уравнениям соответствуют эквивалентные электрические схемы, представленные на рис. 1.5.5. При замене механических элементов на электрические используется так называемый «принцип электромеханической аналогии»: распространение электрических сигналов (напряжений и токов) по электрическим цепям и распространение механических «сигналов» (в виде сил и скорости движения) по механическим цепям определяются полностью подобными дифференциальными уравнениями.

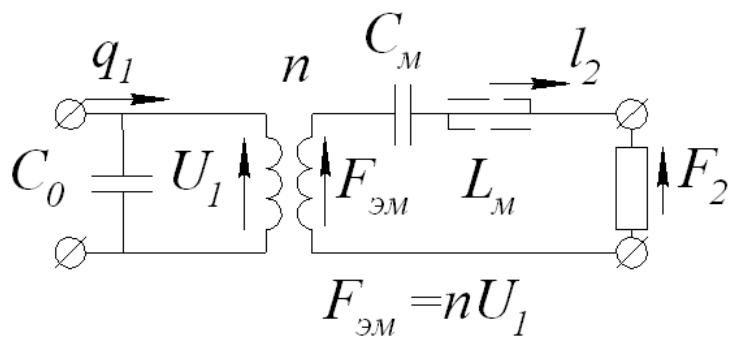


Рис. 1.5.4. Эквивалентная схема ПЭ в квазистатическом режиме

Здесь на рисунке: C_M – механическая гибкость, $C_M = 1 / K^E_{\Delta}$.

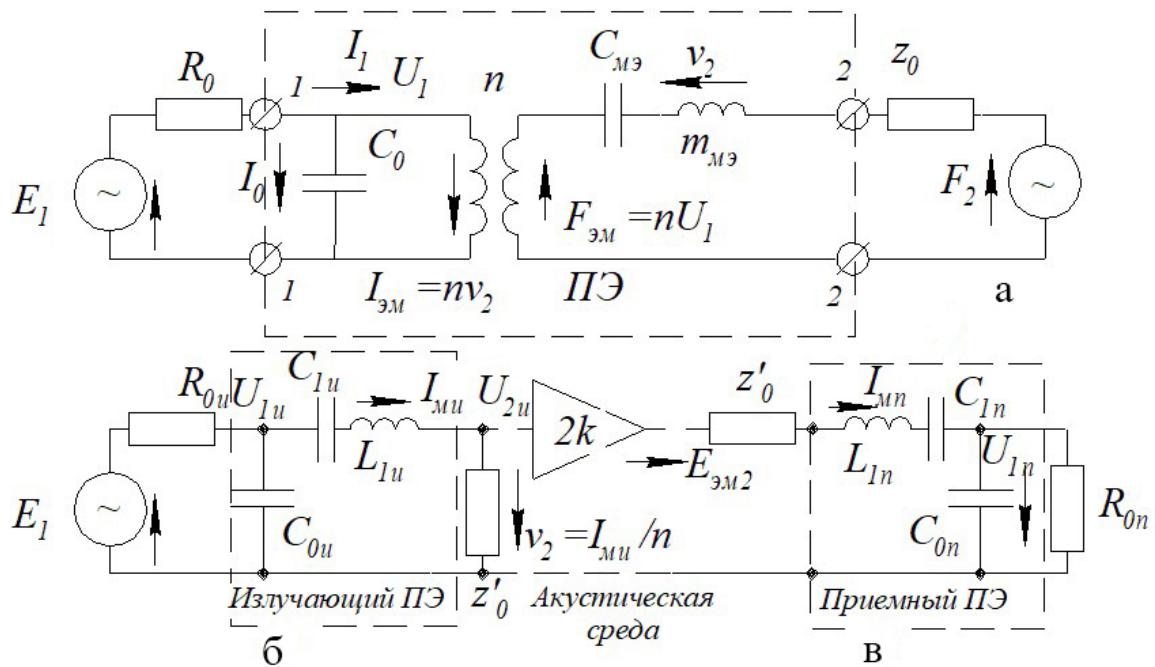


Рис. 1.5.5. Упрощённые эквивалентные схемы ПЭ (без учёта потерь в ПЭ) для гармонических сигналов вблизи резонансной частоты

На рисунке: а) обобщённая схема ПЭ при совместном воздействии на ПЭ электрического и акустического сигналов; б) эквивалентная схема в режиме излучения; в) эквивалентная схема в режиме приёма.

Например, изменение скорости движения некой массы при действии на неё силы подобно изменению тока через индуктивность при действии на неё напряжения: $\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} \leftrightarrow \frac{di}{dt} = \frac{U}{L}$. Аналогичные выражения справедливы для резисторов и механических элементов трения, для упругой податливости упругих элементов и электрической ёмкости, поэтому механические элементы можно заменить эквивалентными электрическими [23, с.39–42] и для расчёта механических цепей использовать законы электротехники.

Напомним, что уравнения (1.5.8) получены для квазистатического режима работы, когда кинетической энергией элементарных объёмов ПЭ можно пренебречь. При увеличении частоты колебаний увеличивается скорость движения этих объёмов, для учёта кинетической энергии, накапливаемой в этих объёмах, в схему вводится реактивный элемент – масса, электрическим аналогом которой является индуктивность.

Пьезоэлементы в УЗР работают, как правило, в режиме полуволновых вибраторов, при котором гармонические колебания всех элементарных слоёв ПЭ происходят синфазно, что позволяет представить пьезоэлемент в виде элементов с сосредоточенными параметрами¹¹: пружины

¹¹ В действительности, ПЭ является механической системой с распределенной упругостью и распределенной массой.

(сосредоточенной упругости) и сосредоточенной массы. Условием эквивалентности замены системы с распределенными параметрами на систему с сосредоточенными параметрами является равенство в этих системах средних кинетической и потенциальной энергий. Средняя кинетическая энергия ПЭ определяется интегрированием квадрата скорости по толщине, а средняя потенциальная энергия ПЭ (энергия упругой деформации) определяется интегрированием квадрата деформации по толщине ПЭ. Для ненагруженного полуволнового вибратора смещения элементарных объёмов по толщине изменяется по косинус-закону: $\Delta l(z) = \Delta l_m \cos\left(\frac{\pi z}{l_0}\right)$. Учитывая, что скорость – это есть производная по времени от Δl , а деформация элементарного слоя – есть производная от смещения Δl по оси z , для эквивалентных значений параметров плоских ПЭ несложно определить следующие формулы [21, 23]:

$$C_{\text{мэ}} = \frac{2C_{\text{м}}}{\pi^2} = \frac{2}{\pi^2} \frac{A_0}{c_{33}^E l_0}, \quad m_{\text{э}} = \frac{m_{\text{пэ}}}{2}, \quad (1.5.9)$$

где $C_{\text{мэ}}$ – эквивалентная механическая гибкость; $m_{\text{э}}$ – эквивалентная масса ПЭ; $m_{\text{пэ}}$ – масса ПЭ, $m_{\text{пэ}} = \rho \cdot A_0 \cdot l_0$.

С учётом полученных эквивалентных параметров ПЭ, представленной схеме на [рис. 1.5.5а](#) будут соответствовать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{F}_2 &= -n\dot{U}_1 + \frac{1}{j\omega C_{\text{м}}} \dot{v}_2 + j\omega m_{\text{э}} \dot{v}_2. \\ \dot{I}_1 &= j\omega C_0 \dot{U}_1 + n\dot{v}_2 \end{aligned} \quad (1.5.10)$$

Коэффициенты, заключённые в скобках формулы [\(1.5.10\)](#), представляют реактивные механические импедансы, имеющие, соответственно, емкостной и индуктивный характер:

$$X_{C_{\text{м}}} = \frac{1}{j\omega C_{\text{мэ}}}; \quad X_{L_{\text{м}}} = j\omega m_{\text{э}}$$

Для удобства дальнейшего анализа, воспользуемся принципом электромеханической аналогии и приведём механическую часть к электрической части, заменив скорость и силу на ток I_2 и напряжение U_2 , а механические импедансы – на электрические соответственно:

$$\begin{aligned} I_2 &= n\dot{v}_2; \quad U_2 = \frac{F_2}{n}; \\ X_{C_{\text{эм}}} &= \frac{X_{C_{\text{м}}}}{n^2} = \frac{1}{j\omega C_{1_{\text{э}}}}; \quad X_{L_{\text{эм}}} = \frac{X_{L_{\text{м}}}}{n^2} = j\omega L_{1_{\text{э}}}, \end{aligned} \quad (1.5.11)$$

где $C_{1\vartheta} = \frac{2}{\pi^2} \frac{l_0 n^2}{c_{33}^E A_0}$; $L_{1\vartheta} = \frac{m_{\vartheta\vartheta}}{2n^2}$ – эквивалентные значения ёмкости и индуктивности в схеме замещения ПЭ; $X_{C\vartheta\vartheta}$, $X_{L\vartheta\vartheta}$ – емкостное и индуктивное сопротивления, эквивалентные соответствующим механическим импедансам.

В этом случае эквивалентные схемы ПЭ, изображённые на рис. 1.5.5, становятся чисто электрическими четырёхполюсниками: на рис. 1.5.56 ПЭ представлен в режиме излучения, а на рис. 1.5.5в – в режиме приёма УЗС. В режиме излучения нагрузкой ПЭ является среда, в которую он излучает ультразвуковые колебания. Для размеров ПЭ, много больших длины волны в жидкости, эта нагрузка носит чисто активный характер (УЗ волна – «уносит» энергию УЗ колебаний ПЭ). В акустике это сопротивление определяется через отношение колебательного давления в волне к колебательной скорости $z_{0a} = \frac{P_2}{v_2}$, в нашей эквивалентной схеме мы определяем акустическое сопротивление для всей поверхности ПЭ, как отношение силы к скорости $z_0 = \frac{F_2}{v_2} = \rho \cdot C \cdot A_0$, где ρ , C – плотность и скорость ультразвука в среде (жидкости). Эквивалентом акустического сопротивления на электрической стороне будет омическое сопротивление $z'_0 = z_0/n^2$.

В режиме излучения ПЭ питается от генератора напряжения \dot{E}_1 с внутренним сопротивлением $R_{0и}$. Звуковое давление, развиваемое ПЭ в жидкости может быть определено путём расчёта выходного напряжения четырёхполюсника U_2 .

В режиме приёма на ПЭ действует акустическое давление, равное давлению нормальной волны на границе двух сред:

$$\dot{P}_2 = \frac{2z_{\vartheta\vartheta}}{z_{\vartheta\vartheta} + z_0} \dot{P}_0, \quad (1.5.12)$$

где $z_{\vartheta\vartheta}$ – акустический (волновой) импеданс ПЭ; \dot{P}_0 – давление в падающей волне.

Из выражения (1.5.12) следует, что колебательную силу F_2 на ПЭ можно представить, по аналогии с ЭДС, как результат воздействия на ПЭ механической движущей силы $\dot{E}_{mx2} = 2\dot{P}_0 A_0$ с внутренним сопротивлением z_0 , что и представлено на рис. 1.5.5в. Приведённые к электрической части эти величины примут вид $\dot{E}_{\vartheta\vartheta 2} = \frac{2\dot{P}_0 A_0}{n}$, $z'_0 = z_0/n^2$. В принципе,

для анализа работы электроакустического тракта УЗР нет необходимости перехода от электрических величин к механическим (при излучении), а затем, при приёме, обратно – от механических величин к электрическим величинам. Достаточно принимающий и излучающий ПЭП представить в виде электрических схем замещения. Но при этом учтём, что оба ПЭП – невзаимодействующие динамические цепи, поэтому между эквивалентными схемами необходимо установить буферный идеальный усилитель с коэффициентом усиления $2k$, где k – коэффициент ослабления сигнала при распространении в акустической среде (жидкости).

Как отмечалось ранее, рассмотренная нами модель ПЭП имеет упрощённый характер. Она не учитывает ряд конструктивных особенностей реальных ПЭП:

- Реальные ПЭП, со стороны излучающей поверхности ПЭ имеют защитные мембранные, которые одновременно служат просветляющим акустическим слоем, согласующим импеданс ПЭ с импедансом среды ([рис. 1.3.6](#) и пояснения к обозначеному рисунку).
- Соединение ПЭ с мембраной осуществляется через тонкий слой смазки, припоя или клея, толщина этих контактных слоев оказывает существенное влияние на амплитуду принимаемых сигналов.
- На тыльной стороне ПЭ, в ряде случаев, устанавливают демпфер, поглощающий энергию колебаний ПЭ, что обеспечивает формирование коротких УЗ импульсов.

Тем не менее, предложенная модель позволяет произвести **анализ** влияния ряда параметров ПЭП на качество его работы и **рассчитать** оптимальные их значения. В ряде случаев рассмотренная модель может быть уточнена, путем добавления новых электрических элементов.

1. Например, контактный слой, в силу малой толщины, представляется как чисто упругий элемент, и поэтому моделируется электрической ёмкостью $C_{\text{сл}} = C_{\text{мсл}} \cdot n^2 = \frac{l_{\text{сл}} n^2}{c_{33} A_0}$, где $C_{\text{мсл}}$ – механическая гибкость слоя, м/Н; $l_{\text{сл}}$ – толщина слоя; c_{33} – модуль упругости (при сжатии – растяжении). Указанная ёмкость включается **параллельно** выходу ПЭ (с его «механической» стороны).
2. Одна из задач оптимизации параметров электроакустического тракта – согласование приёмно-генерирующих цепей с пьезоэлектрическими преобразователями. Из электротехники известно, что максимальная передача энергии от генератора к нагрузке обеспечивается при выполнении условия $Z_{\Gamma} = Z_{\text{н}}^*$, где Z_{Γ} – выходное ком-

плексное сопротивление генератора; Z^*_h – комплексно-сопряжённое сопротивление нагрузки (если нагрузка имеет емкостной характер, то сопротивление генератора – должно иметь индуктивный характер).

Сопротивление нагрузки (т.е. ПЭ) определим, используя эквивалентную схему на [рис. 1.5.5б](#):

$$Z_{\text{пэ}} = \frac{X_{C0} \cdot (X_{C1} + X_{L1} + Z'_0)}{X_{C0} + X_{C1} + X_{L1} + Z'_0}.$$

Оптимальный режим работы ПЭ обеспечивается на резонансной частоте ω_0 , когда $X_{C1} = -X_{L1}$. Для этой частоты $Z_{\text{пэ}} = \frac{Z'_0}{1 + j\omega_0 C_0 Z'_0}$, следовательно, выходное сопротивление генератора может быть определено по формуле:

$$Z_g = \frac{Z'_0}{1 - j\omega_0 C_0 Z'_0}. \quad (1.5.13)$$

3. Оптимальное значение входного сопротивления приёмника для УЗР, по нашему мнению, должно определяться из соображений минимальной асимметрии ЭАТР ([Введение раздела 1.5](#)). Отметим, что пьезоэлектрические преобразователи и акустический тракт являются линейными четырёхполюсниками, и потому они обратимые четырёхполюсники. Следствием обратимости является абсолютно идентичные передаточные функции для этих четырёхполюсников при распространении УЗС в противоположных направлениях. Линейность ЭАТР нарушается при коммутации ПЭП: в УЗР с помощью ключевых схем мы поочерёдно подключаем каждый из ПЭП то к генератору импульсов, то к приёмнику УЗС. Очевидно, что, если при этих коммутациях будет обеспечено равенство сопротивлений приёмно-генерирующего тракта на излучение и приём сигналов, то весь ЭАТР будет линейным, и асимметрия будет устранена.

Влияние электрического режима на упругость ПЭ следует из уравнений пьезоэффекта [\(1.5.8\)](#). В выражении $\dot{F}_2 = -n\dot{U}_1 + \frac{1}{j\omega C_m} \dot{v}_2$ второй член определяет упругость ПЭ без учёта пьезоэффекта, а первый член определяет упругость, созданную напряжением на ПЭ, под действием которого происходит деформация диполей и создаются дополнительные внутренние силы упругости.

Рассмотрим влияние сопротивления приёмника Z_{Π} на упругость ПЭ. Учитывая, что входной ток приёмника $\dot{I}_1 = -\frac{\dot{U}_1}{Z_{\Pi}}$, из 1-го уравнения (1.5.10) найдем:

$$\dot{U}_1 = -\frac{nZ_{\Pi}X_{C0}}{Z_{\Pi}+X_{C0}} \dot{v}_2. \quad (1.5.14)$$

Подставив значение U_1 во второе уравнение системы (1.5.10) получим:

$$\dot{F}_2 = \left(\frac{n^2 Z_{\Pi} X_{C0}}{Z_{\Pi} + X_{C0}} + X_{CM}^E + X_{LM} + z_0 \right) \cdot \dot{v}_2, \quad (1.5.15)$$

где $X_{CM}^E = \frac{\pi^2}{2j\omega} \frac{c_{33}^E A_0}{l_0}$ – механический импеданс ПЭ, определяемый «обычной» упругостью пьезокерамики, не связанной с ПЭФ (при $U_1 = 0$).

Выражение в скобках (1.5.15) – это механический импеданс ПЭ. Первый его член представляет собой механический импеданс, полученный посредством приведения электрических сопротивлений Z_{Π} и X_{C0} к механической части и определяет «добавку» к импедансу при напряжении на ПЭ – отличном от нуля. При сопротивлении приемника $Z_{\Pi} = 0$, напряжение на ПЭ также равно 0 и составляющая импеданса X_{CM}^E определяется модулем упругости c_{33}^E . При увеличении сопротивления приёмника происходит рост напряжения на ПЭ и рост напряжённости электрического поля, что приводит к увеличению модуля упругости пьезокерамики. Несложно показать, что при $Z_{\Pi} \rightarrow \infty$, модуль упругости $c_{33}^E \rightarrow c_{33}^D$, что полностью соответствует физическому смыслу этих коэффициентов (c_{33}^D – модуль упругости пьезокерамики при отсутствии тока поляризации, т.е. при $\vec{D} = \text{const}$).

Аналогичная зависимость импеданса ПЭ от сопротивления генератора имеет место и для режима излучения. Для определения этой зависимости значение импеданса представим в виде $Z_{\Pi\text{Э}} = \Delta F_2 / \Delta v_2$. Из 1-го уравнения (1.5.10) найдем $\Delta \dot{I}_1 = \frac{\Delta \dot{U}_1}{X_{C0}} + n \Delta v_2$, с другой стороны $\Delta \dot{I}_1 = -\frac{\Delta \dot{U}_1}{Z_r}$, выразив значение $\Delta \dot{U}_1$ через скорость Δv_2 , из второго уравнения (1.5.10) получим:

$$\Delta \dot{F}_2 = \left(\frac{n^2 Z_r X_{C0}}{Z_r + X_{C0}} + X_{CM}^E + X_{LM} + z_0 \right) \cdot \Delta \dot{v}_2, \quad (1.5.16)$$

Таким образом, выходное сопротивление генератора оказывает на упругость ПЭ (а, следовательно, и на его резонансную частоту и задержку сигнала в ПЭП) точно такое же влияние, как и входное сопротивление приёмника, поэтому для устранения асимметрии электроакустического тракта требуется выравнивание указанных сопротивлений, и, что более важно, устранение зависимости этих сопротивлений от влияния параметров внешней среды.

1.5.3. Принцип взаимности для пьезоэлектрических преобразователей

Необходимость выравнивания сопротивлений генератора и приёмника (с целью уменьшения асимметрии ЭАТР) вытекает непосредственно из принципа взаимности [22], который применим ко всем линейным четырёхполюсникам. Как следует из [рис. 1.5.5](#), и в режиме излучения, и в режиме приёма схема замещения пьезоэлемента – это т-образная схема четырёхполюсника.

На [рисунке 1.5.6](#) эти схемы приведены в более простом виде.

Для т-образной схемы связь между токами и напряжениями во входных и выходных ветвях определяется через взаимные сопротивления:

$$I_2 = E_1/Z_{\text{взи}}; \quad I_1 = E_2/Z_{\text{взп}},$$

где $Z_{\text{взи}}$, $Z_{\text{взп}}$ – взаимные импедансы, соответственно, в режиме излучения и приема

Решая уравнения Кирхгофа для схем на [рис. 1.5.6](#), несложно определить:

$$\begin{aligned} Z_{\text{взи}} &= \frac{Z_{\text{г}}Z_2}{X_{C0}} + Z_{\text{г}} + Z_2 \\ Z_{\text{взп}} &= \frac{Z_{\text{п}}Z_2}{X_{C0}} + Z_{\text{п}} + Z_2, \end{aligned} \quad (1.5.17)$$

где $Z_2 = X_{C\text{эм}} + X_{L\text{эм}} + Z_0$. Для реального ПЭП эта цепочка импедансов может иметь более сложный вид, но для обоих режимов работы Z_2 будут абсолютно идентичны.

Передаточные функции для каждого ПЭ в режимах излучения и приема определяются через взаимные импедансы очевидными соотношениями:

$$W_{i\text{и}}(j\omega) = \frac{Z_0}{Z_{i\text{взи}}(j\omega)}; \quad W_{i\text{п}}(j\omega) = \frac{Z_{i\text{п}}}{Z_{i\text{взп}}(j\omega)} \quad (1.5.18)$$

где индекс i обозначает номер ПЭП: $i = 1$ – ПЭП1, излучающий по потоку и принимающий против потока жидкости; соответственно, $i = 2$ – это ПЭП2.

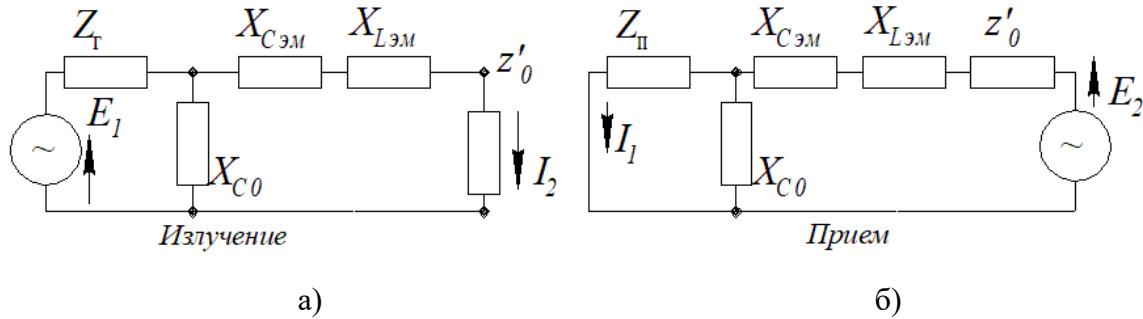


Рис. 1.5.6. Схемы замещения ПЭ в виде механических четырёхполюсников:
а) режим излучения; б) режим приёма УЗС

Из формул (1.5.17) и (1.5.18) следует, что при выполнении условий $Z_{1\Gamma} = Z_{1\Pi} = R_1$, $Z_{2\Gamma} = Z_{2\Pi} = R_2$, частотные характеристики при излучении и приёме УЗС для обоих ПЭП будут идентичны $W(j\omega)_{ii} = k \cdot W(j\omega)_{i\Pi}$. Следовательно, времена задержек сигналов в каждом ПЭП при излучении и приёме будут одинаковыми, и будут равными суммарные времена задержек сигналов при излучении по потоку и против потока жидкости.

2. Практическая часть

2.1. Лабораторная работа №1.

Средства и методы поверки счётчиков и расходомеров воды

2.1.1. Описание лабораторной поверочной установки

Лабораторная поверочная установка предназначена для проведения учебных занятий по изучению принципа действия эталонов расхода и получению навыков проведения поверки расходомеров и счётчиков количества жидкости. Схема установки, за небольшими исключениями, совпадает со схемой, изображенной на [рис. 1.2.1 \(раздел 1.2\)](#).

Лабораторная поверочная установка содержит накопительную ёмкость (бак 80 л) и мерную ёмкость (40 л), насос для создания расхода воды в гидравлической системе, рабочий участок (Ду 20 мм), на котором установлены эталонный и поверяемый расходомеры. За рабочим участком располагаются: регулирующий кран и трёхходовой кран, выполня-

ющий функцию переключателя потока: в одном из своих положений он направляет поток жидкости в накопительную ёмкость, в другом положении – направляет жидкость в мерную ёмкость. Мерная ёмкость установлена на весах, обеспечивающих точное измерение количества жидкости, прошедшей через расходомеры за время измерения. Управление работой поверочной установки производится от компьютера, с помощью специальной программы. В компьютер вводятся сигналы от переключателя потока, по которым определяется время заполнения мерной ёмкости. Компьютер измеряет указанный интервал времени и по значению массы воды и её температуре (заносятся в программу вручную), вычисляет эталонные значения объёма и расхода воды в установке. Показания с рабочих приборов за время измерения считываются и заносятся в программу в ручном режиме.

2.1.2. Задание для выполнения работы

1. Используя материал [раздела 1.2](#) настоящего пособия, ознакомиться с основными положениями и назначением поверки средств измерения, с устройством и принципом действия расходомерных установок.
2. Зарисовать схему лабораторной поверочной установки, объяснить назначение отдельных её узлов. *В отчёте приводится схема, нарисованная «от руки».* Под рисунком расшифровываются условные обозначения и даются краткие пояснения назначения узлов (*с помощью текстового редактора на компьютере*).
3. Занести в протокол (или черновик отчёта) выполнения лабораторной работы основные операции поверки счётчиков Ду 20.
4. Нарисовать схему подключения к компьютеру системы контроля и управления поверкой (СКУП).
5. Выполняя функции поверителя, произвести поверку ультразвуковых счётчиков, установленных на учебном лабораторном стенде. Функции оператора РУ выполняет преподаватель:
 - включение и выключение насоса;
 - установка поверочного расхода;
 - считывание результатов с поверяемого счётчика на компьютер;Поверку расходомера Ду 20 производить в следующих поверочных точках: (2,0; 0,6; 0,1 и 0,05) $\text{м}^3/\text{ч}$. В каждой точке произвести по три измерения. Результаты измерений занести в протокол.

6. Используя полученные протоколы поверки, рассчитать (оценить): случайную и неисключённую систематические погрешности поверяемого расходомера, а также предельное возможное значение погрешности поверяемого расходомера при доверительной вероятности 0,95 (коэффициент охвата равен 2, коэффициент Стьюдента примите равным 1). *Формулы для расчёта погрешностей заносятся в отчёт в рукописном виде. Расчёты допускается произвести в xls-файле протокола, а таблицу протокола скопировать в отчёт.*
7. Сделать и обосновать заключение о пригодности (непригодности) расходомера к эксплуатации. *Заключение и обоснование заносятся в отчёт в рукописном виде.*
8. *Оформление отчёта в электронном виде в текстовом редакторе, по установленной форме (титульный лист, задание, ...), рукописный материал вставляется в виде рисунков.*

Вопросы и задачи к лабораторной работе № 1

1. Что измеряют расходомеры и что измеряют счётчики жидкости (газа)? Единицы измерения расхода и количества жидкости и газа.
2. Какие технические средства используются для создания и стабилизации потока жидкости (воды) в расходомерных установках (РУ).
3. С помощью каких СИ расходомерные установки воспроизводят, хранят и передают единицы массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости (какие основные СИ содержит РУ?).
4. Что такое поверка и чем она отличается от калибровки СИ?
5. Назначение поверочных схем СИ (и, в частности, – для СИ расхода и объёма жидкости).
6. Что должен содержать протокол поверки расходомера (счётчика объёма)?
7. В таблице 2.1 приведены результаты экспериментальной проверки погрешности расходомера. В каждой поверочной точке производится по три измерения. Погрешность прибора в каждой точке оценивается как погрешность многократных измерений. Требуется рассчитать погрешности единичных измерений δ_i , и оценить случайную и систематическую составляющие погрешности, а также полную погрешность измерения в каждой поверочной точке.

Таблица 2.1

Результаты экспериментальной проверки погрешности счетчика воды по функциям измерения расхода и объема

$T, ^\circ\text{C}$	$R_o, \text{т/м}^3$	$M_o, \text{кг}$	$V_o, \text{л}$	$T_{\text{изм}}, \text{с}$	$Q_o, \text{м}^3/\text{ч}$	$V_1, \text{л}$	$\delta_i, \%$
24,1	0,9965	27,88	27,978	54,714	1,841	27,98	
25,1	0,9962	27,73	27,836	55,590	1,803	27,94	
27,1	0,9957	29,19	29,320	57,886	1,823	29,64	
27,5	0,9955	27,90	28,025	108,714	0,928	27,98	
27,5	0,9955	27,81	27,936	108,590	0,926	27,94	
27,5	0,9955	29,45	29,587	114,886	0,927	29,64	
27,7	0,9955	10,10	10,146	337,774	0,108	10,34	
27,7	0,9955	10,23	10,276	343,726	0,108	10,47	
27,7	0,9955	10,33	10,376	345,726	0,108	10,57	

Погрешности основных средств измерения в расходомерной установке приведены в таблице 2.2. Требуется **оценить** погрешность измерения расхода и объема эталоном для поверочных точек, указанных в таблице 2.1.

Рекомендация. Измерение эталонного расхода и объема производится косвенным методом согласно формулам (1.2.1) и (1.2.2). Поэтому и погрешность следует рассчитывать по формуле для погрешности косвенных измерений.

Таблица 2.2

Погрешности средств измерения, используемых в расходомерной установке в качестве эталонов

	Основные средства измерения РУ	Пределы основной погрешности
1	Весы	$\pm 5 \text{ г}$
2	Таймер	$\pm 2 \cdot 10^{-4} \%$
3	Формирователь времени измерения (разновременность переключателя потока)	$\pm 0,05 \text{ с}$
4	Термометр (измерение температуры воды)	$\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2. Лабораторная работа №2.
Исследование работы ультразвуковых расходомеров
время импульсного типа

2.2.1. Цель работы

- Изучение основных узлов ультразвуковых расходомеров: первичных преобразователей УЗР и пьезоэлектрических преобразователей, входящих в их состав;

- Знакомство с основными характеристиками УЗ сигналов, используемых во времязимпульсных УЗР;
- Исследование общего принципа действия времязимпульсного УЗР.

2.2.2. Задание на проведение исследований

1. В качестве методического пособия для выполнения работы использовать материал, изложенный в [разделах 1.3](#) и [1.5](#).
2. Используя комплект деталей ПЭП (т.е. ПЭП в разобранном виде) и рисунок ПЭП с деталями в «разнесённом виде», сделать эскиз сборочного чертежа ПЭП.
3. Объяснить назначение основных элементов ПЭП:
 - Пьезоэлемент (ПЭ) (ПЭ – как обратимый электромеханический преобразователь механической энергии в электрическую и обратно, электрической энергии – в механическую);
 - Корпус ПЭП и крышка, зачем необходима герметизация ПЭ? Какую дополнительную функцию (кроме герметизации) выполняет «донышко» стакана ПЭП;
 - Почему электроды ПЭ подключаются к электронному блоку расходомера коаксиальным кабелем (или другим экранированным кабелем)?
 - Определите по рисунку, каким образом осуществляется контакт центральной жилы кабеля с внутренним электродом ПЭ;
4. Используя функциональную схему УЗР, изображённую на лабораторном стенде и её аналог на [рис. 2.2.1](#), получите осциллограммы сигналов в контрольных точках К01, К1 и К2 (излучаемый электрический импульс, принимаемый сигнал и сигнал на выходе компаратора).
5. Измерьте амплитуду излучаемого и принимаемого сигналов (учтите при этом, что коэффициент усиления приёмного устройства равен 20). Рассчитайте сквозной коэффициент передачи электроакустического тракта (ЭАТР).
6. Измерьте с помощью осциллографа время распространения УЗС в ЭАТР. Сравните результат измерения с показаниями расходомера, при работе его в режиме измерения времени распространения. (Перевод прибора в указанный режим осуществляется преподавателем).

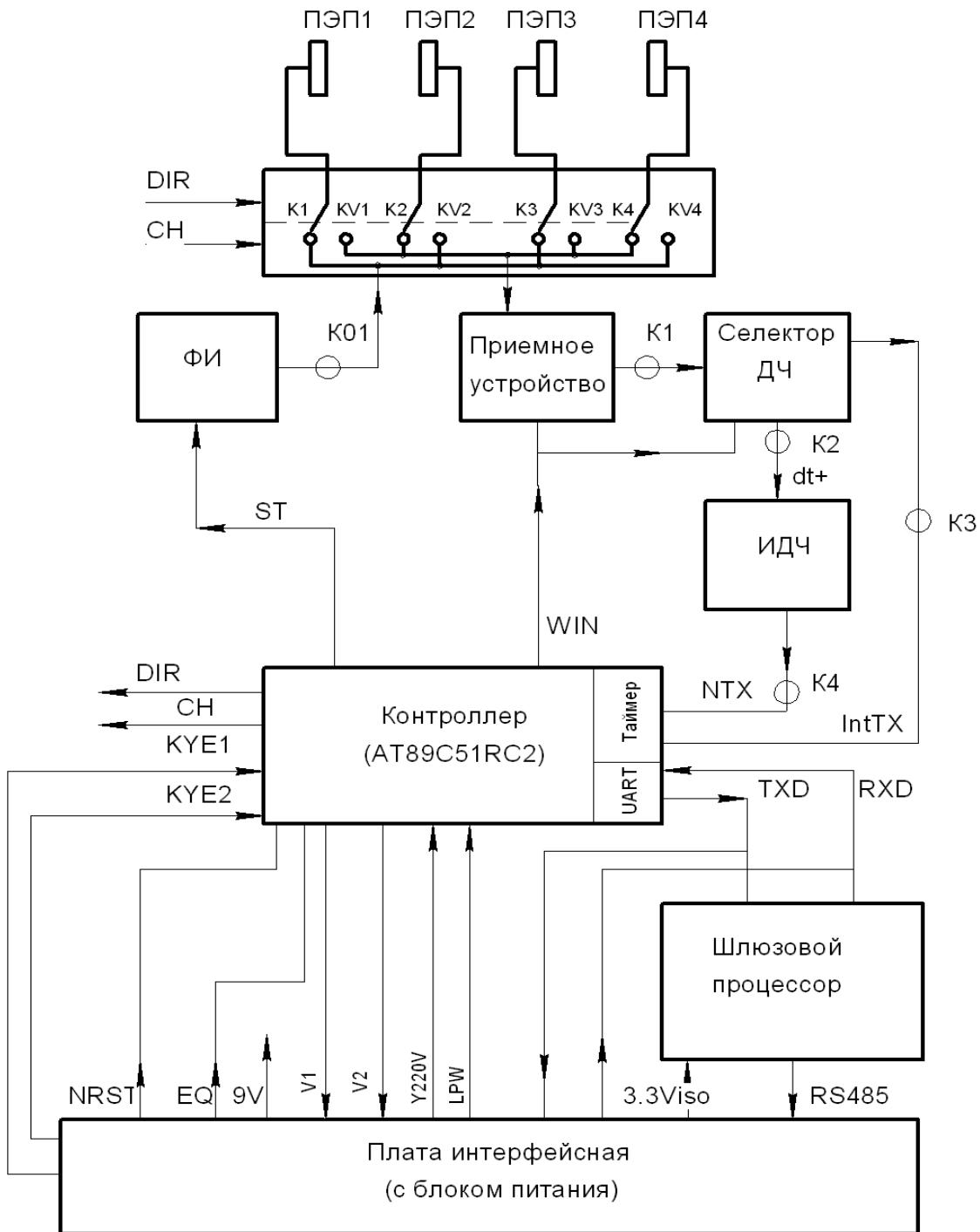


Рис. 2.2.1. Функциональная схема расходометра ИРВИКОН СВ-200

Обозначения на рисунке: ФИ – формирователь импульсов, ИДЧ – интегратор дробной части; K_i – контрольные точки ($i = 01, 1, 2\dots$). Сигналы: ST – «старт», Izm – единичный такт измерения, WIN – «окно», DIR, CH – сигналы управления коммутатором («направление» и «канал»); dt – дробная часть времени распространения (T_x); NTX – растянутая дробная часть T_x ; IntTx – целая часть T_x ; KYE1,2, NRST, EQ – сигналы управления режимом работы расходометра и вывода информации на дисплей; V1, V2 – импульсные выходы счетчика объема; TXD, RXD – выходные и входные цифровые сигналы универсального асинхронного приёмо-передатчика (UART); RS485 – цифровой выход гальванически развязанного интерфейса RS485.

2.2.3. Содержание отчёта о выполненной практической работе

Отчёт должен содержать протокол выполненных исследований по пунктам 1...6 задания (эскизы, схемы осциллограммы, расчёты и т.п.) с пояснениями и выводами.

Вопросы и задачи к лабораторной работе № 2

1. В таблице [2.3](#) приведены параметры первичного преобразователя расхода. Необходимо рассчитать среднее время распространения УЗС в акустическом тракте расходомера и разность времён распространения, для заданных значений скорости жидкости.
2. Определить требования к допустимой погрешности ИИВ, если известно, что расходомеры должны измерять скорость $v = 0,03$ м/с с погрешностью не более 2 %.
2. Какую скорость жидкости измеряют однолучевые УЗР? Как математически определяется средняя скорость жидкости по сечению трубопровода при известном распределении скорости жидкости по сечению трубопровода?
3. Определите понятие «поток вектора скорости через сечение трубопровода», размерность данной величины и её связь с количеством жидкости, протекающей по трубопроводу.
4. На [рисунках 1.3.2](#) изображена конструкция двухлучевого ППР. Покажите в каких гнёздах находятся преобразователи ПЭП1, ПЭП2, ПЭП3 и ПЭП4, если известно, что ПЭП1 и ПЭП3 излучают по потоку жидкости.
5. Используя рисунок ПЭП ([рис. 1.3.6](#)), объясните назначение входящих в него элементов: пьезоэлемента, плоского контакта, эластичной и изоляционной шайб, тарельчатых пружин, прижимного винта и крышки ПЭП.
6. Почему нельзя устранить гидродинамическую погрешность в процессе калибровки расходомера на расходомерной установке?
7. С какой целью используются многолучевые УЗР? Почему применение многолучевой конструкции позволяет уменьшить влияние эпюры скоростей потока (уменьшить гидродинамическую погрешность)?

Таблица 2.3

Значения параметров первичного преобразователя расхода

	Наименование параметра ППР	Вариант1	Вариант2	Вариант3
1	Диаметр трубопровода D , мм	50	100	150
2	Угол наклона осей ПЭП α , град.	35	45	45
3	$\cos \alpha$	0,8192	0,7071	0,7071
4	$\sin \alpha$	0,5736	0,7071	0,7071
5	Суммарная длина карманов l_k , мм	25	25	25
6	Скорость ультразвука C	1482	1482	1482
7	Скорость жидкости v , м/с	3	2	1
Рассчитываемые параметры				
8	Время распространения, мкс			
9	Разность времен, нс			

2.3. Лабораторная работа № 3.**Исследование измерителя интервалов времени УЗР****2.3.1. Цель работы**

Цель данной работы:

- сформировать наглядные представления о принципе действия **измерителей интервалов времени** в современных ультразвуковых расходомерах;
- познакомиться с требованиями, предъявляемыми к электронным узлам УЗР, и техническими решениями, реализующие данные требования;
- дать навыки экспериментального исследования электронных узлов измерительных приборов с помощью цифровых осциллографов;

2.3.2. Задание на проведение исследований

Исследования работы электрической схемы формирователя измеряемых интервалов времени и измерителя интервалов времени, использующего метод «растяжки» дробной части.

1. До проведения лабораторной работы ознакомиться с принципом действия УЗР. Изучить назначение формирователя импульсов, коммутатора и приёмника сигналов. Знать, как формируется ин-

тервал времени, равный времени распространения УЗС в жидкости (измеряемой среде) и основные методы измерения данных интервалов времени. При подготовке к лабораторной работе использовать материал, изложенный в [разделе 1.4](#).

- Объяснить принцип действия измерителя интервалов времени, использующего метод растяжки дробной части (см. [раздел 1.4.2](#)). Построить и объяснить диаграммы работы формирователя целой части и селектора дробной части T_X (т.е. описать причины начала и окончания этих интервалов).
- Получить осциллограммы принятого УЗС и импульсов, сформированных компараторам нулевого уровня (компаратором с изменяющимся порогом срабатывания).
- Получить осциллограммы сформированных интервалов времени: измеряемого интервала T_X , целой части T_X и его дробной части.
- Получить осциллограммы калибровочных импульсов, синхронизировав развёртку импульсами тактовой частоты.

2.3.3. Расчётная часть

- Используя исходные данные таблицы [2.4](#) рассчитать:
 - Значение целой части интервала времени T_g ;
 - Значение дробной части интервала времени $T_{\text{др}}$;
 - Используя функцию преобразования интегратора дробной части $U_{\delta t} = \frac{I_3}{C} \delta t$, рассчитать значения напряжений на выходе интегратора дробной части (см. диаграммы работы ИИВ на [рис. 1.4.3](#)).
- Исходя из допустимой погрешности измерения времён распространения $\Delta(\Delta T) = 10^{-10}\text{с} = 0,1 \text{ нс}$, рассчитать допустимую относительную погрешность преобразования $T_{\text{др}}$ в напряжение $\Delta U_{\text{dt}}/U_{\text{dt}}$.

Формулы для расчета:

- $T_g = \left[\text{Int}\left(\frac{T_X}{t_0}\right) + 2 \right] \cdot t_0$ – целая часть интервала времени T_X , измеряется без погрешности дискретности;
- $\delta t = T_g - T_X$ – дробная часть интервала времени T_X , измеряется посредством преобразования в напряжение $U_{\delta t}$;
- $U_{\delta t} = \frac{I_3}{C} \delta t$, где I_3 – ток заряда конденсатора интегратора, C – ёмкость конденсатора интегратора дробной части.

Таблица 2.4

Исходные данные для расчёта измерителя дробной части

	Исходные данные				Рассчитываемые параметры			
	Время Tx , мкс	t_0 , мкс	I_3 , мА	C , нФ	T_g , мкс	$t_{\text{др}}$, мкс	$U_{\delta t}$, В	$\Delta U_{\delta t}$, В
1	75,561	0,5	20	4,0				
2	75,491	0,5	20	4,0				
3	100,492	0,25	10	2,0				
4	100,751	0,25	10	2,0				

2.3.4. Содержание отчёта по лабораторной работе

Отчёт должен содержать:

1. Функциональную схему исследуемого расходомера и краткое описание его принципа действия.
2. Диаграммы управляющих сигналов DIR и CH, диаграммы работы ключей KV_i и K_i (замкнут – «1», разомкнут – «0»).
3. Функциональную схему селектора дробной части и диаграммы его работы.
4. Функциональную схему измерителя дробной части и диаграммы его работы.
5. Полученные в процессе работы осциллограммы формирования сигнала «Stop», импульса дробной части и преобразователя дробной части в напряжение (ИДЧ).
6. Осциллограммы калибровочных импульсов и напряжения на выходе ИДЧ
7. Результаты расчётов по пункту [2.3.2.](#)

Вопросы и задачи к лабораторной работе № 3

Для защиты ЛР № 3 необходимо знать:

1. Принцип действия, исследуемого УЗР:
 - Как формируются интервалы времени, определяющие времена распространения УЗС по потоку и против потока жидкости (прохождение сигналов в электроакустическом тракте УЗР по потоку и против потока жидкости).
 - Как изменяется направление распространения сигналов в электроакустическом тракте УЗР по потоку и против потока жидкости).

2. Основные величины (факторы), влияющие на точность измерения времён распространения УЗС (погрешности формирования интервалов времени $T_{X1,2}$, погрешности выделения дробной части ...).
3. Почему для формирования «СТОП»-сигнала используется момент пересечения входным сигналом «0-го» уровня ([раздел 1.4.1, рис. 1.4.1](#)).
4. Как работает компаратор с коммутируемым порогом срабатывания? Почему начальный порог срабатывания выбирается больше нулевого уровня?
5. Как работают счётные D-триггеры, и как с помощью них реализуется схема селектора дробной части.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативные документы

1. ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения.
2. ГОСТ Р ЕН 1434-1-2011. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. Теплосчетчики. Ч. 1. Общие требования.
3. РМГ 51-2002 ГСИ. Документы на методики поверки средств измерений. Основные положения.
4. ГОСТ Р 8.885-2015. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Эталоны. Основные положения.
5. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
6. ГОСТ 50193.1-98 Измерение расхода воды в закрытых каналах. Счетчики холодной питьевой воды. Технические требования.

Основной

7. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989.

Дополнительный

8. Диценко, В.И. Метрология и электроизмерительная техника / В.И. Диценко, И.Н. Желбаков, В.Ю. Кончаловский. – М.: Изд-во «МЭИ», 1991.
9. Шафрановская, З.М. Ультразвуковые частотно-импульсные расходомеры/ З.М. Шафрановская, Л.И. Журавлев, Е.С. Крысанова // Приборы и системы управления. – 1972. – № 11. – С. 15-16.
10. Киясбейли, А.Ш. Частотно-временные ультразвуковые расходомеры и счетчики. – М.: Машиностроение, 1984.
11. Громов, Г.В. Бесконтактные методы измерения расхода жидкости в напорных и безнапорных трубопроводах/ Г.В. Громов, А.В. Озеров, М.Н. Шафрановский // Мир измерений. – 2004. – № 1. – С. 4-8.
12. Антонов, Н.Н. Многоканальный частотно-временной ультразвуковой расходомер/ Н.Н. Антонов, Е.В. Дмитриев, В.А. Решетников // Измерительная техника. – 1976. – № 10. – С. 45-46.
13. Микросхема TDC-GP22. Универсальный двухканальный времязадающий преобразователь специально для ультразвуковых счётчиков расхода воды, Acam Mess-Electronic GmbH. – URL: <https://www.sciosense.com/tdc-gp22-ultrasonic-flow-converter/>

14. Микросхема преобразователя расхода MAX35103. Reduced Power Time-to-Digital Converter with AFE, RTC, and Flash. Maxim Integrated Products Inc, Analog Devices. – 2015.
15. Микросхема время-цифрового преобразователя для определения расхода время-разностным методом TDC7200. Time-to-Digital Converter for Time-of-Flight Applications in LIDAR, Magnetostrictive and Flow Meters. Texas Instruments. SNAS647D. – February 2015. – Revised March 2016.
16. Gerasimov, S., Zhelbakov, I. Signal Filtering as a Way of Digital Data Processing to the Accuracy Increase of Ultrasonic Liquid Flow Measurement by the Zero-Crossing Method // Proceedings of The 2nd International Conference on the Applications of Information Technology in Developing Renewable Energy Processes and Systems (IT-DREPS 2017). – 2017. – Amman, Jordan. – P. 3-8.
17. Gerasimov, S., Glushnev, V., Panov, M. Applications of Digital Signal Processing Methods in Ultrasonic Flowmeters // Proceedings of IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (INFORINO-2018). – 2018. – Moscow, Russia. – P. 399–404.
18. Гущина О.А. Временные корреляционные методы оценки задержки комплексных сигналов, некратной периоду дискретизации, на основе полиномиальной интерполяции/ О.А. Гущина, Т.Я. Шевгунов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2020. – № 12. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec20/19/text.pdf> (дата обращения: 20.10.2023).
19. Gerasimov, S.I., Glushnev, V.D., Panov, M.M. Model of Piezoelectric Transducers for the Metrological Characteristics Study of Ultrasonic Measuring Instruments // IEEE Proceedings of the 5th International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino-2020). – 2020. – Moscow, Russia.
20. Gerasimov S., Glushnev V., Panov M. Influence of Dynamic Characteristics of Electro-Acoustic Path on Ultrasonic Flowmeters Accuracy // IEEE Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2019). – 2019, Sochi, Russia.
21. Аронов, Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики / Б.С. Аронов. – Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1990.
22. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для электротехнических, энергетических, приборостроительных специальностей вузов / Л.А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1996.
23. Свердлин, Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны / Г.М. Свердлин. – Л.: Судостроение, 1988.

Учебное электронное издание

Герасимов Сергей Игоревич
Глушнев Владимир Дмитриевич
Долгачева Екатерина Александровна
Чумаченко Дмитрий Анатольевич

Редактор О.А. Бешенцева
Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Сведения о программном обеспечении, которое использовано для создания ЭИ:

ОС Windows 8.1 Pro, текстовый редактор Office Word 2013, редактор электронных таблиц Excel 2013, средство редактирования растровых графических изображений Paint, система трёхмерного моделирования КОМПАС-3D, средство для математических расчётов и моделирования MatLab 2015b.

Сведения о технической подготовке материалов для ЭИ:

Для выполнения лабораторных работ используется стандартное программное обеспечение для ОС Windows: Microsoft Office 2003/2007/2010 или выше (текстовый редактор Word, редактор электронных таблиц Excel) или их аналоги; электронный калькулятор, встроенный в систему; программный пакет для инженерных и математических расчётов MathCAD, MatLab или их аналоги.

Дата подписания – 26.02.2024

Объём издания – 3,75 Мбайт.

Тираж – 10 электронных оптических дисков DVD-R.

Издательство МЭИ
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр.1
izdatmpei@gmail.com