

И.С. КОВЧИН

АВТОНОМНЫЕ
ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ
СРЕДСТВА
ИЗМЕРЕНИЙ



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1991

Рецензент канд. техн. наук И. С. Степанюк

Рассмотрены теоретические и практические вопросы разработки и применения автономных цифровых океанографических средств измерения, в том числе телеизмерительных гидрологических комплексов для прибрежных морских наблюдений. Особое внимание уделяется их метрологическому и программному обеспечению, совершенствованию датчиков, измерительно-кодирующих преобразователей и структурным методам повышения точности измерений.

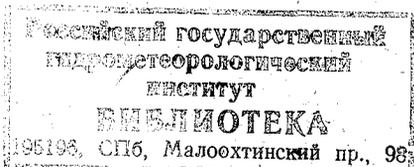
Приводятся описания принципов действия и конструкций всех моделей измерителей типа АЦИТ, нашедших широкое применение при гидрофизических исследованиях в СССР. Впервые в систематизированном виде изложены вопросы использования микропроцессорной техники в океанографическом приборостроении и реализации на ее основе измерительно-вычислительных комплексов, работающих от ограниченных по емкости и мощности источников питания.

Рассчитана на широкий круг специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией океанографической измерительной аппаратуры. Будет полезна студентам гидрометеорологических вузов и техникумов.

In the book "Autonomous oceanographic measuring instruments" by I. S. Kovchin theoretical and practical problems of developing and exploiting of automatic ocean instruments and telemetric shelf stations are examined. Special attention is paid their metrological and computer support, improving of sensors, measuring transformers and methods of the increasing accuracy.

There are given descriptions, principles of designing and constructions of all models instrument ACIT, which primarily used in hydrophysical investigations in the USSR. The problems using of microprossion technology in oceanographic instruments and measuring systems functioned of limited energy source mentioned in this book at first time.

The book will usefull primarily for specialists engaged in developing and exploiting oceanographic instruments and also for teachers and students of hydrometeorological higher schools.



К 1805040600-041
069(02)-91 35-91

© И. С. Ковчин, 1991 г.

ISBN 5-286-00639-6

ПРЕДИСЛОВИЕ

Успешное изучение и, что более важно, освоение природных ресурсов Мирового океана невозможно без умелого использования широкого круга технических средств. Важное место среди них занимает измерительная аппаратура, включающая в себя информационно-измерительные системы (ИИС), измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) и отдельные приборы, работа которых основана на контактных и дистанционных методах измерения. Особую роль во всем многообразии указанных средств измерения занимают средства измерения гидрофизических величин, располагаемые на автономных буйковых станциях. Их характерной особенностью является необходимость функционирования в автоматическом режиме длительное время от независимых, ограниченных по емкости и мощности батарейных или аккумуляторных источников энергии, что влечет за собой определенную специфику в принципах построения и методике применения такой техники. В соответствии с этим данные измерительные приборы можно выделить в особый класс так называемых автономных средств измерения.

Область применения автономной измерительной аппаратуры в океане исключительно обширна. С ее помощью получают информацию для прогностических и исследовательских целей, в том числе при изучении климата океана и его взаимодействия с атмосферой. Как показала практика, только прямые инструментальные наблюдения могут дать достоверные данные о физических процессах, происходящих в Мировом океане. Исходя из этого все крупнейшие натурные эксперименты последнего времени как национального, так и международного масштабов (ПОЛИМОДЕ, «Разрезы», ПОЛЭКС, ДЖЕЙСИН, ПИГАП) ориентированы на экспериментальные исследования с привлечением большого числа измерительной аппаратуры, устанавливаемой на буйковых станциях. Важную роль играют автономные океанографические измерители и для интерпретации данных, получаемых дистанционными методами наблюдения за океаном, включая спутниковые наблюдения. Только организация подспутникового мониторинга и привлечение информации с буйковых станций позволяют достичь репрезентативности этих наблюдений [65, 99].

В настоящее время автономные средства измерения, наряду с чисто исследовательскими задачами, стали широко использоваться для решения прикладных задач океанологии, связанных с освоением минеральных и биологических ресурсов Мирового океана. Наблюдения за гидрологическим режимом и контроль за

экологической чистотой в местах добычи железомарганцевых конкреций и металлоносных осадков, а также в районах интенсивного рыболовства и морских плантаций наиболее эффективно могут быть выполнены только с привлечением автономных измерителей. Эти приборы необходимы и при организации службы предупреждения об особо опасных явлениях в океане (например, цунами) [31, 116].

Однако, несмотря на столь несомненную важность автономных средств измерения, степень обеспеченности океанографических работ в СССР такой техникой остается явно недостаточной. Часто на практике применяются не только морально, но и физически устаревшие приборы. Главная причина этого — отсутствие новой техники, а также недостаточная подготовленность океанологов для работы с ней. В этой связи автор поставил перед собой задачу ознакомить читателя с результатами практической работы по созданию новых образцов современных средств измерения, методикой их применения и спецификой эксплуатации, правилами обработки и интерпретации получаемых данных.

В предлагаемой монографии изложены с общих позиций принципы построения и системного проектирования автономных цифровых средств измерения гидрофизических величин, вопросы их метрологического и программного обеспечения с учетом специфики области применения. При этом был учтен отечественный и зарубежный положительный опыт по созданию аналогичной техники, которому посвящены работы В. С. Колесникова, А. Н. Парамонова, Н. Брауна, М. Вейлера и других [65, 89, 91, 98, 123, 154]. В равной степени это относится к терминологии, используемой в монографии. В частности, в монографии довольно широко применяются общепринятые и укоренившиеся в практике термины «параметр» применительно к гидрофизическим величинам, характеризующим свойства океана, и «датчик». Последний представляется автору наиболее удобным для обозначения в автономных приборах совокупности океанографических измерительных преобразователей, объединенных в единый конструктивный узел, помещенный *in situ* на объекте измерения [66].

Представленный в монографии материал в основном ограничен вопросами, связанными только с цифровыми автономными приборами. Это вытекает из современных тенденций развития измерительной техники. В последнее время указанные тенденции прежде всего направлены на широкое использование цифровой, микропроцессорной и вычислительной техники при построении средств измерения (СИ), что нашло свое отражение в современном океанологическом приборостроении.

В основу монографии положены результаты разработок и исследований автора, выполненных в 1976—1988 гг. в ААНИИ, по созданию комплекса измерительных средств типа АЦИТ и его внедрению в практику работ мореведческих организаций СССР.

Значительный вклад в эту работу сделан канд. техн. наук Р. А. Балакиным, в соавторстве с которым написаны п. 2.1—2.3,

3.1. В создании новой техники, описываемой в данной монографии, участвовали С. А. Юновидов, В. С. Харитonenков и А. Н. Зушинский. Автор считает своим долгом поблагодарить канд. техн. наук В. И. Прохорова, С. Г. Савина, канд. физ.-мат. наук В. М. Кушнера, любезно предоставивших материалы по измерителям течения «Поток», ДИСК, а также всех тех, кто оказал техническую помощь в оформлении рукописи.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОНОМНЫХ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Характеристика объекта измерения

При изучении океана используется различная измерительная аппаратура. К ней относятся гидрологические и гидрохимические зонды, буксируемые комплексы, приборы для измерения оптических характеристик морской воды, техника дистанционных измерений, а также автономные средства измерения [116].

В результате получают обширную информацию о целом комплексе гидрофизических величин, которую далее накапливают, подвергают обработке и научному анализу с целью выявления новых физических закономерностей и решения прикладных задач. К таким гидрофизическим величинам относятся: температура, гидростатическое и звуковое давление, электрическая проводимость и соленость воды, скорость звука, скорость и направление течений, характеристики турбулентности и внутренних волн, особенности слоистых структур, концентрации взвесей и растворенных в воде газов. Указанные величины обычно изменяются случайным образом в зависимости от времени и пространственных координат. Поэтому океан, как объект измерения в самом общем случае может быть представлен в виде случайного векторного поля вида [103]:

$$\mathbf{x}(t, \mathbf{r}), \quad (1.1)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — вектор измеряемых гидрофизических величин; t — время; \mathbf{r} — вектор пространственных координат.

В тех случаях, когда необходимо выполнять длительные много-суточные непрерывные наблюдения за процессами в океане, применяют автономные автоматические средства измерения (СИ). Это прежде всего имеет место при исследованиях гидрофизических полей океана мезомасштабной изменчивости [89, 97].

Мезомасштабные процессы в океане, вызываемые приливными и инерционными колебаниями, а также изменениями интенсивности солнечной радиации, имеют пространственные масштабы от 100 м до 50 км, а временные — от нескольких часов до нескольких суток [76, 85]. Для их наблюдения не подходят разовые зондирования в изучаемом районе, их масштаб не позволяет также репрезентативно использовать дистанционную спутниковую и самолетную аппаратуру. Наблюдения за физическими процессами такой пространственно-временной изменчивости требуют долговременных измерений гидрофизических величин, выполняемых в течение нескольких месяцев в различных точках океана, расположенных на расстоянии 10—60 км друг от друга. Применение для этих целей

обслуживаемых или даже стационарных станций либо просто невозможно, либо экономически не оправдано. Поэтому исследования мезомасштабных процессов выполняются автоматической измерительной аппаратурой, устанавливаемой на автономных океанографических буйковых станциях. С помощью такой аппаратуры возможно в течение длительного интервала времени получать и накапливать информацию о скорости V и направлении α течения в океане, о температуре T и электрической проводимости R на нескольких горизонтах, а также гидростатическом давлении P .

Результаты измерений этих величин характеризуют собой основные гидрофизические свойства океана в точке наблюдения [89]. С их помощью также определяются соленость S , удельная теплоемкость и плотность ρ морской воды, вектор V течения, скорость $C_{зв}$ звука в воде, уровень h и элементы волнения.

В соответствии с этим океан как объект измерения применительно к автономным СИ может быть представлен как

$$x(t, r) = (V, \alpha, T, R, P, t, r).$$

Тогда процедура измерения параметра y_i океана применительно к конкретному типу СИ выражается следующим образом:

$$y_i = Q_i [x(t, r)], \quad (1.2)$$

где Q_i — оператор, реализуемый в данном СИ.

В свою очередь Q_i представляет собой функцию преобразования F_i информативного компонента x_i поля x и функцию влияния ψ_i всех остальных неинформативных компонентов этого поля $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$, а также дополнительных факторов, оказывающих влияние на работу аппаратуры данного СИ, такие как напряжение E_n источника питания, магнитные и электромагнитные поля, пространственное положение r_i корпуса подводного аппарата и т. п., которые могут быть заданы одним вектором приборных величин Π . Тогда модель (1.2) преобразования векторного поля x в автономном СИ может быть описана следующим соотношением:

$$y_i = F_i [x_i(t, r_i)] + \psi_i [x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n, t, r, \Pi], \quad (1.3)$$

Таким образом, первое слагаемое в формуле (1.3) будет определять основную и динамическую погрешность рассматриваемого СИ, а второе — его дополнительные погрешности от влияющих факторов и вида пространственных характеристик.

Автономная измерительная аппаратура также используется для подспутникового мониторинга при изучении гидрофизических процессов в океане синоптической изменчивости, которые характеризуются периодами колебания от 3 сут до 3 мес при горизонтальных масштабах 50—300 км. Такого рода техника дополнительно привлекается и для исследования внутренних и поверхностных волн в океане, процессов эволюции его микроструктуры в тех случаях, когда их временные масштабы составляют несколько десятков минут.

В соответствии с этим полный временной масштаб гидрофизических процессов, исследуемых с помощью автономной аппаратуры, лежит в пределах от нескольких минут до 2—3 мес. Для их изучения приходится выполнять непрерывные наблюдения длительностью от 10 сут до года. Отсюда вытекают требования к срокам автономной работы рассматриваемых СИ, которые стремятся максимальным образом увеличить. Поскольку с помощью автономных приборов приходится исследовать гидрофизические процессы различных масштабов, в них предусматривают разную дискретность измерений, минимальная из которой не превышает, как правило, 10 мин и применяется при изучении мелкомасштабных процессов.

Приведенные пространственно-временные характеристики также определили требования к погрешностям и диапазонам измерения рассматриваемых СИ. При этом одновременно учитывались диапазоны изменений каждой из измеряемых гидрофизических величин. Согласно многочисленным экспериментальным данным [76, 85, 95, 96], диапазоны изменчивости перечисленных основных океанографических величин находятся в определенных границах.

Скорость течения не превышает в открытых районах океана 2,5 м/с, в прибрежной зоне — 4,5 м/с — при изменении направления на все 360°, температура изменяется от —2,5 до 36,5 °С, электрическая проводимость R морской воды по отношению к нормальной — от 0,1 до 1,3. Колебания уровня в открытых районах океана, обусловленные как приливыми явлениями, так и волнами цунами, не превосходят 1 м. Именно на основе приведенной информации выбраны диапазоны измерения применяемых сейчас на практике автономных СИ. В большинстве своем их диапазоны соответствуют или перекрывают границы возможной изменчивости измеряемой величины [68, 89, 97].

Для определения требуемых значений погрешностей рассматриваемых СИ принимают во внимание не полную, а в основном среднюю квадратическую изменчивость измеряемых гидрофизических величин, характерную для мезомасштабных и синоптических процессов в океане. Согласно данным работы [90] и других литературных источников, оценки средней квадратической изменчивости температуры σ_T и солёности σ_S для различных типов гидрофизических процессов примерно соответствуют сведениям, приведенным в табл. 1.1. Из нее следует, что если задаться 10 %-ным уровнем значимости инструментальных погрешностей и ограничиться наблюдением только мезомасштабных процессов, то предельные

Таблица 1.1

Среднее квадратическое отклонение температуры σ_T и солёности σ_S для различных типов гидрофизических процессов

Процессы . . .	Мелко- масштабные	Мезо- масштабные	Синоптические	Климатические
σ_T °С	0,06—0,30	0,28—0,62	0,52—0,76	1,66—2,25
σ_S ‰	0,03—0,37	0,09—0,20	0,15—0,60	0,8—2,0

значения случайных составляющих погрешностей автономных средств измерения температуры могут не превышать $0,03^\circ\text{C}$, а солености — $0,01\text{‰}$ или единиц шкалы практической солености, 1978. Последнее условие выполняется, если предельные значения погрешностей измерения электрической проводимости R в относительных величинах не превышают $0,025\%$; температуры — $0,1^\circ\text{C}$, давления — $3 \cdot 10^{-2}$ МПа [49].

При выборе систематических составляющих погрешностей измерения температуры, электрической проводимости и давления автономных приборов обычно исходят из требований временной стабильности показаний этих СИ на весь ожидаемый период их постановки на буйковые станции. Максимальная длительность этих постановок имеет место при изучении синоптической изменчивости гидрофизических полей океана. Если при этом ограничиться тем же 10% -ным уровнем значимости инструментальных погрешностей и средней квадратической изменчивостью температуры σ_T и солености σ_S из табл. 1.1 для синоптических процессов, то для автономных СИ следует ограничить систематические погрешности по температуре уровнем $\pm 0,01^\circ\text{C}$, электрической проводимости $\pm 0,05\%$, давления $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ МПа. Как правило, такие точностные характеристики реализуются в современных автономных СИ электрической проводимости (conductivity), температуры (temperature) и глубины (depth), получивших название CTD-систем или применительно к автономным приборам — CTD-измерители.

Наиболее жесткие требования предъявляются к автономным средствам измерения уровня открытого моря — самописцам уровня (мареографам). Часто полные изменения уровня, связанные с океаническими течениями в открытой части океана, не превышают $15\text{--}20$ см на расстоянии до 1000 км от берега. Для их исследования на полигоне буйковых станций, расположенных друг от друга на расстоянии не более $100\text{--}150$ км, необходимо измерять колебания уровня с погрешностями не более $1\text{--}2$ см. Примерно такая же точность требуется для обнаружения на расстоянии $500\text{--}1000$ км от берега волн цунами, амплитуда которых в открытом океане не превышает $0,5$ м [99].

При оценке требуемой точности измерения скорости течения на буйковых станциях можно опираться на погрешности расчетов скорости движения воды в океане динамическим методом. Исходными данными для этих расчетов являются результаты измерений температуры и солености морской воды, выполняемых при океанографической съемки на полигонах натуральных экспериментов. Данные для таких расчетов обычно получают с помощью зондирующей аппаратуры в процессе выполнения океанографических станций. В лучшем случае при этом обеспечивается измерение температуры с погрешностью $\pm 0,005^\circ\text{C}$, солености — $\pm 0,03\text{‰}$, глубины ± 10 м. Тогда достигается погрешность измерения плотности воды в условных единицах $\pm 0,05$. В результате инструментальная погрешность определения скорости течения воды в океане при расчетах динамическим методом не превышает $\pm (0,01\text{--}0,02)$ м/с. Видимо, этим

пределом целесообразно ограничивать требования к точности автономных средств измерения скорости течения. Требования к погрешности измерения направления течения традиционно не превышают $\pm (5-10)^\circ$ [68, 97].

Большинство применяемых в настоящее время автономных средств измерения течения реализуют указанные точностные характеристики.

1.2. Современные измерители гидрофизических величин

Автономные средства измерения основных гидрофизических величин, или сокращенно измерители, можно условно разделить на три представительные группы различных по назначению приборов. К первой группе относятся измерители течения, ко второй — *СТД*-измерители, а третью группу составляют самописцы уровня открытого моря.

Конструктивно измерители течения и *СТД*-измерители выполняются как в виде отдельных приборов, так и в едином аппаратном модуле. Широкий набор таких СИ серийно и отдельными партиями приборов выпускается в СССР и за рубежом. В качестве основных зарубежных изготовителей указанной океанографической аппаратуры выступают в настоящее время фирмы США, Франции и Норвегии.

К наиболее распространенным отечественным автономным океанографическим средствам измерения относятся измерители типа АЦИТ, серийно выпускаемые Рижским опытным заводом гидрометприборов (РОЗ ГМП), измеритель «Поток-2М» ОКБ океанологической техники АН СССР, долговременный измеритель скорости течения (ДИСК), изготавливаемый Специальным конструкторско-технологическим бюро Морского гидрофизического института (СКТБ МГИ) АН УССР.

Комплексный измеритель основных гидрофизических величин АЦИТ, а также его более поздняя модификация АЦИТ-А, предназначены для получения данных о температуре и солёности (по электрической проводимости) морской воды, скорости и направления течения, а также гидростатическом давлении. В АЦИТе применен двухкомпонентный пропеллерный датчик скорости водного потока, а в качестве магнитного компаса — потенциометрический электролитический преобразователь азимутального угла в напряжение, размещенный в карданном подвесе. В этом приборе в качестве чувствительного элемента, первичного преобразователя температуры использован платиновый терморезистор, индуктивный преобразователь электрической проводимости и датчик давления на основе манометрической трубки Бурдона.

АЦИТ наряду с указанными основными гидрофизическими величинами измеряет угол отклонения корпуса прибора от вертикали для коррекции показаний по каналу измерения скорости. Основу измерительной схемы АЦИТа составляет аналого-цифровой преобразователь, информация с которого записывается 12-разрядным

двоичным кодом на магнитную ленту и передается по гидроакустическому каналу связи. Прибор имеет три исполнения корпуса и датчика давления для работы на глубинах до 1000, 2500 и 6000 м (табл. 1.2, 1.3). В настоящее время АЦИТ является наиболее массовым отечественным автономным океанографическим средством измерения.

Векторный измеритель течения АЦИТ-У-01 [62, 63]. Такого типа прибор предназначен для измерения среднего вектора скорости течения с записью полученных результатов в виде широтной и меридиональной составляющих этого вектора в полупроводниковую статическую память и передачи их по гидроакустическому каналу связи. Изменение времени осреднения 10, 30 или 60 мин и считывание данных производится без разгерметизации корпуса измерителя. АЦИТ-У-01 выпускается, так же как и АЦИТ-А, в нескольких исполнениях и предназначен для работы на глубинах до 6000 м. В АЦИТе-У-01 применен двухкомпонентный пропеллерный датчик скорости водного потока и магнитный компас с емкостным преобразователем азимутальный угол — код фазовращающего типа (см. табл. 1.3).

Автономный STD-измеритель АЦИТ-У-02 [60]. В нем в качестве чувствительного элемента первичного преобразователя температуры использован платиновый терморезистор, трехэлектродный кондуктометрический преобразователь электрической проводимости морской воды и тензометрический преобразователь гидростатического давления. Запись результатов измерения объемом до 4096 циклов измерения осуществляется в полупроводниковую статическую память. Считывание информации из нее и изменение программы работы также производится без разгерметизации корпуса прибора. С целью повышения точности в АЦИТе-У-02 предусмотрена автоматическая калибровка измерительных каналов. Этот прибор дополнительно снабжен жидкокристаллическим цифровым индикатором для визуального считывания через прозрачную линзу в корпусе результатов измерения (см. табл. 1.2).

На базе АЦИТа-У-01 и АЦИТа-У-02 в ААНИИ совместно с ОКБ океанологической техники разработан двухкоординатный регистратор течения, температуры, электрической проводимости и давления морской воды (ДКРТ) «Вектор», который обладает примерно такими же метрологическими и техническими характеристиками, как и вышеуказанные приборы, но имеет в 2—3 раза меньше габариты и массу (8 кг) [60].

Измеритель «Поток-2М». Предназначен для измерения скорости и направления течения, температуры морской воды [110]. В качестве первичного преобразователя скорости потока в нем использован лопастной винт (пропеллер) с обтекателем, аналогичный тому, который применяется в приборах АЦИТ-А и АЦИТ-У-01. Вращение лопастного винта через открытую коническую передачу с коэффициентом 2 : 1 передается к вертикальному штоку и далее через магнитную муфту — внутрь корпуса прибора. Поворот ответной части магнитной муфты на один полный оборот вызывает

Табл
Метрологические характеристики

Наименование	Температура			Электрическая
	диапазон измерения, °С	основная погрешность, °С	стабильность, °С/мес	диапазон измерения, См/м/отн. ед.
АЦИТ-А	-2... 38	±0,07	0,01	0,1—3,5/0,02—0,9 3,0—6,0/0,8—1,4
АЦИТ-У-02	-2... 38	±0,02	±0,005	0,1—6,0/0,02—1,4
ДИСК	-2... 26	±0,05	—	—
Поток-2 М	-2... 38	±0,1	—	—
MARK-III	-2... 30	±0,01	0,001	0,1—6,5/0,02—1,5
135-М	0... 30 0... 15	±0,1	—	0—6,5/0—1,5
195-М	0... 30	±0,1	—	—
RCM-4S (5, 7, 8)	-2,46... 21,40 10,08... 36,00 -0,34... 32,17 -2,64... 5,62	±0,05 ±0,05 ±0,05 ±0,05	— — — —	0—7,7/0—1,8 2,5—7,2/0,6—1,7 2,5—3,8/0,6—0,9
S4	-2,5... 36	±0,1	—	0,1—7,0/0,02—1,7

* В числителе — удельная проводимость κ ; знаменателе — относительная

срабатывание трех оптронных пар, преобразующих вращение лопастного винта в последовательность 18 электрических импульсов. В качестве компаса в приборе «Поток-2М» применен дисковый оптоэлектронный преобразователь угла поворота картушки в код Грея. Его разрешающая способность равняется примерно 6°. По каждому срабатыванию оптронных пар производится запуск в работу интегрирующей схемы прибора. Интегрирование скорости течения выполняется в течение всего времени между циклами измерения и осуществляется в соответствии с алгоритмом векторного осреднения, аналогичным прибору ЦИИТ [35]. Цикличность работы может устанавливаться произвольно и составляет 1 ч, 30; 15; 7,5; 3,75 или 1,88 мин в зависимости от желания пользователя. Для измерения температуры применен кварцевый первичный преобразователь температуры с частотным выходом. Прибор изготавливается в двух исполнениях. В одном, рассчитанном на глубины до

автономных *СТД*-измерителей

проводимость*		Давление			Примечание
основная погрешность, См/м/ отн. ед.	стабильность См/м/(отн. ед./мес)	диапазон измерения, МПа	основная погрешность, % верхней границы диапазона	стабильность, МПа/мес	
$\pm (2 + 4\kappa) \cdot 10^{-3} / \pm (0,5 + R) \cdot 10^{-3}$	—	0—10	± 1	0,01	Диапазон измерения давления зависит от исполнения АЦИТ
		0—25	± 1	0,01	
$\pm (2 + 2\kappa) \cdot 10^{-3} / \pm (0,5 + 0,5R) \cdot 10^{-3}$	0,003/0,001	0—60	$\pm 0,2$	0,001	
—	—	—	—	—	
$\pm 0,001 / \pm 0,0005$	0,003/0,001	0—10	$\pm 0,5$	0,001	
$\pm 0,001 / \pm 0,0005$	—	0—10	$\pm 0,5$	—	
—	—	0—10	$\pm 0,3$	—	
$\pm 0,025 / \pm 0,006$	—	0—10	± 1	—	Диапазоны измерения температуры, электрической проводимости, давления зависят от исполнения приборов
$\pm 0,025 / \pm 0,006$	—	0—30	± 1	—	
$\pm 0,025 / \pm 0,006$	—	0—90	± 1	—	
$\pm 0,02 / \pm 0,005$	—	0—10	$\pm 0,5$	—	Постоянная времени датчика температуры 1 мин

проводимость R .

6000 м, его вес в воздухе составляет 559 Н, а в другом — для глубин до 2000 м вес составляет 480 Н. Система подвески данного измерителя обеспечивает его ориентацию в потоке с помощью хвостового стабилизатора с точностью до 5° при скоростях течения свыше 0,05 м/с. Результаты измерений регистрируются в полупроводниковой памяти прибора, имеющей емкость 4096 циклов измерения. Запас батарей питания обеспечивает срок автономной работы до 120 сут (см. табл. 1.2 и 1.3).

Долговременный измеритель течения и температуры МГИ 1301 (ДИСК). ДИСК изготавливается в СКТБ МГИ и в основном эксплуатируется на судах Морского гидрофизического института АН УССР [89]. В конструктивном отношении он представляет собой цилиндрический контейнер весом 559 Н с одной или двумя рулевыми пластинами, с помощью которых производится его ориентация по течению. Подвеска осуществляется к тросу через

Таблица 1.3

Метрологические характеристики автономных измерителей скорости течения

Наименование	Скорость течения V			Направление течения		Примечание
	диапазон измерения, м/с	предел основной погрешности, м/с	диапазон измерения, м/с	предел основной погрешности, °		
АЦИТ-А	0,03—2	$\pm (0,02 + 0,05V)$ $\pm (0,02 + 0,1V)$ $\pm (0,01 + 0,05V)$	0—360 0—360 0—360	± 10 ± 10 ± 8	$V > 0,1$ м/с $V < 0,1$ м/с Дополнительная погрешность от диаграммы направленности не превосходит основной	
ДИСК «Поток-2М» АСМ-2	0,02—3 0,03—2,5 0—3	$\pm (0,01 + 0,04V)$ $\pm (0,06 + 0,04V)$ $\pm (0,01 + 0,05V)$	0—360 0—360 0—360	± 5 ± 10 ± 5	Постоянная времени компаса и датчика скорости 0,2 с При отклонениях корпуса прибора от вертикали до $\pm 30^\circ$	
135-М	0,05—3 0,025—1,5	$\pm 0,03$ $\pm 0,015$	0—360	± 3	$\pm 1\%$ — погрешность линейности $\pm 1\%$ — погрешность диаграммы направленности	
195-М VMSM	0,06—3 0,02—4	$\pm 0,02$ $\pm (0,01 + 0,01V)$	0—360 0—360	± 2 ± 5	$0,025 < V < 0,05$; $V > 1,0$ м/с $0,05 < V < 1,0$ м/с	
RSM 4S(5, 7, 8)	0,025—2,5	$\pm (0,01 + 0,02V)$	0—360	$\pm 7,5$		
SLS-11 S4	0—4,0 0—3,5	$\pm (0,03 + 0,02V)$ $\pm (0,01 + 0,02V)$	0—360 0—360	± 5 ± 5 ± 2		

вертлюг. На верхней крышке прибора размещены датчик скорости потока и медный терморезистор. Имеется несколько модификаций контейнеров для прибора ДИСК: титановые для глубин 6000 м, керамические до глубин 3000 м и стеклянные для глубин 1500 м. В качестве первичного преобразователя скорости потока в приборе ДИСК используется четырехлопастной импеллер с радиально переменным шагом, расположенный в обтекателе. На импеллер одет обод с впесованными в него 12 магнитами. Для преобразования вращения импеллера в электрический сигнал применяются магнитодиоды, размещенные на удалении 2—3 см от вращающихся магнитов в крышке корпуса прибора и включенные в мостовую схему с усилителем. Направление течения определяется компасом по положению корпуса этого прибора, ориентируемому в потоке с помощью рулевых пластин. В измерителе ДИСК применен потенциометрический компас, для съема показаний с которого в момент отсчета картушка с помощью соленоида прижимается к обмотке, этого кругового потенциометра. Сигналы с датчиков скорости, температуры и компаса подсчитываются счетно-импульсной схемой, за время экспозиции, равное 4 или 8 с, а полученные результаты записываются по каждой значению 8-разрядным двоичным кодом на магнитофонную кассету МК-60 с цикличностью 1 раз в 50 с, 5 или 10 мин. Цикличность измерений и время экспозиции задается оператором произвольно. В качестве источника питания данного измерителя применяются 8 аккумуляторов типа КНТК-10. При этом срок его автономной работы при 10-минутной цикличности составляет не менее 80 сут.

Наряду с указанными приборами, в СССР также имеются отдельные образцы самописцев уровня открытого моря, в том числе самописец уровня моря «Цунами» разработки ААНИИ, рассчитанные на глубины до 1000 м [24]. В «Цунами» в качестве чувствительного элемента колебаний уровня моря использован вакуумированный виброчастотный преобразователь давления, выполненный на базе ПДВ-100Б и обеспечивающий измерение уровня в открытых районах океана с погрешностью не более ± 4 см.

Бедущими американскими фирмами в области океанографического приборостроения являются «Интероушен системс» («Inter Ocean systems, inc.») и «Нейл Браун инструмент системс» («Neil Brown instrument systems, inc.») (NBIS). Первая из них производит комплексные измерители гидрофизических величин, в том числе модели 135, 135-М, 195/196RM, а вторая — CTD-измерители на базе зонда MARK-III и акустические измерители течения АСМ-2, которые можно эксплуатировать отдельно и объединять в единый конструктивный модуль [148].

Приборы модели 135 и 135-М, предназначенные для измерения скорости и направления течения, температуры и гидростатического давления [126], в течение ряда лет производила фирма «Интероушен». Приборы 135-М дополнительно измеряли электрическую проводимость. В качестве чувствительного элемента первичного преобразователя течения в них применен ротор Савониуса, а направ-

ление течения определялось с помощью магнитного компаса по положению корпуса прибора, ориентируемого с помощью стабилизатора в потоке воды. Прибор устанавливается в разрыв троса. Его корпус изготовлен из специального твердого анодированного алюминия и рассчитан на глубины до 1000 м, а в специальном исполнении — до 6000 м. Вес в воздухе 158 Н, в воде — 45 Н. В качестве чувствительного элемента преобразователя температуры применен термистор с линеаризованной характеристикой, а в модели 135-М индуктивный преобразователь электрической проводимости. Запись осуществляется 8-разрядным двоичным кодом на магнитную ленту компакт-кассеты непрерывно или с цикличностью от 2 до 30 мин, обеспечивающей длительность записи до 1 года. Обе модели 135 и 135-М имеют одинаковые метрологические характеристики (см. табл. 1.2 и 1.3).

Электромагнитные измерители течения модель 195-М фирмы «Интероушен» имеют в своем составе измерительные каналы температуры и давления с метрологическими характеристиками аналогичные модели 135. Этот прибор также предназначен для установки в разрыв троса и имеет вес на воздухе 252 Н, а в воде — 27 Н. Емкость кассетного накопителя позволяет осуществлять запись результатов измерения с цикличностью 10 мин до 62 сут [125].

Наиболее широкий комплекс гидрофизических величин может измерять на буйковой станции в автономном режиме до 30 сут модель 196-РМ со специальным накопителем данных на магнитной ленте. С помощью такого прибора измеряется скорость и направление течения, электрическая проводимость и температура морской воды, гидростатическое давление, а также скорость звука в воде, содержание растворенного в воде кислорода, рН, степень турбулентности и ионизации морской воды. Для более точного расчета солености по показаниям датчика электрической проводимости в состав прибора входят платиновый термометр сопротивления и термистор с линеаризованной характеристикой. Прибор предназначен для работы на глубинах до 6000 м и имеет вес на воздухе 474 Н, а в воде — 325 Н. Метрологические характеристики его измерительных каналов приведены в табл. 1.4.

Фирма «Интероушен» освоила также в производстве электромагнитный измеритель скорости течения S4 с каналами измерения температуры, электрической проводимости и давления [145]. Отличительной особенностью этого прибора является то, что он конструктивно оформлен (рис. 1.1) в виде сферического шара диаметром 25 см, имеющего нулевую плавучесть, и рассчитан на глубины до 1000 м. Внутри этого шара располагаются электронные узлы измерительных схем, микропроцессор Интел-8085 для векторного осреднения скорости и коррекции характеристик датчиков, блок полупроводниковой памяти емкостью 128 кбит и батарейный блок питания на литиевых элементах ВСХ-72. Срок автономной работы такого прибора около года при цикличности измерений 15 мин (см. табл. 1.3).

Таблица 1.4

Метрологические характеристики измерителя 196-РМ

Параметр	Диапазон измерения	Основная погрешность	Постоянная времени	Примечание
Скорость течения	0—3 м/с	$\pm 2\%$	1 с	Термистор Платиновый термометр
Направление течения	0—360°	$\pm 2^\circ$	100 мс	
Температура	—5... 45 °С	$\pm 0,02\text{ }^\circ\text{С}$	60 мс	
			1,4 с	
Удельная электрическая проводимость	0—65 мСм/см	$\pm 0,02$ мСм/см	20 мс	
Давление	0—1000 м	$\pm 0,2\%$	25 мс	
	0—3000 м	$\pm 0,2\%$	25 мс	
	0—6000 м	$\pm 0,2\%$	25 мс	
Скорость звука	1400—1600 м/с	$\pm 0,1\text{ м/с}$	20 мс	
Растворенный кислород	0—20 млн ⁻¹	$\pm 0,1\text{ млн}^{-1}$	5—10 с	
Водородный показатель (рН)	2—12	$\pm 0,05$	40 мс	
Соленость (по содержанию ионов)	0—45 ‰	$\pm 0,02\text{ }^\circ\text{‰}$	1,4 с	
Степень турбулентности	0—100 ‰	$\pm 2\%$	50 мс	

Автономные *CTD*-измерители, выпускаемые фирмой NBIS (рис. 1.2) построены по известной схеме *CTD*-зонда MARK-III. В измерителях АСМ-2 применен акустический метод незатухающей импульсной волны для измерения двух компонентов скорости течения и феррозондовый компас типа «flux gate». При питании от батарейного источника указанные модули имеют срок автономной работы около 45 сут. Они рассчитаны для выполнения наблюдений на предельной глубине до 1000 м. Минимальная цикличность работы *CTD*-измерителя 5 цикл./с или 1 цикл автокалибровки. Запись результатов измерения осуществляется 12-разрядным двойчным кодом в полупроводниковую статическую память емкостью 10 000 циклов измерения. В акустическом измерителе АСМ-2 имеется цепь коррекции температурной зависимости скорости звука в воде в диапазоне от —2 до 30 °С с погрешностью измерения $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{С}$ и постоянной времени 1 мин. Вес *CTD*-измерителя MARK-III на воздухе составляет 69 Н, АСМ-2 — 99 Н. К *CTD*-измерителю дополнительно могут подключаться датчики растворенного в воде кислорода и показателя рН. В последних вариантах исполнения подводных модулей фирмой NBIS предусмотрено их непосредственное подключение к системному контролеру по интерфейсу RS-232.

Фирмой NBIS также выпускаются подводные модули, рассчитанные на глубины 6000 м, в которых конструктивно объединены измерители течения АСМ-2 и *CTD*-измерители MARK-III, запись информации с которых производится кассетным магнитофоном

фирмы «Мемодайн», модель-200. Вес на воздухе таких приборов около 600 Н (см. табл. 1.2, 1.3). Анализ табл. 1.2 и 1.3 показывает, что измерители этой фирмы имеют на сегодняшний день наилучшие характеристики, достигнутые в мировой практике океанографиче-

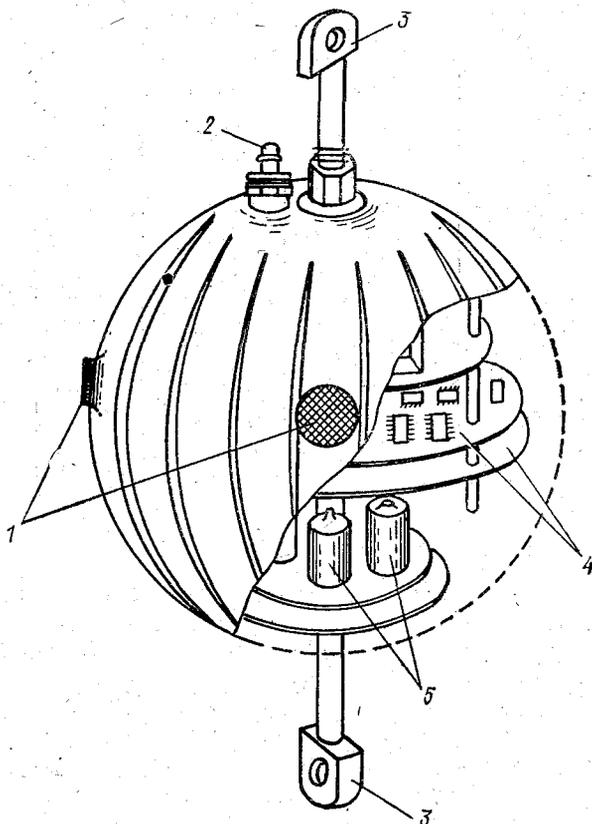


Рис. 1.1. Электромагнитный измеритель S4 фирмы «Интероушен».

1 — электроды датчика скорости течения; 2 — датчики температуры, электрической проводимости и гидростатического давления; 3 — узлы крепления к буйрепу; 4 — электронные блоки; 5 — элементы питания.

ского приборостроения и наиболее успешно могут использоваться для исследования гидрофизических процессов мелкомасштабной изменчивости.

Векторно-осредняющий измеритель течения VMCM модель 630 [149, 151] производит в США фирма «Инвайронментал Эквипмент Дивижн» («Environmental Equipment Division» — EG and G.) согласно патенту США № 4152934. В этом приборе в качестве чувствительных элементов двухкомпонентного датчика потока применены сдвоенные импеллеры, вращение которых фиксируется

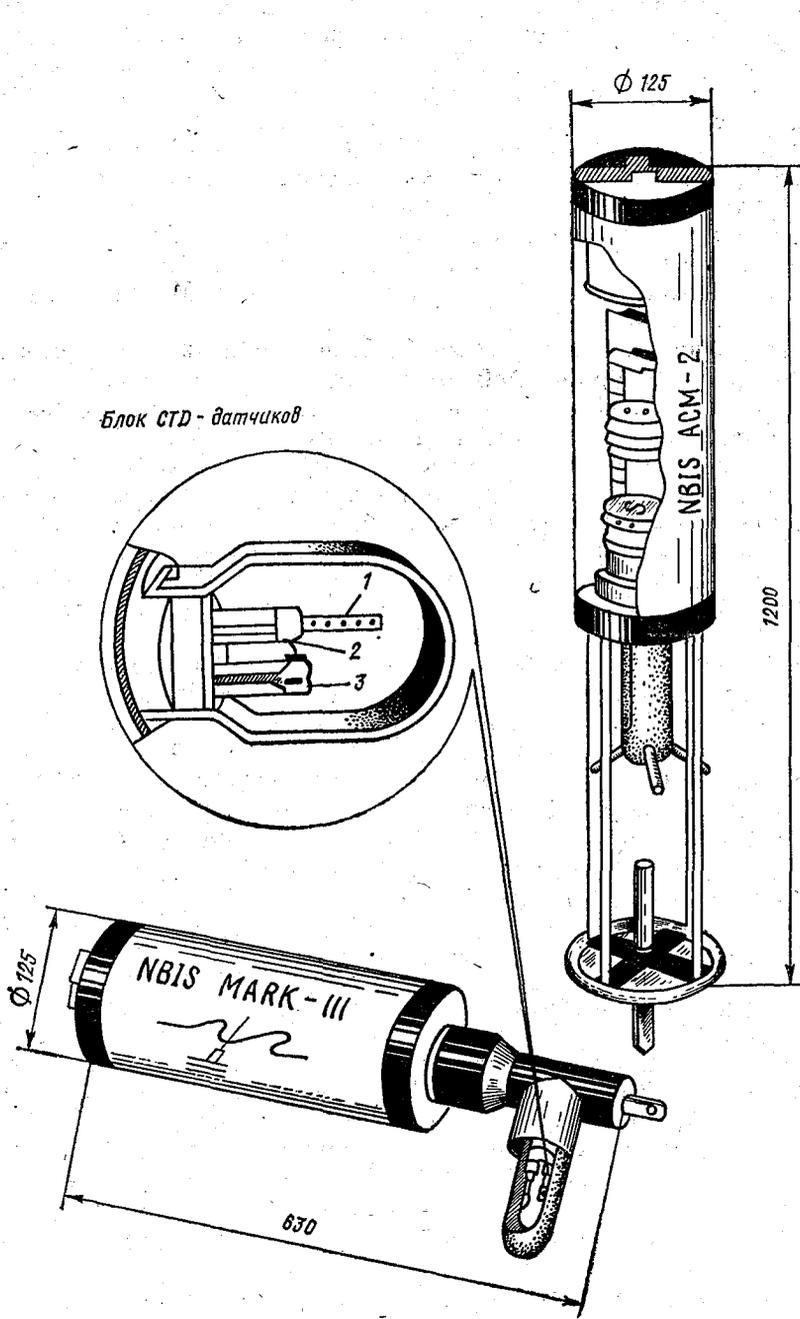


Рис. 1.2. Подводные модули акустического измерителя течения АСМ-2 и STD-измерителя MARK-III фирмы NBIS.
 1 — платиновый терморезистор; 2 — терминистор; 3 — четырехэлектродная кондуктометрическая ячейка электрической проводимости.

с помощью специальной схемы на магнитных диодах. В приборах производится векторное осреднение скорости течения с постоянным интервалом времени в 0,25—2 с, задаваемым программой работы прибора. Интервал времени осреднения также устанавливается от 2 с до 2 ч. Запись результатов измерения осуществляется на магнитную ленту с плотностью 3200 бит/дюйм, общим объемом записи 10 000 циклов измерения. Вес прибора в воде 310 Н, длина 2 м. Корпус изготовлен из анодированного алюминиевого сплава, рассчитанного для работы на глубинах до 6000 м и установки в разрыв троса на буйковые станции. Метрологические характеристики векторно-осредняющего измерителя VMCM приведены в табл. 1.3.

Электромагнитные измерители течения модель 585 фирмы «Марш—Бёрн» («Marsh—McBirney») имеют ограниченный ресурс работы [118]. В нем применен специальный электромагнитный преобразователь скорости водного потока с собственным магнитным полем. Результаты измерения в виде широтного и меридионального компонентов среднего вектора скорости записываются на магнитную ленту с датой текущего цикла измерения в формате 12-разрядных двоичных слов. Цикличность измерения может устанавливаться от 15 мин до 6 ч и общий срок автономной работы до 250 сут. Прибор выполнен на основе патентов США № 3885433 и 3898881.

SLS-11, -12, -13. Наиболее известной в СССР французской фирмой является «Сьюбер» («Suber»), изготавливающая и измерители течения SLS-11, и самописцы уровня SLS-13, а также автономные измерители скорости звука в воде SLS-12 [147]. В измерителях течения данной фирмы в качестве чувствительного элемента преобразователя скорости водного потока применен ротор Савониуса, а для определения направления водного потока относительно корпуса прибора — флюгарка. Вращение ротора передается внутрь корпуса с помощью геркономагнитной пары, а угол ориентации флюгарки — с помощью магнитной муфты. Разворот данной муфты преобразуется оптронным устройством в электрический сигнал, который совместно с сигналом, поступающим с магнитного компаса, обрабатывается внутри прибора по алгоритму векторного осреднения. В качестве накопителя информации используется полупроводниковая матричная память емкостью до 32 кбит. Для обработки сигналов с первичных преобразователей применен микропроцессорный комплект Интел 8085. Измерительный модуль SLS-11 также может наращиваться датчиками температуры, давления и электрической проводимости. Вес в воздухе 230 Н, а в воде — 120 Н. Рассчитан на глубины до 6000 м. Остальные технические и метрологические характеристики приборов указанной фирмы приведены в табл. 1.2 и 1.3.

Самописец уровня моря SLS-13 рассчитан для работы на глубинах до 3000 м. В нем в качестве датчика уровня применен кварцевый резонатор, обеспечивающий погрешность измерения уровня открытого моря не менее ± 2 см. Аппаратура данной французской

фирмы находит применение не только за рубежом, но и в нашей стране в организациях Госкомгидромета.

RCM4S, RCM5. Основной норвежской фирмой-изготовителем океанографической аппаратуры является «Ондеро инструментс» («Aanderaa Instruments»), ранее именовавшаяся «Ивер Ондеро» («Iver Aanderaa»). В течение ряда лет широкую известность в мире приобрели океанографические измерители RCM4S и RCM5 [141]. Они предназначены для комплексного измерения температуры, электрической проводимости, давления, скорости и направления течения. В качестве чувствительного элемента первичного преобразователя скорости применен ротор Савониуса, температуры — термистор с S-образной характеристикой, электрической проводимости — индуктивный преобразователь трансформаторного типа, давления — трубка Бурдона с потенциометрическим преобразователем. Результаты измерений кодируются 10-разрядным двоичным кодом и записываются на четвертьдюймовую магнитную ленту. В процессе измерения прибор включается в разрыв троса буйковой станции и ориентируется с помощью хвостового стабилизатора по течению. Положение корпуса в пространстве определяется с помощью магнитного компаса, показания с которого однозначно характеризуют направление течения в океане. Остальные метрологические характеристики приборов RCM4S (RCM5) сведены в табл. 1.2 и 1.3.

Самописец уровня моря WLR5 фирмы «Ондеро инструментс» имеет кварцевый первичный преобразователь давления резонаторного типа фирмы «Парасантифик» («Parasantific») и термисторный преобразователь температуры с частотным выходом, обеспечивающий измерения уровня открытого моря на глубинах до 600 м с погрешностью не хуже $\pm 0,6$ см, а температуры — $\pm 0,04$ °C. Результаты измерений записываются на магнитную ленту 10-разрядным двоичным кодом [152].

Характерной особенностью приборов данной норвежской фирмы является наличие гидроакустического канала связи с дальностью до 800 м на частоте $(16\ 384 \pm 5)$ Гц. В качестве материала, из которого изготовлен корпус приборов, использован алюминиевый сплав 6061/T6, стойкий к морской воде. В результате вес измерителей RCM4S (RCM5) вместе со стабилизатором в воздухе не превышает 260 Н (300), а самописца уровня моря WLR5 — 50 Н, а в воде — соответственно 170 Н (190) и 14 Н. Сейчас фирма «Ондеро инструментс» приступила к изготовлению автономных комплексных измерителей RCM7 и RCM8, рассчитанных на работу соответственно до глубин 2 и 6 км [140]. Их отличительной особенностью от предшествующей серии приборов RCM4S и RCM5S является векторное осреднение скорости течения и использование полупроводниковой памяти для записи результатов измерений.

Принципиально новым в приборах этого типа является сменный электронный блок с жидкокристаллическим 5-разрядным цифровым индикатором. Данная фирма также начала поставку на рынок нового самописца уровня моря WLR7, дополненного по сравнению

с WLR5 каналом измерения электрической проводимости. Основные метрологические и габаритные характеристики приборов нового поколения фирмы «Ондеро инструментс» практически не изменились, а дальность гидростатического канала связи увеличена до 2 км.

Отличительной чертой всех зарубежных измерителей течения VMCM; модели 135-M, 196-M и S4; SLS-12; RCM4, 5, 7, 8 является то, что все они рассчитаны на включение в разрыв троса при их установке на буйковые станции.

Практическое применение всех вышеописанных измерителей гидрофизических величин требует привлечения соответствующей бортовой аппаратуры. Задачей этой аппаратуры является считывание, индикация и регистрация информации, полученной с помощью подводных измерительных модулей. Такой аппаратурой для измерения АЦИТ-А является устройство обработки данных (УОД), у измерителей АЦИТ-У-01, 02 — блок обработки данных (БОД), у прибора ДИСК — устройство воспроизведения магнитофонных кассет, для приборов фирмы «Интероушен» — набор цифрового и аналогового индикаторных блоков 514-С и 514-Е, для измерителей фирмы NBIS — бортовой блок NBIS MARK-III, для измерителей фирмы «Сьюбер» — центральный процессорный блок SLS-01 или SLS-26, для измерителей и самописца уровня моря фирмы «Ондеро инструментс» — магнитофон воспроизведения модель 2650 и цифрочечная модель 2860 совместно с гидрофоном 2247. Данные устройства, размещаемые в лабораториях или на борту океанографических судов, служат для организации прямого канала ввода данных от измерителей в ЭВМ без привлечения промежуточных технических носителей (перфоленга, магнитная лента и т. п.).

1.3. Океанографические информационно-измерительные и телеизмерительные системы

Современные автономные средства измерения гидрофизических величин редко используются как отдельные измерительные приборы. Как правило, они с помощью бортовой аппаратуры комплексуются в автоматизированные информационно-измерительные системы (ИИС). В таких океанографических ИИС датчики входят в состав автономных измерителей, информация от которых передается в центральный процессор (ЭВМ) для обработки и представления потребителю (рис. 1.3). При этом сами измерители располагаются на различных горизонтах наблюдений с помощью буйковых станций, установленных в заданных точках полигона натурального эксперимента. В последние годы преимущественное применение находят притопленные и придонные самовсплывающие буйковые станции [60, 116]. В их состав кроме измерителей также входят акустический маяк для пеленга станции и гидроакустические размыкатели троса. По команде с научно-исследовательского судна (нис), участвующего в эксперименте, размыкатель троса отсо-

единяет якорь от буйрепа станции, и она под действием положительной плавучести несущего буя всплывает на поверхность моря.

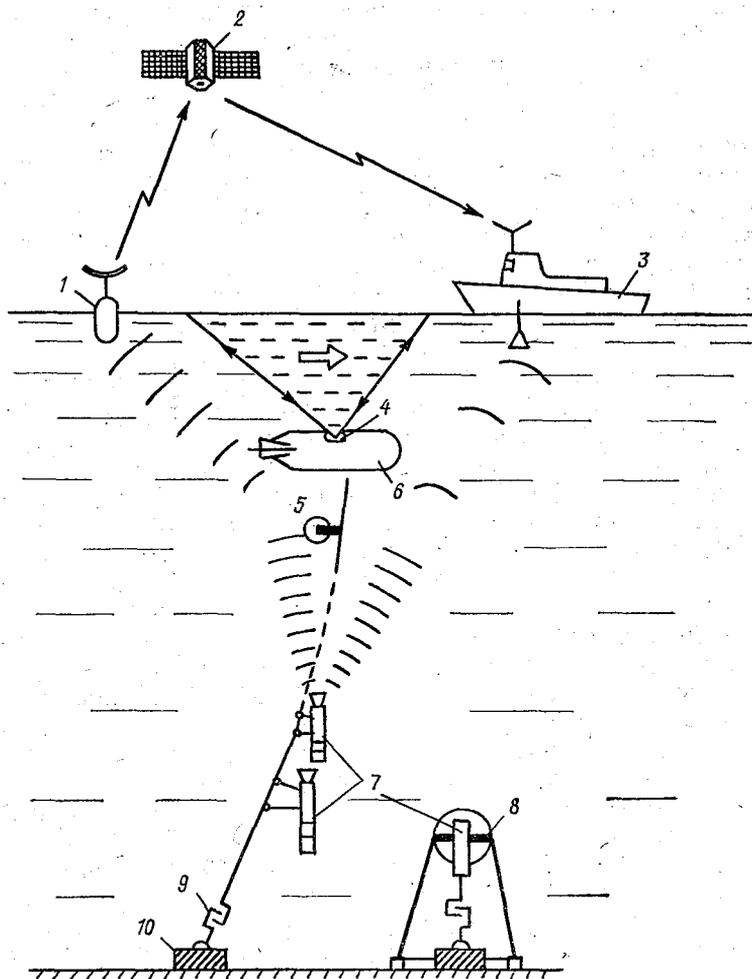


Рис. 1.3. Океанографические телеметрические ИИС.

1 — спутниковый радиопередатчик; 2 — спутник связи; 3 — океанографическое судно; 4 — акустический профилограф; 5 — гидроакустический ретранслятор; 6 — притопленный буй; 7 — автономные измерители; 8 — придонная станция; 9 — размыкатели; 10 — якорь.

Тогда измерители переносятся на борт нис, и накопленная в них информация считывается.

Отличительной особенностью океанографических ИИС является то, что полученные результаты измерения предварительно накапливаются в измерителях, а затем уже передаются в центральный процессор. В условиях натурального эксперимента в качестве такого процессора выступают судовые ЭВМ. На нис Госкомгидро-

мета водоизмещением свыше 2,0 тыс. т типа «Академик Шулейкин», «Профессор Зубов» применяются ЭВМ СМ-1420 с системой удаленных терминалов, которые по своей производительности вполне могут справиться с задачей обработки в реальном масштабе времени информации, поступающей с нескольких десятков измерителей типа АЦИТ [57]. Здесь главным препятствием на пути создания подобных телеметрических систем в открытых районах океана является ограниченная 2—3 км дальность гидроакустических каналов связи подводных измерительных модулей с судовой ЭВМ. Других надежных способов передачи сигналов от подводных объектов в данное время не имеется. Поэтому телеметрические системы с разнесенными по горизонтам измерителями океанографических величин пока успешно могут использоваться только для исследования гидрофизических процессов мелкомасштабной изменчивости, протяженностью не более 1—2 км.

Определенные перспективы в деле расширения области применения вышеописанных информационно-измерительных и телеизмерительных систем связаны с привлечением для передачи океанографических данных с буйковых станций спутниковых каналов связи, например, КОНДОР или радиотелеграфного ИНМАРСАТ [98]. Техническое обеспечение такой системы передачи влечет за собой включение в состав этих станций гидроакустических ретрансляторов и радиопередатчика спутниковой связи. Задача гидроакустического ретранслятора должно являться частотное преобразование информационной посылки, поступившей от измерителя на частоте 16—30 кГц. Это обеспечит уверенное прохождение преобразованного сигнала на частоте 150 кГц через поверхностный слой скачка к УКВ-передатчику. Последний, расположенный на поверхности моря, в непосредственной близости от несущего буй, должен приводить прием ретранслированных акустических сигналов от подводных модулей, накапливать поступающую информацию и передавать ее в заданные сроки через искусственный спутник Земли (ИСЗ) в центры сбора данных, например на нис (см. рис. 1.3). Подобная система передачи результатов измерений in situ гидрофизических величин, только на более короткие расстояния до 10 км, может быть организована без ИСЗ путем непосредственной передачи данных с радиопередатчика к потребителям информации. Это может быть исключительно полезно при автоматизации океанографических наблюдений на сети Госкомгидромета в прибрежной морской зоне и организации в ней экологического мониторинга. Для этих целей в ААНИИ разработан комплекс технических средств телеизмерительной станции типа ДУ-МГ, предназначенной для получения информации об основных гидрофизических величинах и характеристиках поверхностного волнения с передачей данных по радио, кабельному и гидроакустическим каналам связи соответственно на расстояние до 5; 1 км- и 100 м соответственно. Первые опытные образцы таких станций используют для наблюдений в Невской губе Финского залива в районе защитных сооружений Ленинграда от наводнения.

Включение в состав описанной буйковой станции в качестве элемента телеизмерительной системы не УКВ-передатчика, а средневолнового передатчика позволит организовать без ИСЗ связь подводных измерительных модулей с береговым центром сбора данных на расстоянии до 1000 км. Такой вариант предполагается использовать в рамках глобальной службы оповещения населения Дальнего Востока СССР об особо опасных природных явлениях на море. В качестве автономных средств измерения будут применены самописцы уровня моря «Цунами».

В последние годы наряду с традиционными позиционными измерителями течения, размещаемыми на отдельных горизонтах, имеются сведения о создании за рубежом автономных профилографов поля скоростей течения, работа которых основана на акустическом зондировании вертикального профиля океана. Такие приборы сами по себе представляют автономную океанографическую ИИС, дающую телеизмерительную информацию о состоянии течения по нескольким горизонтам.

Пионером в деле создания акустических профилографов скорости течения по праву считается американская фирма «RD-Instruments», разработавшая серию автономных приборов RD-SC/DR (рис. 1.4), предназначенных для использования в составе буйковых станций [117]. Принцип действия этих средств измерения скорости на нескольких горизонтах, в различных слоях океана, заключается в измерении доплеровского сдвига f_d частот между зондирующей акустической импульсной посылкой и сигналом, отраженным от облучаемых слоев воды. В этих приборах зондирование океана производится по четырем фиксированным направлениям — лучам, расположенным в пространстве под углом 90° друг к другу. Также под углом θ_d , примерно равном 30° , зондирующий акустический луч пересекает слой воды, в котором определяется по доплеровскому сдвигу искомая горизонтальная скорость V перемещения частиц воды. От этих частиц в силу их гидрологических и механических неоднородностей формируется отраженный сигнал, который принимается гидрофоном профилографа. При перемещении в пространстве этих неоднородностей вместе с водой частота отраженного сигнала, согласно эффекту Доплера, будет отличаться от частоты f_s зондирующей посылки. Далее в профилографе производится выделение возникших сдвигов частот f_d по всем четырем зондирующим лучам и их совместная обработка в его микропроцессорном блоке. В результате вычисляется искомая скорость V движения воды в слое по формуле Доплера (см. рис. 1.4):

$$V = C f_d / (2 f_s \cos \theta_d), \quad (1.4)$$

где C — скорость акустического зондирующего сигнала в воде.

Фирма «RD-Instruments» предлагает несколько модификаций автономных профилографов RD-SC/DR 0075, RD-SC/DR 0150, DR-SC/DR 0300, RD-SC/DR 10600 и RD-SC/DR 1200, различающихся частотой f_s зондирующей посылки (значение частоты в кГц указано в наименовании модификации) и рассчитанных на глубину

h_3 зондирования океана, соответственно равную 700, 400, 250, 100 и 50 м. При этом толщина выделенного слоя может составлять от

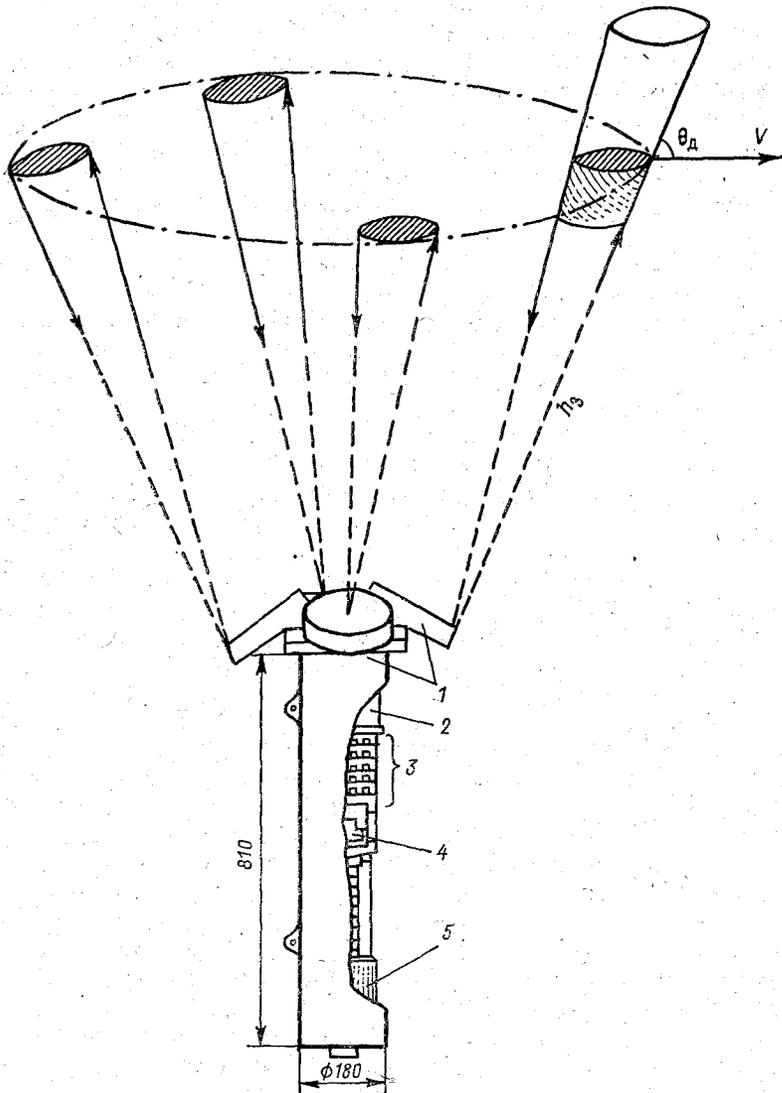


Рис. 1.4. Акустический доплеровский профилограф течений RD-SC/DR.

1 — приемно-передающие гидрофоны акустического зондирования; 2 — компас «flux gate»; 3 — микропроцессорный блок; 4 — кассетный магнитофон; 5 — блок питания.

32 до 1 м при общем числе таких слоев 128. Измерение скорости V течения на профиле производится на всех направлениях в диапазоне от 0 до 10 м/с с погрешностью $\pm (0,005 + 0,02V)$ м/с. Для определения азимутальной ориентации корпуса профилографа ис-

пользован феррозондовый компас типа «flux gate», обеспечивающий погрешность измерения $\pm 2^\circ$. Запись результатов измерений производится на кассетный или катушечный магнитофонный накопитель емкости 1,5 Мбит или 40 Мбит. Батарейный источник питания на литиевых элементах обеспечивает автономную работу приборов этого типа до 1 года. Их вес на воздухе равен 380 Н, а в воде — 85 Н.

Поскольку для нормальной работы таких средств измерения необходимо наличие в воде либо пузырьков воздуха, либо гидрологических, биологических или гидрохимических неоднородностей, их применение наиболее перспективно для получения данных о скорости течения в поверхностных и придонных слоях океана. В результате на станциях с притопленным буем (при размещении на нем вышеописанного профилографа, как показано на рис. 1.3) может быть получена до сих пор недоступная информация о движении воды в верхнем деятельном слое океана, расположенном выше несущего бую этой станции. В соответствие с этим подобного рода аппаратура является исключительно перспективной для технических средств интегрированных мультипроцессорных систем для исследования гидрофизических полей океана [98].

ДАТЧИКИ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Датчики температуры морской воды

В современных автономных средствах измерения океанографических величин наибольшее распространение нашли датчики температуры морской воды, в которых в качестве чувствительного элемента используются терморезисторы, полупроводниковые термисторы и кварцевые пьезокристаллические резонаторы. В отечественных автономных измерителях преимущественно применяются терморезисторы, изготовленные из платиновой проволоки. Их принцип действия основан на использовании однозначной зависимости электрического сопротивления R_T платины от температуры T [101, 103]. На основании многочисленных экспериментальных исследований установлено, что температурная зависимость химически чистой платины с высокой степенью точности описывается уравнением вида

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2), \quad (2.1)$$

где R_0 — сопротивление термодатчика при температуре 0°C ; A , B — постоянные коэффициенты: $A = 3,992 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$.

В диапазоне изменчивости температуры от -4 до $+38^\circ\text{C}$ для платиновых термопреобразователей вместо нелинейного выражения вида (2.1) можно с погрешностью до $0,12$ — $0,15^\circ\text{C}$ пользоваться линейной зависимостью

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T), \quad (2.2)$$

где α_T — температурный коэффициент платины, равный $3,92 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Конструктивно платиновые терморезисторы для глубоководных океанографических приборов выполняются в виде жгута из тонкого менее $0,1$ мм в диаметре провода, помещенного в герметизирующую гильзу. Такие термометры принципиально могут обеспечить измерения температуры морской воды с погрешностью до $0,01$ — $0,03^\circ\text{C}$. Подобная конструкция 500-омного платинового волоочного термометра применена в измерителе АЦИТ (рис. 2.1) [23]. В целях снижения индуктивности жгута платинового провода диаметром $0,08$ длиной 23 м в датчике АЦИТа использована бифилярная намотка. Аналогичная конструкция применена в платиновых термопреобразователях сопротивления ТСП-365-01. Их серийный выпуск согласно ТУ-25-02-792248-80 наладил НПО «Термоприбор» специально для глубоководных (до 6000 м) измерений

температуры морской воды в диапазоне от -5 до $+40$ °С. Чувствительный элемент данного термопреобразователя имеет сопротивление при 0 °С около 100 Ом и постоянную времени около $0,5$ с. Он изготавливается из платиновой проволоки марки ПЛ-0 диаметром $0,05$ мм, длиной около 2 м, покрытой лаком ВЛ-931, и помещается в герметичную капиллярную трубку из нержавеющей стали. Внутренняя полость этой трубки заполнена теплопроводной пастой. Конструкция такого датчика предполагает защиту чувствительного элемента от механических повреждений металлическим экраном с прорезями. Выводы термопреобразователя подсоединены к контактам втулки, герметизирующей капиллярную трубку. Рабочие выводы термопреобразователя припаяны к контактам втулки снаружи.

Для преобразования сопротивления R_T терморезистора в электрический сигнал используют различные мостовые схемы постоянного и переменного тока (рис. 2.2а и 2.2б). В целях снижения влияния сопротивления переходных контактов, через которые терморезистор подключается к мостовой измерительной цепи постоянного тока, применяют четырехпроводную схему включения терморезистора (см. рис. 2.2а). Исходя из требования максимальной чувствительности мосто-

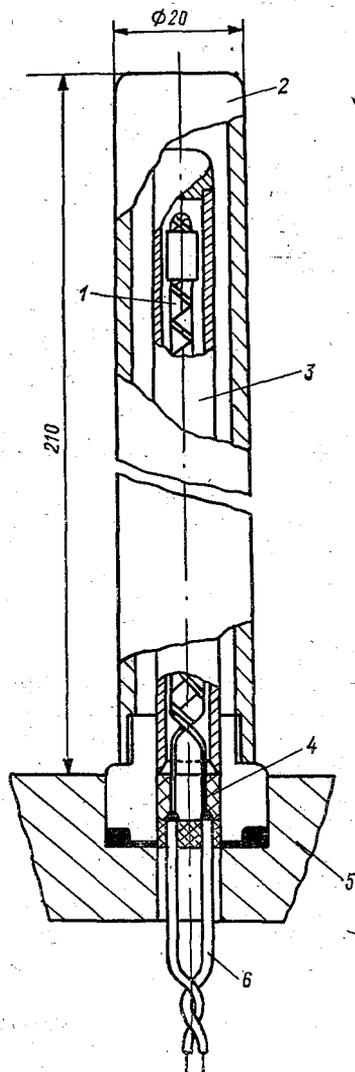


Рис. 2.1. Платиновый терморезистор АЦИТа.

1 — жгут из платиновой проволоки; 2 — защитный кожух; 3 — герметизирующая гильза; 4 — втулка; 5 — корпус измерителя; 6 — рабочие выводы.

вых схем, сопротивление образцового резистора $R_{обр}$ обычно выбирают равное сопротивлению R_0 терморезистора при 0 °С. Тогда напряжение $U_{вых}$ на выходе данной измерительной цепи при условии $R_1 = R_2 = R_{обр}$ и в мостах переменного тока оказывается связано с сопротивлением терморезистора R_T нелинейным соотношением вида

$$U_{вых} = (U_{пит}/2) (R_T - R_0)/(R_T + R_0), \quad (2.3)$$

где $U_{\text{пит}}$ — полное напряжение питания мостовой цепи, а с учетом формулы (2.2) связано с температурой T морской воды, окружающей датчик:

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{пит}}/2) (\alpha_T T) / (2R_0 + \alpha_T T). \quad (2.4)$$

В практических конструкциях средств измерения температуры морской воды дополнительно в мостовые схемы включают элементы регулировки в виде переменных резисторов типа СП5-2а класса 0,2. Они служат для установки номинальной характери-

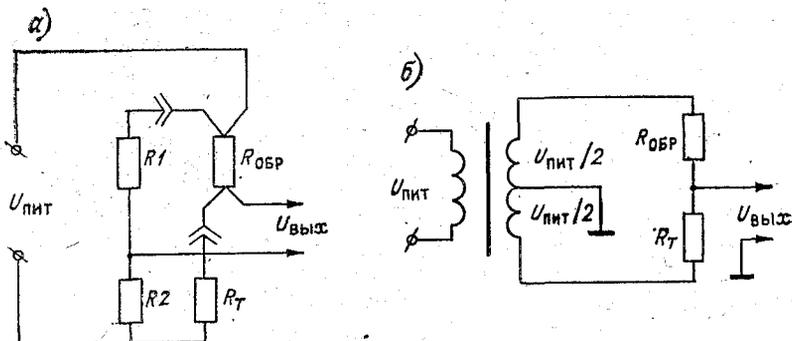


Рис. 2.2. Мостовые измерительные схемы терморезисторов постоянного (а) и переменного тока (б).

стики канала измерения температуры при наличии определенного разброса в параметрах применяемых терморезисторов.

В тех случаях когда необходимо обеспечить прямопоказывающий отсчет измеряемой температуры, применяют различные схемы линеаризации, однако все они ведут к снижению чувствительности термодатчика или требуют использования измерительных усилителей со стабильным коэффициентом передачи. Различные методы линеаризации мостовых схем постоянного тока и характеристики терморезистора довольно подробно описаны в работе [40]. Линеаризация неуравновешенных мостов переменного тока производится включением в одно из плеч измерительного моста последовательно с образцовым резистором $R_{\text{обр}}$ линеаризирующего трансформатора [21, 54]. В результате достигается стабилизация тока, протекающего через образцовый резистор $R_{\text{обр}}$ и, следовательно, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ этой мостовой схемы оказывается линейно зависящим от изменения величины T . Это напряжение $U_{\text{вых}}$ в момент баланса моста при изменении сопротивления терморезистора R_T , согласно выражению (2.1), определится как

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{пит}}/2) (AT + BT^2) / [2 - K_{\text{тр}} + (1 - K_{\text{тр}}) (AT + BT^2)]. \quad (2.5)$$

Отсюда следует, что при коэффициенте трансформации $K_{\text{тр}} \neq 1$ возникает возможность скомпенсировать нелинейность платинового терморезистора. Например, при $K_{\text{тр}} = 1,03576$ обеспечивается линейная зависимость $U_{\text{вых}}$ от T для $A = 2,98247 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $B =$

$= -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-2}$. Методика расчета всех параметров такой линейризующей цепи, включая элементы регулировки, подробно изложена в работе [21].

Вышеописанная схема реализована в канале измерения температуры *СТД*-измерителя MARK-III [123] и модернизированном варианте АЦИТа-А. В частности, в приборе MARK-III в качестве чувствительного элемента применен двойной платиновый терморезистор модель 171-VJ производства фирмы «Роузмаунт Инджениринг», каждый сопротивлением в 100 Ом при температуре 20 °С. При температуре 0 °С суммарное сопротивление данного термопреобразователя равно 185,3 Ом и постоянная времени 250 мс. Для ограничения эффекта самонагрева терморезистор в MARK-III включен в мостовую схему, где ток ограничен (1 мА), а $R_{\text{обр}}$ выбрано равным 2 кОм, что уменьшает чувствительность этого преобразователя примерно в 10 раз, поэтому в ней применен операционный усилитель, формирующий на выходе напряжение $U_{\text{вых}}$ частоты 10 кГц, изменяющееся от 0 до 500 мВ при температуре от 0 до 32,767 °С с погрешностью $\pm 0,0015$ °С с уровнем долговременной стабильности 0,005 °С в год.

Однако работа на переменном токе ведет к появлению в канале температуры целого ряда дополнительных погрешностей, обусловленных влиянием распределенных реактивных параметров проводящего терморезистора на результаты измерения. Для исключения распределенной индуктивности в терморезисторах используют бифилярную катушку жгута, как это сделано в приборе АЦИТ. Уменьшение же распределенной емкости может быть достигнуто только с помощью привлечения специальных схемных решений мостовой измерительной схемы. Как показано в работе [21], распределенная емкость термометра приводит к появлению квадратурной составляющей разбаланса измерительного моста.

Это означает, что полное сопротивление Z_T терморезистора на переменном токе не эквивалентно его активному сопротивлению R_T на постоянном. Как показали результаты расчетов многозвенной RC-цепи, образующей проводящий терморезистор АЦИТа с $R_T = 500$ Ом и суммарной распределенной емкостью $C_x = 600$ пкФ на частоте 10 кГц, максимальное различие сопротивлений Z_T и R_T составляет 0,26 Ом. Это эквивалентно погрешности по температуре $\pm 0,13$ °С. Отсюда следует необходимость выполнения градуировок и проверок термодатчиков таких средств измерения на переменном токе.

В соответствии с этим в последних конструкциях автономных *СТД*-измерителях в основном стремятся обеспечить необходимую точность измерений температуры на постоянном токе. Для этого в них используют операционные усилители постоянного тока с минимальным дрейфом нуля, например построенные на микросхемах 140УД12, вводится периодический контроль коэффициента усиления на постоянном токе, максимально снижается влияние контактных термо-ЭДС. По такой схеме построен измерительный канал температуры *СТД*-измерителя АЦИТ-У-02.

В последнее время в ряде автономных средств измерения температуры морской воды находят применение полупроводниковые терморезисторы (термисторы), выполненные из германия, кремния, окислов металлов [66, 89]. Эти первичные преобразователи используются тогда, когда допустима относительно невысокая точность измерения с погрешностью порядка $\pm 0,05^\circ\text{C}$ в сочетании с малой инерционностью. В связи с малыми конструктивными размерами таких преобразователей их постоянная времени может составлять не более 20—50 мс [103].

Зависимость сопротивления полупроводника R_T от температуры T можно представить в виде

$$R_T = R_0 \exp(B/T). \quad (2.6)$$

Коэффициент B определяют в процессе первичной поверки полупроводниковых терморезисторов путем измерения его сопротивления при двух известных значениях температуры. Относительно высокий температурный коэффициент $B = (2,5 \dots 3,0) \times 10^3 \text{ K}$ и большое удельное сопротивление позволяют конструировать термометры, обладающие высокой чувствительностью при малых конструктивных размерах, а также иметь довольно простые измерительные схемы. Как правило, для улучшения метрологических характеристик термисторов их используют в составе специальных линейаризующих схем подробно описанных в работе [101]. Малая постоянная времени термисторов делает их привлекательными для измерений турбулентных пульсаций температуры [135].

Совместное использование платиновых и полупроводниковых терморезисторов позволяет аппаратными средствами, встроенными в автономные приборы, осуществлять коррекцию динамических характеристик платиновых терморезисторов, приближая их инерционные свойства к постоянной времени датчиков электрической проводимости морской воды. Совмещение указанных характеристик крайне перспективно для снижения погрешностей определения значений всех гидрофизических параметров, рассчитываемых по результатам измерений температуры и электрической проводимости морской воды *in situ*. Наиболее удачно это реализовано в *CTD*-измерителе MARK-III, где для коррекции постоянной времени 250 мс двойного платинового термометра сопротивления с 100-омным чувствительным элементом 171-BJ фирмы «Роузмант Инжениринг» использован миниатюрный термистор № GC325M2 фирмы «Фенвал» с постоянной времени 25 мс. Термистор установлен в непосредственной близости от платинового элемента (см. рис. 1.2) и включен в сервобалансный мост, питание на который подается через интегратор с постоянной времени 250 мс платинового терморезистора. Особенностью работы данного моста является то, что при неизменной температуре T_i воды сигнал U_K на его выходе равен нулю, а при ступенчатом изменении температуры на выходе этого моста появляется корректирующий сигнал U_K , который сначала повторяет сигнал U_T , поступающий с термистора, а затем экспоненциально убывает с постоянной времени в 250 мс

(рис. 2.3). В результате сложения сигнала U_K с сигналом U_R от платинового элемента на выходе канала измерения температуры CTD-измерителя MARK-III формируется суммарный сигнал $U_K + U_R$, реакция которого на изменения температуры воды соответствует инерционности термистора, а амплитуда — однозначно

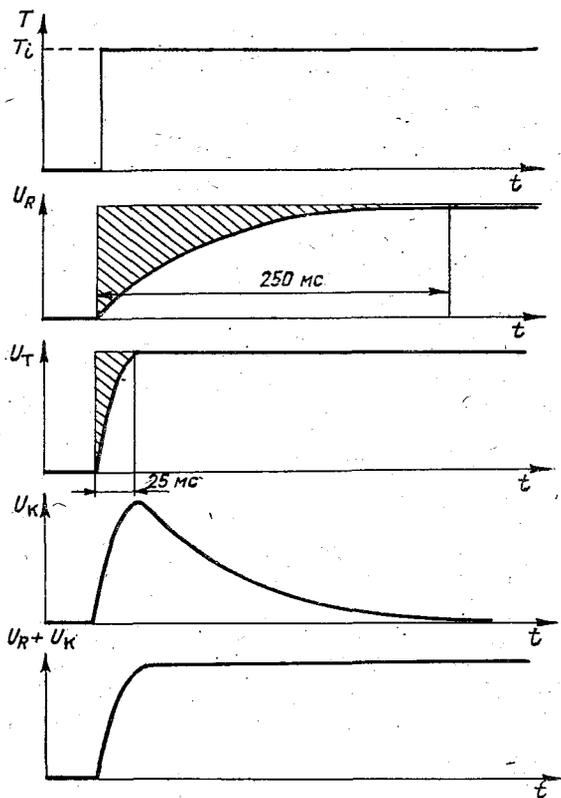


Рис. 2.3. Коррекция динамических характеристик канала измерения температуры платиновым терморезистором.

связана с сопротивлением платинового терморезистора. Такое совместное использование платиновых и полупроводниковых термометров сопротивления в одном измерительном канале позволяет успешно сочетать высокую долговременную стабильность первых с малой инерционностью вторых. Термисторные преобразователи температуры также полезны при коррекции термических погрешностей датчиков электрической проводимости.

Обычно динамические свойства проволочных и полупроводниковых терморезисторов описываются линейной моделью [89] первого порядка:

$$\tau_T dT_{\text{изм}}/dt = T_{\text{изм}} - T. \quad (2.7)$$

где $T_{\text{изм}}$, T — измеренная и действительная температура воды; τ_T — постоянная времени термодатчика, которая через его массу m , площадь S , удельную теплоемкость c_T и коэффициент α_0 конвективного обмена со средой выражается как

$$\tau_T = mc_T / (\alpha_0 S). \quad (2.8)$$

В тех случаях когда термометрическая погрешность терморезисторов может считаться существенной, например, при их перегреве измерительным током, для описания динамических характеристик первичных преобразователей целесообразно пользоваться нелинейной моделью, предложенной в работе [15]:

$$\tau_T dT_{\text{изм}}/dt = (T_{\text{изм}} - T)(V/V_0)^n + \epsilon_0, \quad (2.9)$$

где V — скорость обтекания водой термодатчика; n — эмпирический коэффициент, зависящий от параметров пограничного слоя вокруг датчика и от перегрева, значения которого лежат в пределах от 0 до 1; ϵ_0 — номинальное значение перегрева, которое имеет термодатчик при скорости V_0 его обтекания.

Теоретические и экспериментальные исследования модели (2.9) показали [15], что в реальных условиях эксплуатации автономных океанографических средств измерения термоанометрические погрешности, как правило, не превышают $\pm 0,03$ °C.

В отдельных океанографических средствах измерения, например, типа «Поток», используются кварцевые пьезокристаллические резонаторные преобразователи для измерения температуры морской воды. Работа таких преобразователей основана на зависимости упругих свойств пластины кристалла кварца от температуры окружающей среды [66]. В качестве термочувствительных кварцевых резонаторов применяют кварцевые пластины Y^{+5} -среза, AC -среза и LC -среза. В диапазоне температуры морской воды от -2 до $+45$ °C собственная частота f_T кварцевого резонатора с достаточной погрешностью до $\pm 0,001$ °C описывается следующим уравнением:

$$f_T = f_0 [1 + K_{T_1}(T - T_0) + K_{T_2}(T - T_0)^2 + K_{T_3}(T - T_0)^3], \quad (2.10)$$

где K_{T_1} , K_{T_2} , K_{T_3} — коэффициенты термочувствительности кварца, приведенные в работе [66]; T_0 — значение температуры, соответствующее начальной частоте f_0 кварцевого резонатора.

На рис. 2.4 представлена структурная схема кварцевого датчика температуры. В состав такой схемы входит генератор Γ_T , в резонансную цепь которого включен термочувствительный кварцевый элемент P_T , имеющий Y^{+5} -срез, и генератор Γ_0 — опорной, как правило, кварцовой частоты f_0 . В резонансную цепь опорного генератора включают обычные термостабилизированные пьезоэлементы типа BT - или AT -срезов. Для обеспечения требуемой частоты f_0 опорного кварца между генератором Γ_0 и схемой вычитания частот ВЧ включают делитель частоты. Основным достоинством кварцевого датчика температуры является возможность прямого цифрового выхода этого измерительного канала

СТД-систем. В настоящее время в автономных океанографических приборах используют термочувствительные резонаторы в диапазоне частот 2—5 МГц. Тогда для аппаратурной реализации кварцевых датчиков температуры возможно использовать маломощные микросхемы, имеющие граничную частоту не более 5 МГц, и тем

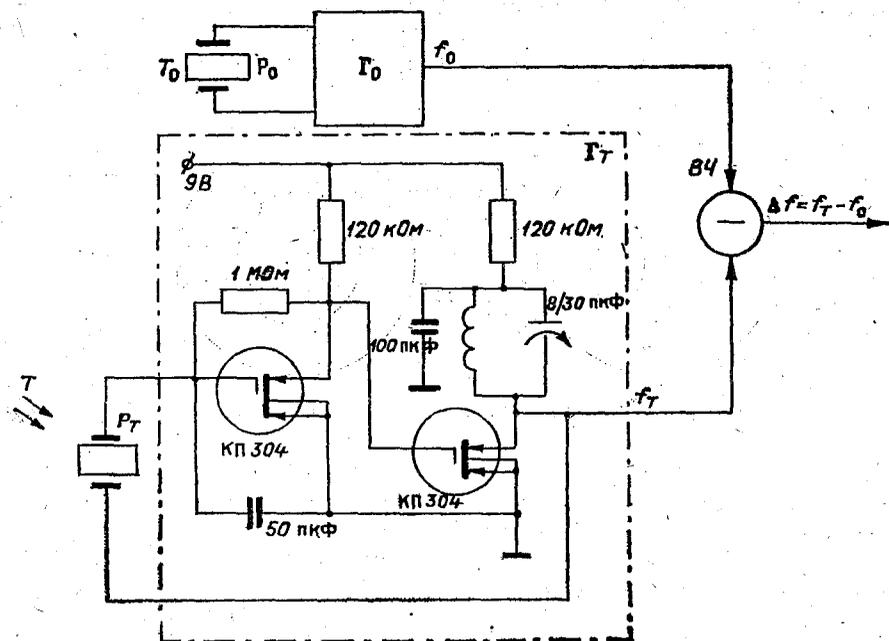


Рис. 2.4. Структурная схема пьезорезонансного кварцевого датчика температуры.
 P_0 , P_T — кварцевые резонаторы: опорный (P_0) и измерительный (P_T).

самым достигнуть приемлемой мощности потребления не более 5 мВт.

Например, в измерителях «Поток» в качестве опорного кварцевого резонатора применен элемент РК-169, а в качестве термочувствительного — элемент типа РК-112МА-5000 КОД. Термочувствительность такого преобразователя составляет $f_T/T \approx 1000$ Гц/К. Это позволяет обеспечивать измерение температуры морской воды с необходимой погрешностью $\pm 0,01^\circ\text{C}$ за относительно малый интервал времени в 1 с.

2.2. Датчики электрической проводимости морской воды

Для измерения электрической проводимости морской воды в автономных океанографических приборах применяют индуктивные преобразователи, реализующие бесконтактный метод измерения, и четырех (трех)-электродные кондуктометрические ячейки,

предполагающие непосредственный контакт электродов с морской водой.

В отечественных средствах измерения электрической проводимости морской воды (АЦИТ, зонд-батометр, «Исток») наибольшее распространение к настоящему времени получили индуктивные первичные преобразователи на тороидальных ферритовых сердечниках [88, 89]. На каждом из этих сердечников $Tr1$ и $Tr2$ имеется по одной независимой обмотке $W1$ и $W2$ с числами витков соот-

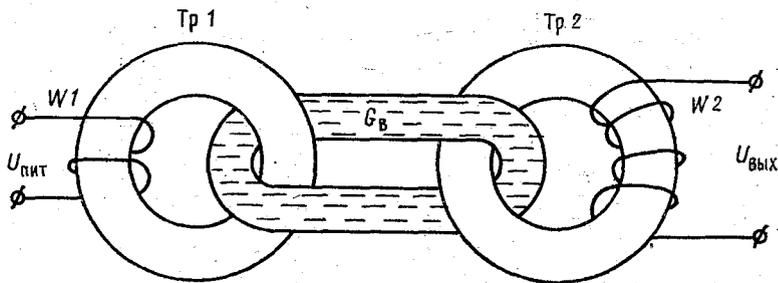


Рис. 2.5. Индуктивный преобразователь электрической проводимости.

ветственно равными w_1 и w_2 , а сами сердечники связаны между собой витком морской воды, проходящим через отверстие торов (рис. 2.5). Принцип действия такого простейшего индуктивного преобразователя основан на очевидной зависимости взаимной электромагнитной связи сердечников от электрической проводимости G_v охватывающего их витка воды. Это означает, что при подаче переменного напряжения постоянной частоты $f_{пит}$ и амплитуды $U_{пит}$ на возбуждающую обмотку $W1$ сердечника $Tr1$ на второй $W2$ будет наводиться ЭДС, которая ($U_{вых}$) будет однозначно характеризовать электрическую проводимость G_v эквивалентного витка воды в месте расположения датчика, согласно следующей зависимости:

$$U_{вых} = U_{пит} \mu_0 \mu_c (\omega_2 / \omega_1) 2\pi f_{пит} G_v (S_c / l_c), \quad (2.11)$$

где μ_c — относительная магнитная проницаемость сердечника; μ_0 — магнитная постоянная; S_c , l_c — соответственно площадь поперечного сечения сердечника и длина его магнитной силовой линии.

Обычно электрическую проводимость морской воды характеризуют ее удельной величиной κ , представляющей собой отношение G_v к эффективной длине L линий тока, которые замыкаются вокруг датчика. Если ввести понятие геометрической постоянной C_κ датчика, определяемой при его градуировке, то полная проводимость G_v будет связана с удельной κ следующим соотношением:

$$\kappa = G_v / L = C_\kappa G_v. \quad (2.12)$$

Таким образом, выходное напряжение $U_{вых}$ на измерительном трансформаторе может однозначно характеризовать электриче-

скую проводимость G_B , а после учета геометрической постоянной C_{κ} и удельную проводимость κ морской воды. Однако такой простейший датчик индуктивного типа практически не применяется в океанографических приборах, поскольку в них не удастся обеспечить необходимую стабильность питающего напряжения $U_{\text{пит}}$, от которого прямо зависит результат измерения G_B . Поэтому в подавляющем числе средств измерения электрической проводимости морской воды нашли применение компенсационные измерительные схемы. Наиболее удачное решение для автономных цифровых приборов с использованием трансформаторного АЦП применено в АЦИТе (рис. 2.6). Здесь (см. рис. 2.6 а) осуществляется непосредственная компенсация тока во вторичной цепи измерительного трансформатора $Tr2$ с помощью резистора R_0 и использована резонансная схема его частичного включения в контур, что в целом повышает к. п. д. работы индуктивного датчика [2]. Сила тока через резистор R_0 определяется сигналом с трансформаторного делителя, управляемого нуль-органом (НО) АЦП, выходной код которого однозначно характеризует измеряемое значение G_B . Однако индуктивные преобразователи даже при наличии резонансного контура имеют недостаточно высокий к. п. д. Например, датчики АЦИТа, собранные на ферритовых сердечниках типа М2000НМ1, типоразмер кольца $K45 \times 28 \times 8$, с параметрами $\mu_c = 2000$, $S_c = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $l_c = 9 \cdot 10^{-2}$ и работающие на частоте $f_{\text{пит}} = 10 \text{ кГц}$ и $U_{\text{пит}} = 15 \text{ В}$, имеют к. п. д. не больше %. Причина столь низкого к. п. д. заключается в бесконтактном методе передачи энергии в виток и обратно, согласно которому наблюдается резкое рассогласование активного сопротивления витка воды $R_B = 1/G_B$ и индуктивного χ_{L_B} . В данном случае для $\kappa = 6 \text{ См/м}$, $R_B = 40 \text{ Ом}$, а $\chi_{L_B} = 0,1 \text{ Ом}$.

В результате при измерениях электрической проводимости морской воды сигнал на резонансном контуре LC с добротностью порядка 20 не может превысить 200 мВ. Это требует включения на выходе датчика не только резонансного контура, но и широкополосного операционного усилителя ОУ (см. рис. 2.6 а). Однако даже в этом случае крайне затруднительно обеспечить измерения электрической проводимости воды G_B с погрешностью $\pm 0,01 \%$, так как возникает необходимость различать выходные электрические сигналы контура на уровне 20 мкВ, что близко к порогу шумов примененного усилителя.

Принципиально известны несколько путей повышения чувствительности индуктивных датчиков [112]. Один из них это применение сердечников с большей магнитной проницаемостью, например, ферритов с $\mu_c = 6000$ или пермаллоя с $\mu_c = 50\,000$. Однако такие материалы крайне нестабильны и чувствительны к механическим воздействиям [107], что снижает эффективность применения резонансного контура и снижает его добротность.

Другой путь повышения чувствительности — увеличение напряжения питания преобразователя ограничен порогом насыщения

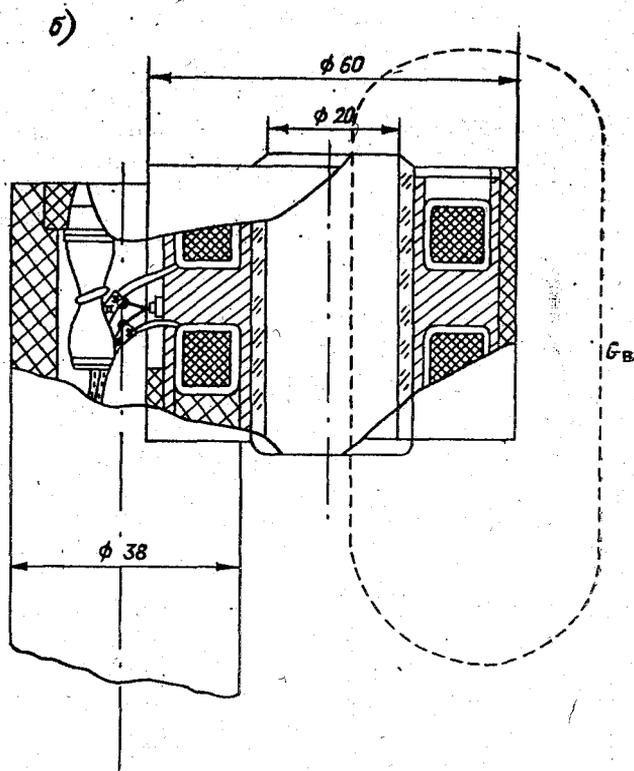
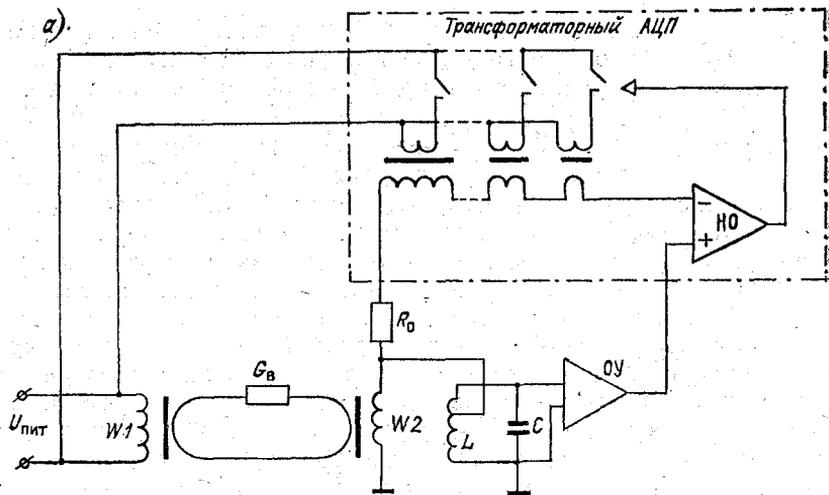


Рис. 2.6. Канал измерения электрической проводимости АЦИТа.
а — измерительная схема; б — первичный преобразователь.

возбуждающего сердечника. В рассмотренном примере при индукции насыщения $B_m = 0,1$ Тл максимально допустимое напряжение в витке воды составит 0,32 В.

Принципиально возможен и третий путь, заключающийся в повышении питающей частоты. Однако, как показали теоретические исследования, результаты которых изложены в работе [19], это ведет к усилению скин-эффекта самоэкранирования электромагнитного поля индуктивного преобразователя вихревыми токами. Известно, что толщина скин-слоя зависит от электрической проводимости среды, в данном случае морской воды, и, следовательно, эффект самоэкранирования такого датчика вызывает нелинейность его градуировочной характеристики. В частности, у прибора АЦИТ нелинейность для частоты 10 кГц питания преобразователя составляет $\pm 0,3\%$, а для частоты 30 кГц — уже $\pm 0,6\%$.

Кроме недостаточной чувствительности индуктивные преобразователи имеют и другие недостатки, связанные с изменчивостью магнитной проницаемости μ_c сердечников во времени, от температуры и действующего на них давления. Даже применение таких специальных мер, как искусственное старение температурными циклами сердечников, изготовленных из устойчивых марок ферритов М2000НМ, М1500НМ, не обеспечивают в течение года 5% стабильности их характеристик. Изменение же внешнего давления от 0 до 60 МПа может изменять проницаемость сердечника на 30—40%.

Применение компенсационного метода преобразования сигнала с индуктивных преобразователей в цифровой код, конечно, исключает непосредственное влияние нестабильности характеристик сердечников на результаты измерения электрической проводимости, но наличие резонансного контура в измерительной цепи и неустраненной емкости наводки могут приводить к существенной квадратурной помехе. В результате в приборах такого типа наблюдается дополнительная погрешность от давления на уровне $\pm 0,1\%$ на 10 МПа внешнего давления. Для исключения рассматриваемой погрешности в целом ряде океанографических приборов сердечники индуктивных преобразователей стремятся защищать от воздействия гидростатического давления металлическим герметичным корпусом. Такой корпус требуется изолировать от морской воды. При этом появляется новая причина нестабильности, связанная с нарушением его изоляции. В итоге качество и надежность такой изоляции (у зонд-батометра это окраска) оказывается влияющим фактором на метрологические характеристики канала измерения электрической проводимости. В зарубежных приборах (типа РСМ) для устранения этой причины нестабильности применяют датчики, покрытые снаружи специальной резиной. При отсутствии соответствующей технологии производства индуктивных датчиков электрической проводимости с прочным изолирующим покрытием можно рекомендовать переходить к конструкциям с использованием сдвоенного тороидального сердечника для построения возбуждающего трансформатора $Tr1$. В таком трансформаторе возбуждающая обмотка охватывает оба сердечника, а дополнитель-

ная — только один из них, что позволяет компенсировать изменения магнитного потока, связанные с нестабильностью магнитной проницаемости сердечника [20].

Указанные выше обстоятельства привели к широкому использованию в современных океанографических приборах для измерения электрической проводимости воды наряду с индуктивными датчиками кондуктометрических ячеек. Их принцип действия основан на прямой зависимости сопротивления ячейки $R_{я}$ от электрической проводимости жидкости, заполняющей ее межэлектродный объем [19]. Несомненным достоинством кондуктометрических измерительных преобразователей является более высокая чувствительность к электрической проводимости, чем у индуктивных. В работах [19, 103] указывается, что в таких преобразователях легко достигается согласование по мощности сопротивления ячейки с входным сопротивлением нуль-индикатора, что обеспечивает к. п. д. не менее 50 %. При этом выходное напряжение $U_{вых}$ на единицу дискретности, равное 0,01 % диапазона измерения электрической проводимости морской воды, составит почти 5 мВ, а не 20 мкВ, как в индуктивном преобразователе.

Простейшие конструкции двухэлектродных ячеек из-за нестабильности переходного сопротивления электродов практически не применяются для измерения *in situ* электрической проводимости воды в океане. Для этих целей преимущественно привлекаются четырех- или трехэлектродные ячейки с отдельными токовыми (питающими) и потенциальными (измерительными) электродами. К последним подключается измерительная схема напряжения $U_{вых}$ с большим входным сопротивлением. Поэтому в таком кондуктометрическом преобразователе переходное сопротивление двойного слоя вблизи электродов не должно оказывать заметного влияния на результат измерений. Подобный четырехэлектродный первичный преобразователь применен в измерителях MARK-III и моделях 195-М, 196-РМ [123, 125]. Однако в натуральных условиях был обнаружен дрейф характеристик таких преобразователей на 0,0005 % за 1 ч работы [131]. Предполагается, что это связано с отложениями карбоната кальция или магния (возможно одновременно) на внутренних поверхностях ячейки. Как показали лабораторные исследования данного датчика, отложения морских солей, толщиной 0,00002 мм, на его внутреннем диаметре, равном 62 мм, вызывают изменения показаний почти на $\pm 0,0008$ %. Согласно инструкции по эксплуатации этих средств измерения, требуется не реже 1 раза в 3 мес промывать ячейки 0,1 н. раствором КСl или растворителем фирмы «Дженерал Камилк» для обеспечения погрешности измерения не хуже $\pm 0,01$ %.

В отечественных СТD-измерителях АЦИТ-У-02 применена трехэлектродная ячейка электрической проводимости морской воды [6] (рис. 2.7). В этом кондуктометрическом преобразователе имеется только один отдельный токовый 3 и один отдельный потенциальный 4 электроды, а в качестве второго токового и потенциального электрода используется наружная поверхность

крышки 5 корпуса подводного аппарата CTD-измерителя. По принципу действия и метрологическим характеристикам такая ячейка близка к четырехэлектродной, но отличается более технологичной конструкцией и измерительной схемой, которая соединена общей шиной с корпусом прибора и ячейки. В соответствии

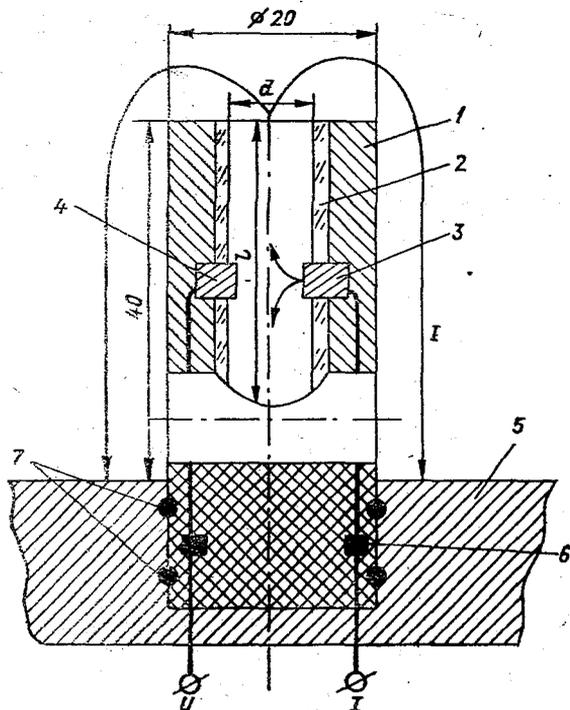


Рис. 2.7. Трехэлектродная кондуктометрическая ячейка электрической проводимости.

1 — корпус ячейки; 2 — калибровочная кварцевая трубка; 3 — токовый электрод; 4 — потенциальный электрод; 5 — крышка корпуса прибора; 6 — уплотнения токовводов; 7 — кольца герметизирующие.

с этим ток I протекает через ячейку между токовым электродом 3 и наружной поверхностью 5 корпуса.

Как показали результаты математического моделирования такой ячейки [14], конфигурация линий тока, изображенных на рис. 2.7 и формирующих проводящий канал столба измеряемой жидкости, определяется не формой и размерами электродов, а размерами центрального осевого канала, где имеет место наибольшая плотность линий тока. Поэтому для улучшения метрологических характеристик конструкции трехэлектродного преобразователя центральный осевой канал калиброван по длине l и сечению d кварцевой трубкой 2. В описанной конструкции на основании математического моделирования выбраны следующие

размеры кварцевой трубки 2: $l=25$ мм, $d=5$ мм. Работа данного преобразователя может происходить при питании переменным током как синусоидальной, так и прямоугольной формы. При этом частота питающего напряжения выбирается такой, чтобы изменения направления тока не позволяли возникнуть явлению электролиза воды в ячейки. Экспериментальные исследования конструкции этой трехэлектродной ячейки в лабораторных условиях показали, что при ее заполнении водой с удельной электрической про-

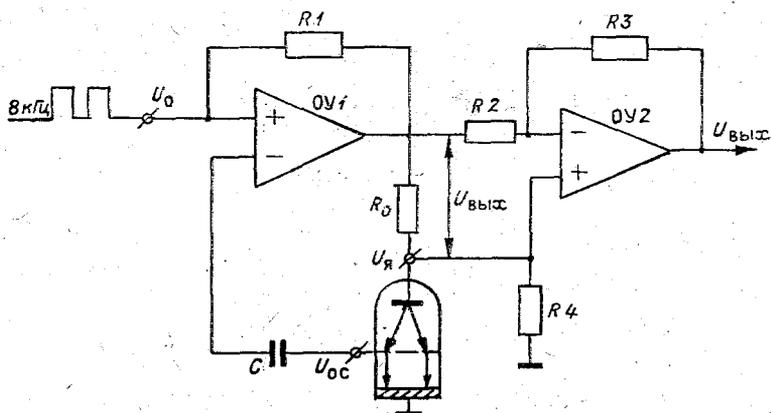


Рис. 2.8. Измерительная схема трехэлектродной ячейки электрической проводимости.

водимостью 6 См/м полное сопротивление между электродами и корпусом составляет около 130—140 Ом. При этом переходный слой характеризуется емкостным сопротивлением порядка 10 Ом, причем это сопротивление может в процессе измерений меняться на 30—40 %. Отсюда следует, что точные измерения κ в таком кондуктометрическом преобразователе возможны только при стабилизации тока, протекающего по цепи токовый электрод — корпус ячейки. На этом принципе построена работа измерительной схемы, приведенной на рис. 2.8 и примененной в АЦИТе-У-02 и ДУ-МГ. В данной схеме питание ячейки (Я) производится напряжением с прямоугольной формой изменения частотой 8 кГц, а стабилизация тока осуществляется генератором тока, выполненного на основе операционного усилителя ОУ1. Его выход подключен через опорный резистор R_0 к токовому электроду 3 ячейки. На прямой вход ОУ1 подается опорное напряжение U_0 , а на инвертирующий вход через конденсатор C — сигнал отрицательной обратной связи U_{oc} с потенциального электрода 4 ячейки. При таком включении элементов измерительной цепи на выходе операционного усилителя ОУ1 автоматически устанавливается напряжение на таком уровне, при котором напряжение обратной связи на потенциальном электроде 4 почти равно опорному напряжению U_0 . Остаточная нелинейность компенсируется положительной обратной связью на ре-

резисторе R_1 . В результате сила тока автоматически регулируется так, что независимо от электрической проводимости воды на потенциальном электроде 4 поддерживается постоянное напряжение, равное опорному. В этом случае ток через ячейку оказывается прямопропорциональным измеряемой электрической проводимости воды, а коэффициентом пропорциональности служит геометрическая постоянная $C_{я}$ ячейки. Ток I в ячейке измеряется по напряжению $U_{вых}$ на опорном резисторе R_0 , который включен последовательно с токовым электродом 3 и корпусом схемы. Второй операционный усилитель OU_2 в данном устройстве совместно с резисторами R_2, R_3, R_4 служит для формирования требуемого уровня выходного сигнала схемы. При указанных параметрах данной ячейки и коэффициенте усиления операционного усилителя OU_1 порядка 10^4 — 10^5 возможная нелинейность характеристики такого датчика за счет нестабильности тока составляет 0,02—0,03 %. Возникающая при этом случайная погрешность, обусловленная изменчивостью переходных сопротивлений электродов, не превышает $\pm 0,005$ %. Использование в качестве образцового сопротивления R_0 высокостабильного резистора типа С2-29 В, позволяет снизить погрешность измерения электрической проводимости до $\pm 0,01$ %. Описанная конструкция трехэлектродной ячейки имеет определенные преимущества перед традиционными четырехэлектродными в части устойчивости к загрязнению. Это обусловлено тем, что, во-первых, потенциальный электрод 4 устанавливается в трехэлектродной ячейке в таком месте, где линии тока разветвляются (см. рис. 2.7) и, следовательно, градиент потенциала минимален. Во-вторых, изменения площади исключительно большой поверхности корпуса, где замыкаются линии тока, также не могут сколь заметно влиять на геометрическую постоянную ячейки.

Экспериментальные лабораторные исследования отдельных образцов таких ячеек, выполненные в специальном калибровочном термостате объемом 15 дм³ с раствором КСl при температуре $+22$ °С, подтвердили их высокие метрологические характеристики. Дополнительно проводились климатические испытания в диапазоне температуры от -2 до $+30$ °С, проверялась устойчивость измерительной схемы к термоциклам с перепадом температуры от -50 до $+60$ °С и к изменению амплитуды питающего напряжения от 9 до 13 В. Полученные результаты показали, что дополнительные погрешности от изменения температуры и питающего напряжения не превышают $\pm 0,02$ %.

Выполнялись в лабораторных условиях в том же калибровочном термостате при температуре 22 °С испытания ячейки на устойчивость к загрязнению. Методика этих испытаний заключалась в покрытии части поверхности электродов изолирующим лаком. Загрязнение поверхности потенциального и питающего электродов в виде отдельных равномерно распределенных точек лака диаметром около 0,3—0,5 мм, покрывающих до 50 % площади, на результат измерения практически не влияло. Тот же эффект наблю-

дался при сплошном покрытии 50 % поверхности указанных электродов с ориентацией границы раздела чистой и загрязненной части вдоль центрального канала. При перпендикулярном направлении этой границы относительно оси канала значение геометрической постоянной $C_{\text{ж}}$ менялось в пределах $\pm 0,02$ % в зависимости от соотношения между площадями чистой и загрязненной поверхностей питающего и потенциального электродов.

Существует еще два обстоятельства, которые учитываются при проектировании датчиков электрической проводимости морской воды, предназначенных для измерений *in situ*. Это объем пространственного осреднения и динамические погрешности, вызванные теплообменом датчиков со средой.

Как следует из работ [42, 43], 1 %-ная неоднородность поля электрической проводимости оказывает почти 0,01 %-ное влияние на показания индуктивного трансформаторного датчика на расстоянии почти $10 R/r$, где R , r — соответственно внутренний и внешний радиусы тороидальных трансформаторов от центра датчика. В соответствии с этим можно считать, что индуктивные датчики осуществляют осреднение электрической проводимости практически в десятикратном объеме по сравнению с собственными размерами. Отсюда вытекает необходимость их градуировки и поверки в ваннах значительных объемов, а также точном соблюдении геометрического расположения всех сопутствующих деталей *STD*-систем.

В отличие от индуктивных преобразователей электрической проводимости кондуктометрические ячейки измерения проводимости осуществляют осреднение только в объеме воды, заполняющей внутреннее центральное отверстие, поскольку линии тока полностью концентрируются вокруг самой конструкции ячейки. Практически объем пространственного осреднения такой ячейки не превышает собственного конструктивного объема.

Физическая причина возникновения динамических погрешностей датчиков электрической проводимости обусловлена нестационарным характером теплообмена такого датчика с исследуемой средой [14]. Взаимодействие неоднородного теплового поля исследуемого водного потока с датчиком, изготовленным из материалов с различными теплофизическими свойствами, и некоторая замедленность процесса обмена воды в датчике вызывают временную задержку в показаниях, эквивалентную инерционности датчика температуры. Как правило, указанная погрешность в $\pm (0,01 - 0,02)$ % проявляется наиболее заметно при выполнении *СТ*-зондирования океана, а в автономных средствах измерения электрической проводимости может практически не учитываться.

2.3. Гидростатические датчики глубины уровня и волнения

Гидростатическое давление непосредственно служит для определения глубины расположения океанографических приборов, а также для расчета солености и плотности морской воды, скорости

звука в воде, частоты Вайсяля—Брента и т. п. При фиксировании приборов на одном горизонте или у дна информация о гидростатическом давлении после соответствующей обработки может и использоваться для получения данных об уровне и элементах волнения в океане.

В современных средствах измерения гидростатического давления наибольшее распространение получили вибротронные и тензо-

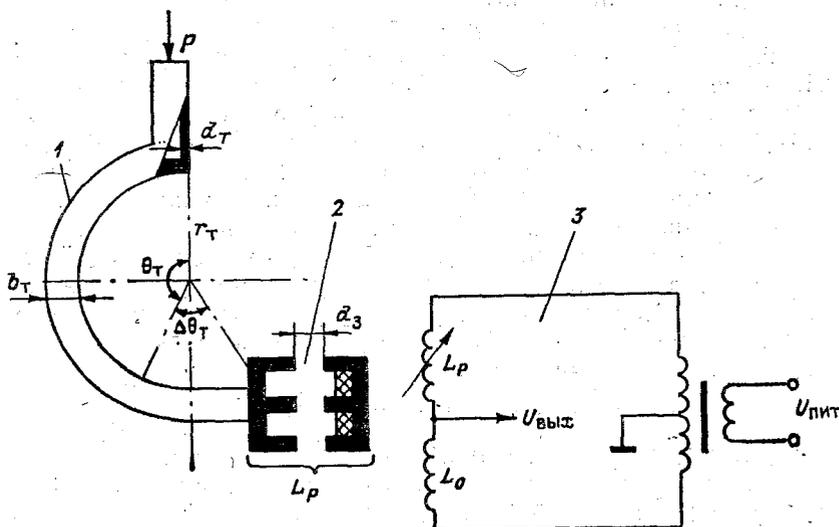


Рис. 2.9. Датчик гидростатического давления на основе С-образной трубки Бурдона (1) с индуктивным ферритовым преобразователем (2) и мостовая трансформаторная схема (3).

метрические, а также измерительные преобразователи давления на основе манометрических трубок Бурдона.

Датчики с чувствительным элементом в виде С-образной трубки Бурдона в настоящее время применяются в отечественных автономных океанографических приборах для измерения глубины, а в отдельных случаях и уровня [86]. Отечественная промышленность освоила производство таких трубок для всего диапазона давления, встречающегося в практике океанографических исследований (рис. 2.9). Имеются С-образные трубки на следующие диапазоны давлений: 0,16; 0,6; 1,0; 6,0; 10; 16; 25; 60 мПа. Их точностные характеристики, как правило, нормируются погрешностью, приведенной к верхнему пределу диапазона измерения, равной $\pm 1\%$.

Обычно функция преобразования чувствительного элемента гидростатического преобразователя на основе С-образной манометрической трубки Бурдона при эллиптической форме сечения описывается приближенной эмпирической формулой [81] вида

$$\Delta\theta_T/\theta_T = 1,16r_T^2P/(d_T E b_T), \quad (2.13)$$

где $\Delta\theta_T$ — угол поворота свободного конца трубки; θ_T — угол, образованный радиусами, проведенными из конца трубки, при нулевом избыточном давлении P_0 ; r_T — радиус линии изгиба трубки; d_T — толщина стенок трубки; E — модуль упругости материала, из которого изготовлена трубка; b_T — расстояние между серединами внутренней и наружной стенок.

В океанографическом приборостроении в качестве преобразователей линейных перемещений концов этих трубок в электрический сигнал обычно используют индуктивные преобразователи, включенные в мостовые трансформаторные схемы (рис. 2.9).

Например, в АЦИТе в датчике глубины применена конструкция индуктивного преобразователя с ферритовым сердечником ОБ-20 феррита марки М2000НМ1 чашечного типа, установленного на подвижном конце трубки Бурдона [23]. В результате изменения входного давления P изменяется положение трубки и, следовательно, толщина зазора d_3 в замкнутой магнитной цепи этого индуктивного преобразователя, изменяется индуктивность L_p этого преобразователя, в итоге на выходе моста возникает напряжение разбаланса $U_{\text{вых}}$, однозначно характеризующее измеряемое давление P . Зависимость индуктивности L_p от размеров зазора описывается следующим нелинейным выражением [101]:

$$L_p = \omega^2 / [l_c / (\mu_0 \mu_c S_c) + 2d_3 / (\mu_0 S_0)], \quad (2.14)$$

где ω — число витков катушки; l_c — полная длина магнитной силовой линии при $d_3 = 0$; μ_c — относительная магнитная проницаемость сердечника; S_c , S_0 — площади поперечного сечения магнитопровода и зазора.

Датчики с такими индуктивными преобразователями обладают существенной нелинейностью. Кроме того, воздействие температуры в диапазоне от -40 до $+40^\circ\text{C}$ приводит к появлению остаточного гистерезиса чувствительного элемента и, как следствие, ухудшению стабильности метрологических характеристик подобных преобразователей давления.

В то же время многочисленные экспериментальные исследования манометрической трубки Бурдона показали, что качество изготовления самой трубки может обеспечить измерения давления с приведенной погрешностью не более $\pm 0,1\%$. При этом сама зависимость d_3 от P остается строго линейной. Поэтому при проектировании более точных датчиков гидростатического давления, предназначенных, например, для получения данных об уровне или волнении моря в шельфовой зоне, необходимо использовать другие типы вторичных преобразователей перемещения конца трубки Бурдона в электрический сигнал. В частности, для этого возможно использовать дифференциально-трансформаторные преобразователи. Такой преобразователь (рис. 2.10 а) представляет собой две плоскопараллельные катушки $L1$, $L3$, закрепленные неподвижно, и одну подвижную катушку в зазоре между ними, установленную на подвижном конце манометрического чувствительного элемента (С-образной) трубки. Все три катушки намотаны на каркасы из

оргстекла. При определенном подборе геометрических размеров таких катушек ($D < d_3/3L$) обеспечивается с погрешностью $\pm 0,3\%$ линейная зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, сни-

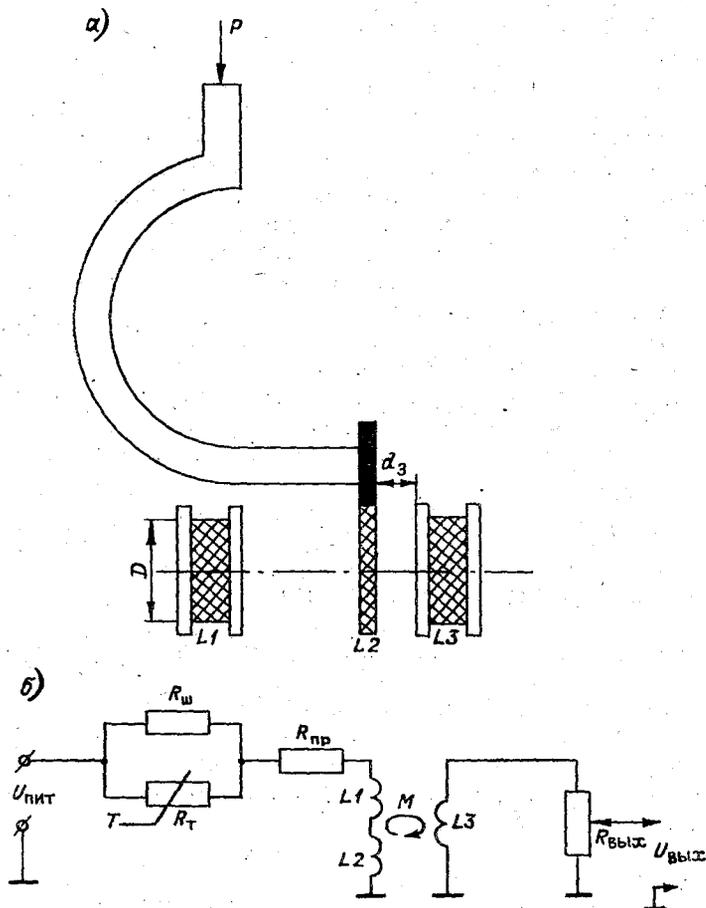


Рис. 2.10. Датчик гидростатического давления с дифференциально-трансформаторным преобразователем (а) и его эквивалентная схема (б).

маемого с подвижной катушки, от гидростатического давления P , действующего на трубку. Питание такого преобразователя осуществляется от источника напряжения $U_{\text{пит}}$ переменного тока с частотой 10 кГц, которое подается на включенные встречно-последовательно неподвижные катушки $L1$; $L2$ (рис. 2.10 б). Таким образом, они образуют два встречных переменных магнитных поля в зазоре, где помещена подвижная катушка $L2$. При изменении положения подвижной катушки магнитная связь ее с двумя неподвижными меняется и в ней наводится переменная ЭДС, пропор-

циональная перемещению d_3 . За счет дифференциального включения неподвижных катушек нелинейный характер зависимости коэффициента магнитной связи между двумя катушками компенсируется и в пределах перемещения трубки Бурдона на 2 мм погрешность не превосходит $\pm 0,3\%$.

Для снижения влияния температуры в схему датчика введен добавочный компенсационный терморезистор R_T типа СТЗ-17 номинала $68 \text{ Ом} \pm 10\%$, зашунтированный постоянным резистором $R_{ш}$ типа ОМЛТ номинала $62 \text{ Ом} \pm 5\%$. Такая комбинация из двух параллельных сопротивлений позволяет практически точно скорректировать температурные изменения сопротивления $R_{пр}$ обмоточного провода неподвижных катушек и тем самым полностью исключить внесение в этот преобразователь дополнительных температурных погрешностей. Необходимость включения в приведенную схему шунтирующего резистора $R_{ш}$ обусловлена нелинейным характером зависимости сопротивления терморезистора от температуры, имеющей вид (2.6) и линейной зависимостью сопротивления обмоточного провода. Как следует из приведенной на рис. 2.10 б эквивалентной схемы данного преобразователя, модуль выходного напряжения $U_{вых}$ будет связан с его параметрами следующим соотношением:

$$U_{вых} = U_{пит} M L_3 R_3 / [(R_1 + R_2) L_3 + R_3 (L_1 + L_2)], \quad (2.15)$$

где L_1 и R_1 , L_2 и R_2 , L_3 и R_3 — индуктивность и сопротивление обмоток 1, 2, 3-й катушек соответственно; M — коэффициент связи между обмотками этих катушек.

Тензометрические датчики гидростатического давления сравнительно недавно начали применяться в океанографическом приборостроении. Принцип их действия основан на тензоэффекте — зависимости сопротивления тензорезистора R_e от изменения его линейных размеров, вызванных действующим давлением. Указанная зависимость R_e от деформации описывается нелинейным уравнением следующего вида [66]:

$$R_e = R_0 (1 + k_1 \varepsilon + k_2 \varepsilon^2), \quad (2.16)$$

где R_0 — сопротивление ненагруженного тензорезистора; k_1 , k_2 — коэффициенты тензочувствительности; ε — относительная деформация.

В свою очередь относительная деформация однозначно связана с действующим напряжением σ :

$$\varepsilon = \sigma / E, \quad (2.17)$$

где E — модуль Юнга.

Наиболее перспективные тензометрические преобразователи гидростатического давления построены на полупроводниковых тензорезисторах, выполненных по интегральной технологии [34]. Такие тензорезисторы обладают более высокой чувствительностью к деформации, чем проволочные. Для коррекции нелинейности характеристики преобразования тензорезисторы включают в четырех-

плечевой мост. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ такого моста в случае симметричной деформации тензометров и их близких характеристиках выразится как [101]

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} k_e |\varepsilon| (1 + \alpha_e \Delta T), \quad (2.18)$$

$k_e = k_1 + k_2$ — коэффициент тензочувствительности мостовой схемы; α_e — температурный коэффициент термочувствительности; ΔT — интервал температуры, в котором происходит измерение давления.

Тензопреобразователи и в первую очередь полупроводниковые обладают значительной термочувствительностью, которая приводит к дополнительной погрешности $\pm (5-10) \%$. Для ее уменьшения наиболее эффективными оказались мостовые измерительные схемы, в которые дополнительно с тензорезисторами включаются полупроводниковые терморезисторы. Такие методы структурной термокомпенсации подробно описаны в работе [101] и основаны на том, что указанные терморезисторы и тензорезисторы имеют температурный коэффициент сопротивления (ТКС) противоположного знака. Удовлетворительное качество снижения термочувствительности тензорезисторных мостов также может быть достигнуто включением последовательно с ними постоянных термoneзависимых резисторов. Таким путем фирме «Вэлвайн Электрик» (Welwyn Electric) удалось создать измерительный тензопреобразователь давления, имеющий дополнительную погрешность не более $\pm 0,1 \%$ на 10°C в диапазоне температуры от 0 до $+60^\circ\text{C}$.

В настоящее время подобного типа полупроводниковые измерительные тензопреобразователи «Сапфир-22» освоены отечественной промышленностью [29, 34, 53]. Чувствительным элементом такого преобразователя служит кристаллическая мембрана из сапфира с нанесенными на ее поверхность кремниевыми тензорезисторами. Такие датчики отличаются высокой долговременной стабильностью, малым гистерезисом и высокой чувствительностью. Конструкция тензопреобразователя Д16 и Д100 для датчика «Сапфир-22», предназначенного для измерения давления в 16 и 100 МПа, включает в себя двухслойную мембрану, корпус 5, на котором крепится металлическая мембрана 4, крышку 1 и коллектор (рис. 2.11). Сапфировая мембрана 3 по всей плоскости жестко соединена с металлической мембраной 4, образуя вместе с ней двухслойную мембрану. Измеряемое давление поступает во внутреннюю полость тензопреобразователя и действует на двухслойную мембрану. С незначительными отличиями в конструкции такие измерительные преобразователи выпускаются на давление 2,5 МПа. Тензорезисторы, выполненные по такой технологии имеют при температуре 23°C сопротивление $(3,25 \pm 0,25)$ кОм. В результате сопротивления моста, в который включены эти тензорезисторы, в диапазоне рабочей температуры от -50 до $+80^\circ\text{C}$ находится в пределах 2,7—3,8 кОм. Питание моста осуществляется постоянным током 2мА. Начальное значение выходного сигнала, соответствующего нулевому давлению при температуре 23°C не

превышает 12 мВ, а в конце измеряемого диапазона давления находится в пределах 280—420 мВ.

Преобразователи, изготовленные по такой технологии, имеют следующие нормированные метрологические характеристики:

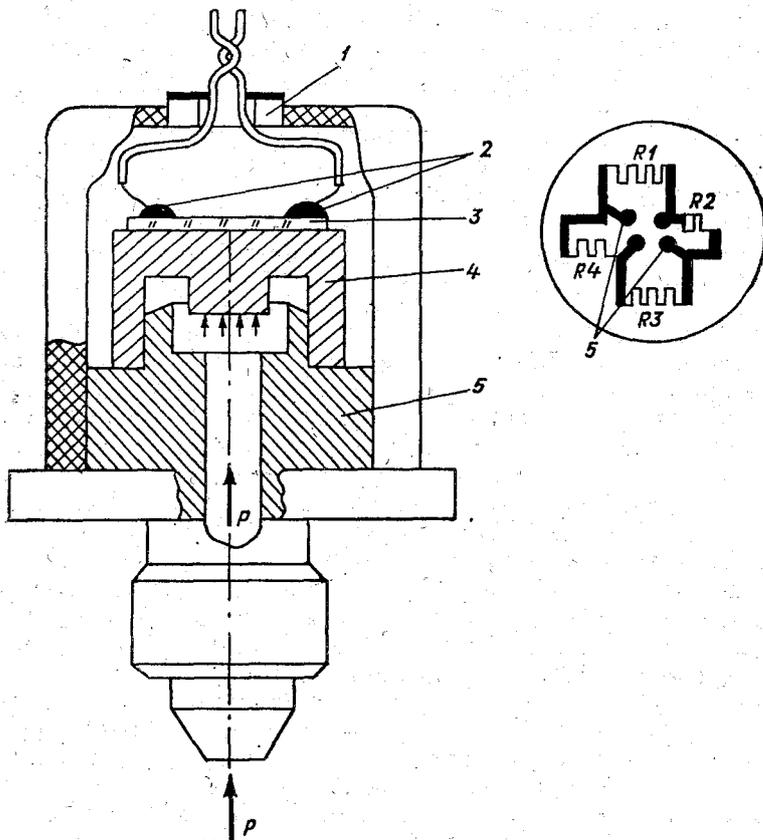


Рис. 2.11. Тензорезисторный преобразователь давления «Сапфир-22».

1 — крышка; 2 — контактные площадки; 3 — сапфировая мембрана; 4 — металлическая мембрана; 5 — корпус; на врезке: 5 — контактные площадки.

— погрешность линейности не превышает по абсолютному значению $\pm 0,3\%$ диапазона изменения выходного сигнала;

— случайная составляющая погрешности не превосходит $\pm 0,1\%$;

— дополнительная составляющая температурной погрешности не превышает $\pm 0,5\%$ на 10°C для датчиков Д16, Д2,5 и $\pm 1\%$ на 10°C — для Д100.

В целях снижения температурной составляющей погрешности в автономных измерителях уровня используют общий прием вне-внесения температурной поправки на основании данных о темпера-

туре, полученных по независимому каналу измерения температуры этого прибора. Такой алгоритмический метод уменьшения этой погрешности реализуется при конечной обработке материалов наблюдений АЦИТа-У-02, ДУ-МГ.

Следует отметить, что оба рассмотренных датчика, тензометрический и на основе трубки Бурдона, представляют информацию о гидростатическом давлении в виде аналогового сигнала, которым является напряжение $U_{\text{вых}}$, снимаемого с мостовых схем. Поэтому для использования таких датчиков в цифровых приборах необходимо включать в их состав аналогоцифровые преобразователи.

Вибротронные преобразователи давления в отличие от вышеописанных дают информацию о давлении в форме цифрового сигнала, в виде частоты f_P , которая однозначно характеризует измеряемое давление. В океанографическом приборостроении такого типа измерительные преобразователи применяют в виде выпускаемых серийно по ГОСТу 18618-73 вибростержневых датчиков ДДВ или ПДВ. Согласно паспортным данным эти датчики в наилучшем случае нормируются по значению основной приведенной погрешности в $\pm 0,15\%$ верхнего предела диапазона измерения. При этом систематическая и случайная составляющие погрешности имеют такое же значение. Дополнительная погрешность от изменения температуры окружающей среды не превосходит $0,08\%$ на 1°C . Потребление электронной части схемы стандартного датчика составляет 120 мВт или 10 мА от источника напряжения в 12 В. Отечественной промышленностью освоено серийное производство ряда датчиков данного типа на диапазоны давления: 1; 5; 10; 20 и 50 МПа.

Принцип действия вибростержневых преобразователей давления основан на зависимости частоты f_P собственных колебаний натянутой струны от ее длины $l_{\text{ст}}$ и механического напряжения σ в струне [78]:

$$f_P = (2l_{\text{ст}})^{-1} / (\sigma / \rho_{\text{ст}})^{1/2}, \quad (2.19)$$

где $\rho_{\text{ст}}$ — плотность материала струны.

В зависимости от внешнего гидростатического давления P , действующего на диафрагму датчика, меняется механическое напряжение σ в струне и, следовательно, собственная частота f_P ее колебаний.

Основу конструкции первичного преобразователя ПДВ составляет монолитный чувствительный элемент из высококачественной пружинной стали, который содержит воспринимающую давление диафрагму 2, перпендикулярные к ее плоскости держатели 3 и растянутую между ними ленточную струну 5 (рис. 2.12). Все перечисленные элементы выполнены из одной отливки дисперсионно-твердеющего сплава марки 40НХТЮ путем технологической обработки без пайки и сварки, что позволяет исключить возникновение паразитных резонансов. После окончательного изготовления остаточные напряжения от механической обработки устраняются

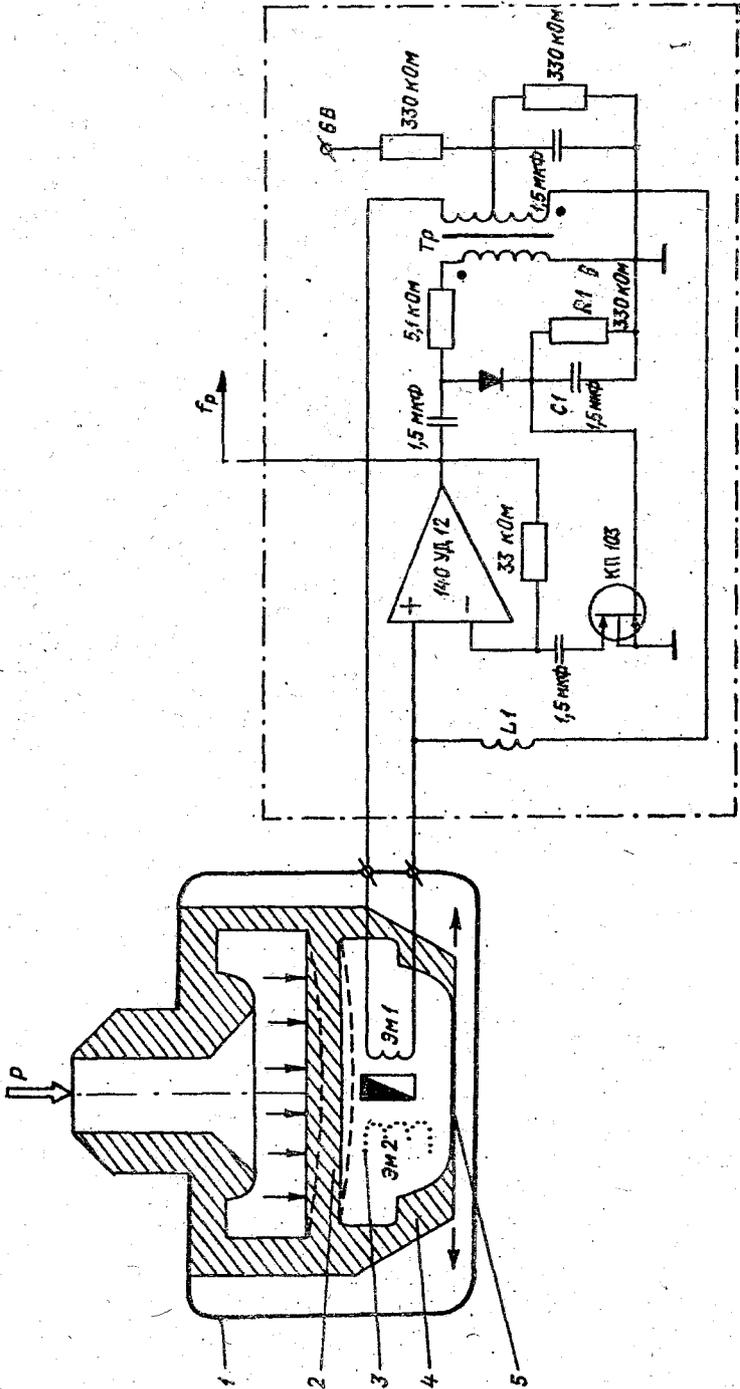


Рис. 2.12. Вибростержневой частотный преобразователь давления. ПДВ.

1 — корпус; 2 — диафрагма; 3 — электромагнит; 4 — держатель; 5 — струна

термообработкой. В результате удается достигнуть высокой долговременной и температурной стабильности таких датчиков.

Для возбуждений колебаний струны в конструкции имеется электромагнит с начальным подмагничиванием от постоянного магнита. В свою очередь электромагнит Эм1 подключен к схеме автогенератора, представляющего собой усилитель с положительной обратной связью. В стандартном датчике ПДВ для снятия сигналов о колебаниях струны 5 служит дополнительный электромагнит — адаптер Эм2. При воздействии на диафрагму 2 внешнего давления P она изгибается и разводит, как показано на рис. 2.12, в стороны верхние концы держателей 4. В результате изменяется напряжение σ в струне и, следовательно, собственная частота f_P ее колебаний. Зависимость f_P от действующего давления в датчиках таких конструкций, где реализован режим заданной длины $l_{ст}$ струны, выражается нелинейным законом вида

$$f_P = f_0 \sqrt{1 + \alpha P + \gamma P^2}, \quad (2.20)$$

где f_0 — начальная частота при нулевом избыточном давлении, равная (2900 ± 150) Гц; α , γ — постоянные коэффициенты, определяемые при градуировке конкретного образца датчика:

$$\alpha = \frac{1}{P_2^2 P_1 - P_2 P_1^2} \left\{ P_2^2 \left[\left(\frac{f_1}{f_0} \right)^2 - 1 \right] - P_1^2 \left[\left(\frac{f_2}{f_0} \right)^2 - 1 \right] \right\};$$

$$\gamma = \frac{1}{P_2^2 P_1 - P_2 P_1^2} \left\{ P_2^2 \left[\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 - 1 \right] - P_1^2 \left[\left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 - 1 \right] \right\}, \quad (2.21)$$

где f_1 , f_2 — значения выходных частот датчика соответственно при внешнем давлении P_1 и P_2 .

В соответствии с этим девиация выходной частоты на полный диапазон давления составляет (900 ± 100) Гц.

Описанная конструкция вибростержневого преобразователя имеет существенно более высокие метрологические характеристики по сравнению с ненагруженной манометрической трубкой при одинаковом качестве материала изготовления. Это объясняется принципиально различными режимами деформации чувствительного элемента, воспринимающего внешнее давление. Диафрагма 2 вибротрона имеет относительно большую толщину (в датчике на 10 МПа толщина мембраны 4 мм при диаметре 27 мм) и очень малый прогиб центра — всего 0,03—0,04 мм. Напряжение σ в материале в наиболее напряженных сечениях не превышает 10 % предела упругости. В результате достигается добротность колебательной системы струны порядка 500 единиц. В манометрической С-образной трубке Бурдона при том же давлении толщина стенки составляет 0,3 мм, а действующие напряжения достигают до 70 % предела упругости, поскольку при более толстой стенке не обеспечивается рабочий ход и требуемая чувствительность при заданных габаритах трубки.

Однако паспортные характеристики отечественных стандартных датчиков ПДВ не удовлетворяют точностным требованиям, предъявляемым к автономным измерителям уровня открытого моря — самописцам уровня моря. В них необходимо обеспечивать измерения колебаний гидростатического давления с погрешностью не более ± 4 кПа на глубинах вплоть до 1000 м. Такое условие влечет за собой необходимость иметь основную погрешность не $\pm (0,15-0,4)$ %, а не хуже $\pm 0,004$ %. В соответствии с этим стандартные вибраторные преобразователи, применяемые в океанографических средствах измерения, подвергаются определенной доработке. В этих целях применяется термостатирование, осушка, вакуумирование и предварительное старение, что позволяет снизить погрешность до $\pm (0,01-0,02)$ % [44]. За счет откачки из корпуса 1 датчика воздуха до давления порядка 10 Па внутри этого корпуса исчезают конвективные потоки тепла и связанные с ними погрешности, возрастает добротность струны с 500 до 800 единиц, вследствие уменьшения аэродинамических потерь от трения струны о воздух, исчезает адсорбция влаги и коррозия струны. Кроме того, снимается необходимость вносить температурную поправку на изменчивость давления в замкнутом объеме корпуса датчика, которая в общем случае неопределенна, так как давление, при котором датчик герметизируется, не известно. Для увеличения добротности резонансной системы, в которую входит струна, до 3000 единиц увеличивают зазоры между электромагнитами возбуждения и струной с 0,6 мм до 1,5 мм. Такое повышение добротности практически на порядок уменьшает действие внешних дестабилизирующих факторов на датчик.

В последние годы для полной реализации точностных характеристик датчиков такого типа особое внимание уделяется совершенствованию стандартной измерительной схемы. Такие работы направлены прежде всего на уменьшение суммарной мощности электронной схемы со 120 мВт до уровня 2 мВт, что позволяет существенно уменьшить самонагрев элементов конструкции, который вызывает нестабильные во времени градиенты температуры в струне датчика.

Дополнительно переходят от возбуждения струны сигналом с амплитудой 0,6 В прямоугольной формы изменения к синусоидальной. Тогда существенно сужается спектр сигнала возбуждения и, следовательно, повышается стабильность работы задающего генератора при действии дестабилизирующих факторов (температура, влажность, старение).

В этой связи заслуживает внимания схема возбуждения вибростержневого преобразователя ПДВ, примененная в каналах измерения уровня телеизмерительной станции ДУ-МГ, самописцев уровня «Цунами» и «Шельф» (рис. 2.12). Ее основу составляет автогенератор, построенный на базе операционного усилителя К140УД12. В автогенераторе из двух использован только один электромагнит ЭМ1 датчика, который одновременно выполняет функции возбудителя и адаптера. Для этого он включен в мостовую схему,

два плеча которой образованы вторичной обмоткой трансформатора T_p , а третье — индуктивностью L_1 от второго электромагнита ЭМ2, вынесенного за пределы корпуса преобразователя и используемого в данной схеме только в качестве вспомогательного дросселя. В результате исключается возможность прохождения помехи через индуктивную связь между обмотками электромагнита, приводящей к фазовым сдвигам в колебательной системе первичного преобразователя и, следовательно, к случайным вариациям его выходной частоты f_p . Принцип работы такой схемы основан на возбуждении автогенератора при разбалансе моста на резонансной частоте струны датчика. Для формирования возбуждения синусоидальным напряжением на ЭМ1 служит цепь автоматической регулировки усиления, состоящая из диода, фильтрующей цепочки RCI и регулируемого сопротивления, роль которого играет полевой транзистор КП103. Все остальные элементы, установленные в схеме, обеспечивают заданный режим работы операционного усилителя, а их номиналы соответствуют фактическим, указанным в схеме.

В современных средствах измерения колебания уровня открытого моря, наряду с исключением непосредственных причин возникновения дополнительных температурных погрешностей, вносятся температурная поправка в показания вибротронных датчиков по результатам независимых измерений температуры воды.

При высокоточных измерениях гидростатического давления используют в основном пьезокварцевые резонансные измерительные преобразователи. Они обладают исключительно высокими метрологическими характеристиками, обеспечивающими применение единственно только таких преобразователей для измерения колебаний уровня открытого моря на глубинах свыше 1000 м с погрешностью не хуже $\pm 1-2$ см. В настоящее время известны лишь два типа таких датчиков. Первый из них выпускается американской фирмой «Хьюлетт Паккард» [136], а второй — фирмой «Парасантифик» [152]. Принцип действия данных преобразователей основан на зависимости собственной резонансной частоты кварцевой пластины, являющейся их чувствительным элементом, от измеряемого давления. Для возбуждения колебаний пластины используется пьезоэффект кварца. Высокие качественные показатели кварца как упругого элемента, большая добротность колебательной системы ($5 \cdot 10^4$), малые температурные коэффициенты модуля упругости и теплового расширения кварца обуславливают долговременную стабильность характеристики, отсутствие гистерезиса и высокую чувствительность указанных датчиков.

Конструкция пьезокварцевого преобразователя фирмы «Хьюлетт Паккард» представляет собой монолитный кристаллический блок 1 с внутренней линзой 3, изготовленный из одной массы кварцевого стекла (рис. 2.13). Блок, имеющий цилиндрическую форму, с обоих концов закрыт герметичными крышками 2 и 5, вырезанными из кристалла кварца таким образом, чтобы ориентация их кристаллографических осей совпадала с направлением этих осей

всего кристаллического блока 1. Он в свою очередь располагается внутри металлического цилиндра 4, заполненного жидкостью и снабженного мягкой мембраной на одном из своих концов. Измеряемое внешнее давление передается через мембрану внутрь цилиндра к заполняющей его жидкости, которая подвергает монокристаллический кварцевый блок всестороннему сжатию. В результате частота собственных колебаний, возбуждаемых в линзе 3, меняется в зависимости от действующего давления. Для снятия этих колебаний на линзу 3 напылены два серебряных электрода, связанные с контактами, расположенными снаружи цилиндра 4. Такая резонансная кварцевая система имеет добротность порядка 10^6 , что обеспечивает погрешность измерения уровня моря на глубинах до 5000 м не более ± 1 см. Начальная частота данного датчика на третьей гармонике кварцевого резонатора составляет 4,992 МГц, а чувствительность — 1,45 Гц/см. Для снижения темпе-

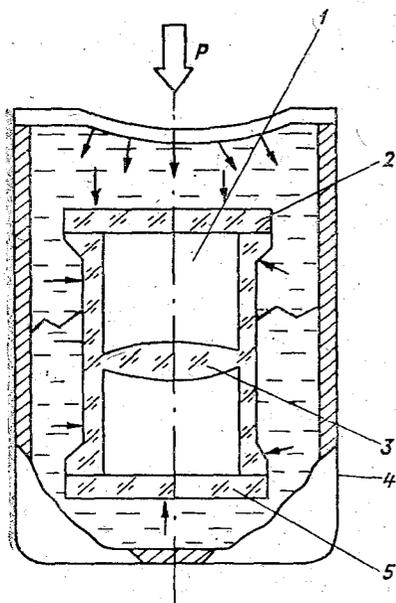


Рис. 2.13. Пьезокварцевый первичный преобразователь давления.

1 — кварцевый блок; 2, 5 — крышки; 3 — диэлектрик; 4 — корпус.

ратурной погрешности применено двойное термостатирование кварца со стабильностью до $\pm 0,05$ °С, что обеспечивает дрейф характеристики датчика за 1 мес не более чем на ± 2 см.

Пьезокварцевые резонансные датчики фирмы «Парасантифик» рассчитаны на существенно меньшее гидростатическое давление: только до 2,5 МПа. Датчик этой фирмы представляет собой миниатюрную конструкцию размерами примерно $2 \times 3 \times 3,5$ см и массой около 60 г. Конструкция его включает в себя воспринимающий измеряемое давление металлический сильфон, передаточное звено в виде поворотного коромысла на упругом шарнире и пьезокварцевый чувствительный элемент. На него с помощью коромысла передается усилие растяжения с сильфона. Пьезокварцевый элемент представляет собой брусок монокристалла кварца, имеющий форму параллелепипеда со сквозными продольными окнами, образующими вдоль оси вибрирующую плоскую кварцевую струну длиной около 10 мм, шириной 3 мм и толщиной 0,2 мм. На поверхность струны напылены серебряные электроды для возбуждения колебаний. Собственная частота f_p струны равна 40 кГц, опреде-

ляется растягивающим усилием и, следовательно, однозначно связана с внешним действующим на сильфон давлением. В итоге девиация частоты колебаний на полный диапазон давления составляет 4 кГц. Ограничение диапазона измеряемых давлений в данной конструкции связано с предельно допустимыми соотношениями прочностных характеристик металлического сильфона и кварцевого кристалла. Технология его изготовления предполагает собственную термокомпенсированность кварцевого резонатора, достигаемую за счет выбора вида среза.

2.4. Датчики скорости течения

Течение в океане представляет собой векторную величину V , которую принято характеризовать скоростью и направлением. С математической точки зрения эти величины соответствуют модулю $|V|$ и аргументу α этого вектора V . Для получения информации об этой скорости в состав позиционных измерителей течения обязательно входят первичные преобразователи скорости движения водного потока. Их положение в пространстве определяется с помощью компасов, а иногда дополнительно с участием датчиков вертикальной ориентации корпуса измерителя.

В современных автономных измерителях течения наибольшее распространение получили первичные преобразователи скорости течения, работа которых основана на гидродинамическом, электромагнитном и акустическом принципах измерения [116].

Из рассматриваемых первичных преобразователей гидродинамического типа преимущественно используются так называемые вертушечные. Другие гидродинамические преобразователи, принцип действия которых основан на измерениях разности скоростных напоров набегающего потока, углов поворота маятниковых систем или непосредственно гидродинамического давления на неподвижное тело, помещенное в поток воды, не нашли широкого применения. Это связано с их существенно нелинейной характеристикой преобразования в диапазоне скорости течения 0,02—2 м/с, характерном для океана.

В качестве чувствительного элемента вертушечных преобразователей используются роторы Савониуса, лопастные винты (пропеллеры), крылатки, винты Архимеда, в последнее время — обычно первые два [89, 101]. Принцип их действия основан на создании набегающим потоком воды гидродинамического момента на лопастях вертушки, приводящего к ее вращению. Скорость набегающего потока V и частота f_V этого вращения у рассматриваемых чувствительных элементов связаны однозначной статистической зависимостью. В общем случае эта зависимость описывается эмпирически полученным нелинейным уравнением Шмидта [101], имеющим следующий вид:

$$V = af_V + \sqrt{bf_V^2 + c}, \quad (2.22)$$

где a , b , c — постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами чувствительных элементов датчиков.

Поскольку физический процесс создания гидродинамического момента на лопастях вращающейся вертушки имеет случайный характер, то и связь между скоростью потока V и частотой f_V вращения вертушки является статистической, которая характеризуется средним квадратическим разбросом скорости порядка 0,005 м/с. Это значение практически для всех типов вертушек в диапазоне 0,02—2 м/с остается неизменным и определяет собой предел точности, достижимый с помощью таких преобразователей.

В процессе проектирования выбором конструкции датчика потока стремятся в диапазоне измеряемых скоростей обеспечить практически линейную зависимость V от f_V вида

$$V = k_V f_V \quad (2.23)$$

или

$$V = k_V f_V + V_0, \quad (2.24)$$

где k_V — гидрометрический шаг ротора или лопастного винта; V_0 — постоянный коэффициент, характеризующий начальный сдвиг градуировочной характеристики первичного преобразователя.

Именно уравнение вида (2.23) обычно закладывают в средство измерения скорости течения в качестве номинальной градуировочной характеристики вертушечного преобразователя. В этом случае все отклонения фактической, реальной градуировочной характеристики примененного преобразователя от номинальной будут определять погрешность средства измерения скорости течения.

Первой причиной возникающих погрешностей является то, что уравнения вида (2.23) или даже (2.24) не точно описывают реальную статистическую градуировочную характеристику вертушки, имеющей некоторый начальный порог чувствительности. В набегающем водном потоке ротор или пропеллер устойчиво вращается только начиная с некоторой скорости $V_{тр}$. В наиболее удачных конструкциях эта скорость лежит в пределах 0,01—0,03 м/с. В результате при измерениях скорости до 0,1 м/с функция преобразования данного датчика нелинейна с погрешностью до $\pm 0,02$ м/с, имеющей для фиксированной скорости потока систематический характер.

Вторая причина возникновения погрешностей первичных преобразователей скорости течения вертушечного типа — наличие нелинейной зависимости характеристики применяемых в них чувствительных элементов от их пространственной ориентации. Практически это означает, что реальные конструкции рассматриваемых датчиков имеют диаграмму направленности в горизонтальной плоскости, отличающуюся от круговой, т. е. функция преобразования вида (2.23) при разных углах φ ориентации скорости потока относительно вертушки характеризуется различными значениями гидрометрического шага k_V . Зависимость гидрометриче-

ского шага k_V от углов φ в аналитической форме может быть задана в виде функции $l(\varphi)$ диаграммы направленности данного типа датчика. Используя эту функцию $l(\varphi)$, выражение для гидрометрического шага для произвольных значений углов φ можно записать как

$$k_V = k_0 l(\varphi), \quad (2.25)$$

где k_0 — значение гидрометрического шага вертушки, принятое за номинальное.

Указанная зависимость наиболее сильно проявляется у пропеллеров, тогда как роторы имеют диаграмму направленности, практически совпадающую с круговой. В соответствии с этим при измерениях течения преобразователи роторного типа принципиально могут быть произвольно расположены относительно направления водного потока, а пропеллерные — принудительно ориентируют по потоку так, чтобы их ось вращения преимущественно совпала с генеральным направлением течения. В целом ряде практических конструкций измерителей течения это осуществляется путем разворота по течению с помощью хвостовых рулей самого корпуса прибора, на котором неподвижно закреплен датчик. Такая система используется в измерителях течения типа ДИСК, «Поток».

Чувствительные элементы в виде пропеллеров или лопастных винтов имеют пространственную характеристику, вид которой близок к косинусоидальной зависимости гидрометрического шага k_V от угла φ ориентации направления водного потока относительно оси его вращения. Для них выражение (2.25) примет вид

$$k_V = k_0 \cos \varphi, \quad (2.26)$$

где k_0 — значение гидрометрического шага при совпадении оси вращения лопастного винта с направлением потока.

Поэтому представляется исключительно полезным опыт создания на их основе двухкомпонентных преобразователей скорости течения. В таких средствах измерения единой конструкции объединяют по два пропеллера, располагая их оси вращения перпендикулярно друг другу. В результате один из них измеряет одну V_1 , а другой — вторую, ортогональную составляющую V_2 скорости водного потока. Таким образом, искомая скорость V будет получена в результате геометрического сложения результатов измерений V_1 и V_2 каждого из чувствительных элементов

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}. \quad (2.27)$$

Если функции $l_1(\varphi)$ и $l_2(\varphi)$ диаграмм направленности соответственно первого и второго пропеллеров выразить через один угол ориентации потока относительно первого пропеллера, то эти функции при условии (2.26) можно представить в следующем виде:

$$l_1(\varphi) = \cos \varphi; \quad l_2(\varphi) = \cos(\pi/2 - \varphi) = \sin \varphi. \quad (2.28)$$

В таком случае зависимости гидрометрических шагов k_{V_1} и k_{V_2} соответственно первого и второго пропеллеров от угла φ примут вид

$$k_{V_1} = k_{01} \cos \varphi; \quad k_{V_2} = k_{02} \sin \varphi,$$

где k_{01} , k_{02} — значения гидрометрических шагов соответственно первого и второго пропеллеров при совпадении их осей вращения с направлением набегающего водного потока.

Следовательно, по аналогии с ортогональными составляющими V_1 и V_2 скорости потока общий гидрометрический шаг k_{Σ} данного двухкомпонентного датчика может быть представлен как

$$k_{\Sigma} = \sqrt{k_{V_1}^2 + k_{V_2}^2} = \sqrt{k_{01}^2 \cos^2 \varphi + k_{02}^2 \sin^2 \varphi}. \quad (2.29)$$

Отсюда следует, что если в двухкомпонентном датчике установлены два чувствительных элемента, имеющие строго косинусоидальные пространственные характеристики и одинаковые значения гидрометрических шагов $k_{01} = k_{02}$, то такой датчик имеет идеальную круговую диаграмму. Однако невыполнение любого из указанных условий ведет к появлению дополнительных погрешностей, связанных с нарушением линейности пространственной характеристики такого первичного преобразователя. При этом одновременно возникают погрешности измерения скорости течения и направления. Последнее обстоятельство связано с тем, что по отношению составляющих V_1 и V_2 судят и о значении угла φ ориентации потока относительно корпуса прибора (см. п. 2.5).

В настоящее время двухкомпонентные пропеллерные датчики применяются в АЦИТе, АЦИТе-У-01 и ВМСМ [151, 154]. Несомненным достоинством перечисленных приборов является то, что они не требуют принудительной ориентации в потоке и могут успешно применяться при наблюдении за течениями, имеющими существенную изменчивость по направлению. При этом погрешности от нарушения линейности пространственной характеристики датчиков у данных средств измерения в наихудшем случае достигают следующих максимальных значений: АЦИТ — $\pm 15\%$, АЦИТ-У-01 — $\pm 5\%$, ВМСМ — $\pm 1\%$ измеряемой скорости [25, 149]. Следует считать, что такие отклонения пространственных характеристик пропеллеров от косинусоидального закона обусловлены наличием боковой составляющей скорости, оказывающей тормозное действие на ось вращения вертушки. С целью снижения этого эффекта пропеллеры размещают в защитных цилиндрических обтекателях (как в АЦИТе и АЦИТе-У-01) или используют специальные сдвоенные лопастные винты, как в ВМСМ (см. рис. 2.14). Оптимальная геометрия обтекателей и чувствительных элементов, как правило, выбирается экспериментальным путем [128].

В качестве роторных преобразователей в отечественных измерителях течения наибольшее распространение получили 4- и 8-

лопастные крылатки диаметром 164 мм для самописцев течения типа БПВ и ЭСТ. За рубежом в основном применяются роторы Савониуса, установленные в приборах RCM-4, SLS11 и VACM [134]. Пропеллерные преобразователи в виде четырех лопастных винтов со ступицей используются в приборах типа ДИСК. Диаметр ступицы 20 мм, диаметр винта диска 133 мм. Эти лопаст-

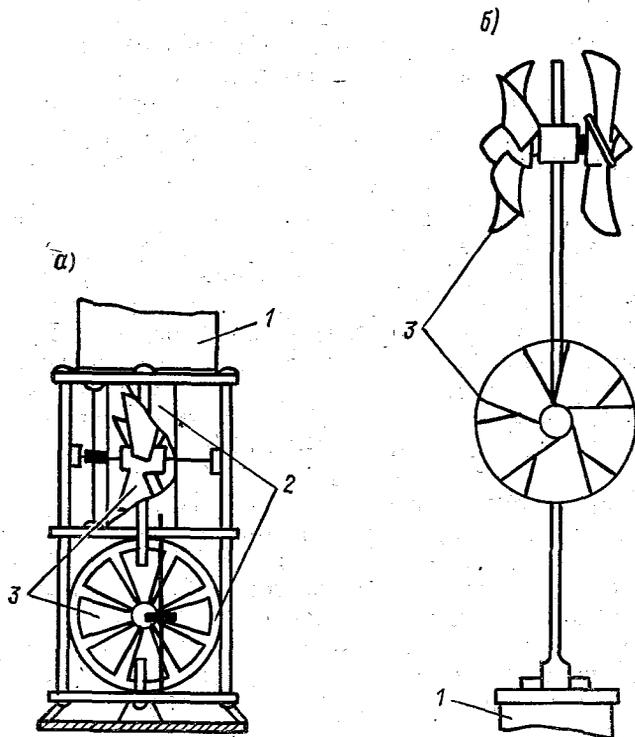


Рис. 2.14. Двухкомпонентные пропеллерные преобразователи скорости течения.

а — АЦИТ; б — ВМСМ; 1 — корпус измерителя; 2 — обтекатель; 3 — лопасти винта.

ные винты снабжены обтекателями шириной 60 мм с сегментным плосковыпуклым профилем и установлены во фторопластовые подшипники. Лопасти вертушек выполнены на стойках и имеют радиально-переменный шаг.

В приборах типа АЦИТ и «Поток» применяют 8-лопастные винты с углом атаки 60° , изготовленные методом литья под давлением из полипропилена (рис. 2.14). Вертушки насажены на титановые оси вращения, которые в сочетании с полипропиленовой вертушкой ($0,9 \text{ кг/дм}^3$) обеспечивают нулевую плавучесть данного чувствительного элемента. В датчиках такого типа применены агатовые подшипники. Тогда удастся обеспечить погреш-

ность нелинейности в диапазоне скорости 0,03—2,0 м/с не более $\pm 5\%$ измеряемой скорости.

В АЦИТе-У-01 практически применены такие же чувствительные элементы датчика скорости течения. В их конструкции для улучшения пространственной характеристики длина обтекателя с 64 мм (как в АЦИТе) увеличена до 132 мм. За счет уменьшения порога трогания до 0,01—0,015 м/с по сравнению с 0,02—0,025 м/с АЦИТа снижена граница нижнего диапазона измерения скорости до 0,02 м/с и погрешность нелинейности до $\pm 3\%$.

Из зарубежных измерителей течения с пропеллерными двухкомпонентными датчиками наибольший интерес представляет прибор VMСМ. В нем применены двоянные 5-лопастные пропеллеры диаметром 22 см с углом атаки 30° , расположенные на расстоянии 9 см друг от друга со сдвигом на 30° и изготовленные из пропилена (см. рис. 2.17). Такая конструкция датчика, как показали экспериментальные исследования [128], дает наилучшее приближение пространственной характеристики чувствительного элемента к косинусоиду. При этом начальный порог трогания не превышает 0,01 м/с, а погрешность нелинейности $\pm 1,5\%$.

Значения гидрометрических шагов всех перечисленных вертушечных преобразователей близки друг к другу. У измерителей «Поток» и АЦИТ значение этой величины равно 0,5 м/об, у РСМ-4S — 0,42 м/об, у VMСМ-0,374 м/об, а у ДИСК — 0,35 м/об.

В качестве промежуточных преобразователей вертушечных датчиков обычно используются число-импульсные преобразователи либо герконного типа, либо оптронного, либо с использованием магнитных диодов или транзисторов. При этом на оси вращения вертушки, иногда на ее лопасти, устанавливают магнит, который взаимодействует с магниточувствительным элементом. В отдельных типах измерителей течения, например в АЦИТе, вращения от вертушек передаются внутрь корпуса прибора с помощью магнитных муфт.

Третьей причиной возникновения погрешностей у вертушечных датчиков является нелинейная зависимость реакции вертушки на переменный гидродинамический момент, вращающей ее в пульсирующем водном потоке. При проведении измерений в таком потоке реальная градуировочная характеристика рассматриваемых преобразователей может существенно отличаться от номинальной характеристики вида (2.23). Эти отличия представляют собой динамические погрешности датчиков. Значения указанных погрешностей тем больше, чем выше динамика водного потока и инерционность чувствительного элемента преобразователя скорости [83]. В настоящее время существует несколько математических моделей, описывающих поведение роторов в динамическом режиме. Отличия данных моделей в основном сводятся к математической аппроксимации гидродинамического момента Q_r , действующего на вращающийся ротор, и момента трения $Q_{тр}$ в узлах его вращения. При этом для описания процесса динамического

функционирования вертушки в пульсирующем потоке исходят из уравнения ее вращения

$$J(1 + \lambda)2\pi df_V/dt = Q_{тр} + Q_r(f_V, V), \quad (2.30)$$

где J — момент инерции вертушки относительно оси ее вращения; λ — коэффициент присоединительной массы воды; f_V — частота вращения ротора; V — фактическая набегающая скорость потока.

Принимая момент трения в подшипниках $Q_{тр} = 0$, а гидродинамический момент выражая через функцию скольжения $F = (V_{изм} - V)/V$, после ее разложения в ряд Маклорена, получают модели Х. Г. Сабинаина [115] 1-го, 2-го и более высокого порядка в виде дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} L_c dV_{изм}/dt &= V(V_{изм} - V); \\ L_c dV_{изм}/dt &= V(V_{изм} - V) + (a_1/a_2)(V_{изм} - V)^2, \end{aligned} \quad (2.31)$$

где $L_c = J/(a_1 k \rho)$ — путь синхронизации вертушки; a_1, a_2 — коэффициенты ряда Маклорена; ρ — плотность воды; k — гидродинамический шаг.

Обычно для роторных преобразователей скорости течения ограничиваются моделью 2-го порядка. Ее решение применительно к конкретным параметрам конструкции датчика может давать числовую оценку динамической погрешности. В частности у роторов с $k = 0,4$ м/об и $L_c = 0,2 \dots 0,3$ м, данная погрешность в сильно флюктуирующих потоках может достигать $\pm 100\%$, что делает получаемые результаты недостоверными [83].

В отношении пропеллерных чувствительных элементов датчиков скорости течения все принятые математические модели, описывающие их процесс функционирования в динамическом режиме в реальных условиях применения, не дают адекватной картины их поведения. В соответствии с этим для получения оценок динамических погрешностей следует проводить экспериментальные исследования этих чувствительных элементов с помощью специальных испытательных установок, имитирующих пульсирующий водный поток. Подробное описание такой установки дано в п. 7.3.

В последние годы при океанографических наблюдениях начали применяться автономные измерители скорости течения с электромагнитными датчиками скорости. Их принцип действия потока основан на возникновении ЭДС в процессе перемещения проводящей среды, которую представляет собой морская вода через электромагнитное поле. Наводимая ЭДС E_V пропорциональна скорости V движения воды и магнитной индукции B_M [122]. В случае постоянного магнитного поля ЭДС, возникающая на фиксированной базе d_s , определяется выражением вида [116]

$$E_V = 10^{-8} B_M V d_s \cos \varphi, \quad (2.32)$$

где φ — угол между направлением течения и направлением магнитного поля.

В практических конструкциях автономных СИ используются, как правило, преобразователи, работающие в переменном маг-

нитном поле [125, 145]. Это поле создается вокруг электродов, на которых возникает ЭДС, с помощью электромагнитов, размещенных внутри корпуса прибора. Электроды представляют собой металлические площадки, непосредственно контактирующие с водой. Они расположены на фиксированной базе d_3 на концах сердечников электромагнитов (см. рис. 1.1). На обмотки электромагнитов в противофазе подается переменное синусоидальное напряжение с частотой 50—100 Гц [101]. Тогда при движении морской воды мимо СИ на его электродах наводится ЭДС E_3 , обусловленная как движением воды, так и переменным характером магнитного поля в проводящей среде. В силу того что к электродам датчика прикладывается не вся ЭДС, индуцируемая потоком воды, а только ее часть, возникшая в объеме между электродами, то в выражение (2.32) вводится поправочный коэффициент k_d , учитывающий геометрию датчика [116]. В соответствии с этим величина E_3 в рассматриваемых преобразователях определяется соотношением вида

$$E_3 = 10^{-8} k_d B_m V d_3 \cos \varphi + E_m + E_{ш}, \quad (2.33)$$

где E_m — значение ЭДС, индуцируемой на электродах в неподвижной воде только за счет изменений потока магнитной индукции переменного электромагнитного поля датчика, $E_{ш}$ — значение ЭДС собственных шумов датчиков.

Как показал ряд экспериментальных исследований и разработок [122, 123], чувствительность электромагнитных преобразователей может составлять порядка 100 мкВ/(м·с⁻¹) при $d_3 = 0,2 \dots 0,5$ м и мощности, подводимой к электромагнитам порядка нескольких ватт. При этом уровень собственных шумов не превышает 0,5 мкВ, что обеспечивает возможность измерения скорости течения, начиная с 0,01 м/с. В рамках указанных экспериментов также было уточнено значение коэффициента k_d , который для различных геометрических форм датчиков (шара, диска или стержня) примерно равен 0,1.

Для выделения из сигнала E_3 , снимаемого с электродов, только полезного сигнала E_v , характеризующего движение воды, в измерителях течения фирмы «Интероушен» используются компенсирующие генераторы [116]. Сигналы с этих генераторов равны по значению E_m и поступают на электроды в противофазе с ЭДС электромагнитной индукции. В этой связи одной из наиболее сложных технических задач, возникающей при проектировании таких устройств, является стабильность сигнала E_m . Это достигается применением платиновых электродов, которые в процессе работы меняют свои параметры минимально и позволяют измерять скорость течения начиная с 0,01—0,02 м/с [116, 133].

Другим препятствием к применению рассматриваемых преобразователей в автономных СИ скорости течения является сравнительно большое потребление энергии на создание переменного магнитного поля.

Указанные трудности пока успешно удалось преодолеть американским фирмам «Интероушен» и «Марш—Бёрн», выпускающим автономные электромагнитные измерители течений моделей S4, 195-M, 196-RM и 585 [125, 131, 145]. Во всех этих приборах применены двухкомпонентные первичные преобразователи скорости водного потока, которые состоят из двух пар токовых электродов, располагаемых на поверхности датчика под углом 90° относительно друг друга (см. рис. 1.1). Это позволяет по индуцируемой ЭДС непосредственно определять две ортогональные составляющие V_1 и V_2 скорости течения. Однако описанного типа измерители течения работоспособны только в водоемах, где вода обладает определенными электропроводящими свойствами, например, морская вода с соленостью более 0,1‰, а в полностью пресной воде выполнение измерений электромагнитными датчиками невозможно.

Работа акустических датчиков скорости течения основана на эффекте изменения скорости распространения колебаний в водной среде в зависимости от скорости движения этой среды. При этом в основном используют три следующих метода измерения: доплеровский, временной (фазо-импульсный) и фазовый [89, 101]. Однако в автономных средствах измерения преимущественное распространение получил фазовый метод. Это обусловлено тем, что при аппаратурной реализации двух других не удается обеспечить малое энергопотребление измерителей течения. Доплеровские преобразователи скорости имеют довольно низкий к. п. д., а в фазо-импульсных возникает необходимость измерения временных задержек с погрешностью не выше $\pm 10^{-9}$ с.

В приборах, использующих фазовый метод, скорость V течения определяют по разности фаз θ_V между посланным и принятым акустическим сигналом, возникающей при прохождении фиксированного расстояния d_a между передатчиком и приемником этих сигналов. Данный фазовый сдвиг θ_V однозначно связан с искомой скоростью V следующим соотношением:

$$\theta_V = 4\pi V d_a f_{\text{изл}} / C_{\text{зв}}^2, \quad (2.34)$$

где $f_{\text{изл}}$ — частота излучаемого сигнала; $C_{\text{зв}}$ — скорость распространения акустического сигнала в воде.

В измерителях такого типа, как правило, применяют минимум двухкомпонентные или даже трехкомпонентные датчики скорости [119, 137, 142]. Для исключения влияния асимметрии конструкции датчика на результаты измерения, каждый из излучателей одновременно является и приемником. Поэтому двухкомпонентный акустический датчик скорости содержит две пары приемопередатчиков, разнесенных на фиксированную базу d_a , на которой производится измерение скорости водного потока.

Экспериментальные исследования различных конструкций акустических датчиков скорости потока показали, что их выходные сигналы в наибольшей степени соответствуют косинусной диаграмме направленности, когда углы между направлениями аку-

стических сигналов и движения водного потока не менее 25° . В соответствии с этим направление акустических сигналов принудительно ориентируют под углом в 45° к направлению измеряемой составляющей скорости. Для этих целей наилучшим образом подходят акустические отражатели из титанового сплава. Воздействие потока воды на сдвиг фазы θ_v сигнала будет точно таким, как если бы этот сигнал распространялся прямо от излучателя 1 к 2 и обратно (рис. 2.15). Вертикальная составляющая ско-

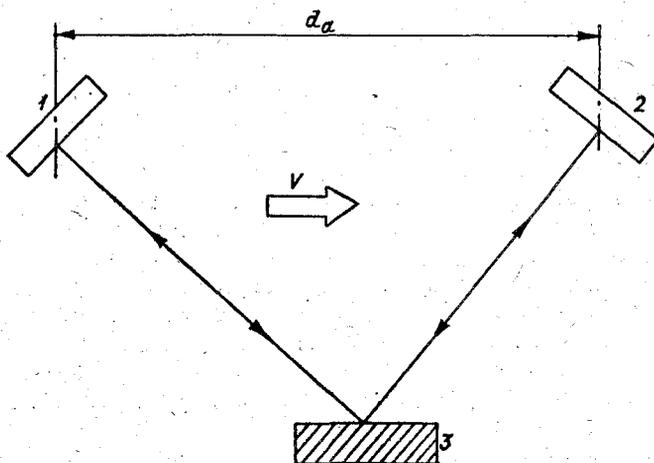


Рис. 2.15. Схема работы акустического измерителя скорости АСМ-2.

1, 2 — приемопередатчики; 3 — акустический отражатель.

рости течения в таком случае не воспринимается датчиком, так как сигналы проходят одинаковое расстояние вверх и вниз. Согласно данной схеме построен акустический преобразователь прибора АСМ-2 (см. рис. 1.2).

В качестве приемопередатчиков, как правило, используются пьезоэлектрические дисковые пластины, например в измерителе АСМ-2, они имеют диаметр около 9,5 мм и высоту 1 мм. Пьезоэлектрические дисковые преобразователи размещены на концах литых алюминиевых кронштейнов на расстоянии $d_a = 11$ см. Собственный резонанс такой конструкции близок к несущей частоте $f_{изл} = 1,605$ МГц. Электрические провода от преобразователей вводятся в основной корпус прибора АСМ-2 через стеклометаллические герметично закрепленные контакты, помещенные внутри датчика скорости. Боковая сторона преобразователей заполнена маслом и защищена от окружающей среды резиновой диафрагмой, выравнивающей давление плексиглазового диска, прикрепленного к кронштейнам четырьмя нейлоновыми винтами.

В измерителе АСМ-2 для преодоления технических трудностей, связанных с необходимостью измерения малых значений сдвига

фазы, применен принцип незатухающей импульсной волны [119]. Он заключается в том, что частоты излучения с одного и другого пьезоэлемента, расположенных на одной базе, несколько отличаются друг от друга на относительно низкую частоту, равную 34 Гц. При этом излучение акустических посылок осуществляется на высокой несущей частоте $f_{\text{изл}} = 1,605$ МГц поочередно то с одного пьезоэлемента, то с другого навстречу друг другу в импульсном режиме с периодичностью в 610 мкс и длительностью 91,5 мкс. Соотношение длительностей и периодичности посылок выбрана таким образом, чтобы обеспечить в каждом акустическом излучателе подавление механических колебаний до ничтожно малого уровня к моменту прихода акустического сигнала от другого приемопередатчика. В результате на выходе каждого пьезоэлемента из поступающих акустических сигналов удается выделить серию импульсов, несущих на частоте 34 Гц информацию о фазовом сдвиге θ_V исходного сигнала и, следовательно, о искомой скорости V течения. Таким образом исключается необходимость измерения наносекундных временных задержек для получения информации о скорости течения с разрешающей способностью в 1 см/с.

Установлено [119], что вариация этой величины в зависимости от температуры от -2 до 40°C может давать погрешность в измерении скорости течения $\pm 10\%$; в зависимости от давления на глубинах до 6000 м — $\pm 6\%$; солёности от 10 до 40‰ — $\pm 2\%$. В соответствии с этим эффективное измерение скорости потока морской воды с применением акустических датчиков возможно только при наличии сопутствующей информации об указанных океанографических величинах.

Как показывает рассмотрение основных типов датчиков скорости потока, применяемых в современных автономных позиционных измерителях течения, все они имеют и определенные преимущества и недостатки. К недостаткам вертушечных датчиков относится их подверженность механическим повреждениям, а у электромагнитных и акустических — это энергетические трудности и сложность конструкции их промежуточных преобразователей. Однако, на наш взгляд, важнейшим критерием применимости указанных датчиков в автономных средствах измерения являются динамические характеристики.

Эти характеристики определяют с помощью специальных установок (см. п. 7.3), а под динамической погрешностью понимают различие между реакцией испытуемых средств измерения на стационарный и пульсирующий водный поток. При этом степень пульсации оценивают по коэффициенту пульсации C_V , представляющему собой отношение амплитуды A_V переменной составляющей скорости водного потока к ее среднему значению \bar{V} [83]:

$$C_V = A_V / (\bar{V} \sqrt{2}). \quad (2.35)$$

Результаты многочисленных испытаний всех перечисленных типов первичных преобразователей различной конструкции, про-

веденные на отечественных и зарубежных установках для моделирования пульсирующего водного потока, показаны на рис. 2.16. Данные для построения графиков зависимостей относительной динамической погрешности $\delta_{\text{дин}}^V$ от C_V получены при проведении советско-американской интеркалибровки измерителей течения

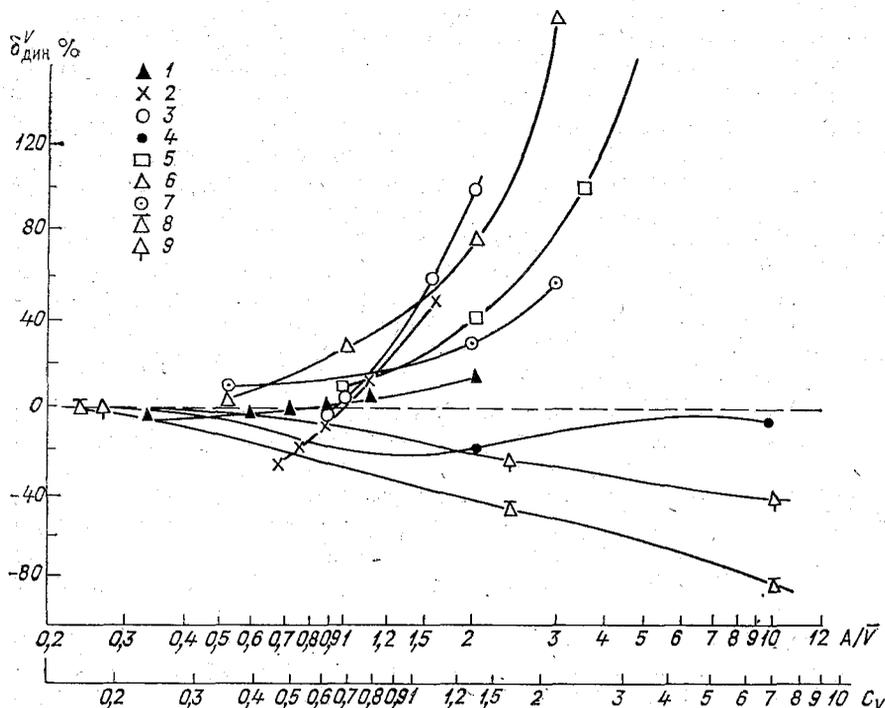


Рис. 2.16. Результаты динамических испытаний измерителей скорости течения: 1 — АЦИТ-У-01; 2 — АЦИТ, «Поток»; 3 — БПВ; 4 — VMCM; 5 — модель 585; 6 — RCM-4S; 7 — VASM; 8, 9 — АСМ-2 в горизонтальной плоскости (8) и в вертикальной (9).

в 1980 г. [139], Государственных испытаниях измерителя АЦИТ-У-01, а также заимствованы из работ [120, 129, 142, 144].

Из рассмотрения совокупного графика, приведенного на рис. 2.16, видно, что наилучшие результаты измерений на буйковых станциях могут быть достигнуты приборами VMCM, АЦИТ-У-01 с пропеллерными датчиками. Именно у этих средств измерений в достаточно широком диапазоне изменений коэффициента пульсаций скорости, имеющих место при выполнении наблюдений на автономных буйковых станциях, динамические погрешности не превышают $\pm(20 \dots 30)\%$. Это дает основание считать, что в этих измерителях возмущения водного потока по крайней мере не нарушают достоверности полученных результатов. В это же время с приборов с роторными, электромагнитными

и акустическими датчиками потока погрешности $\delta_{\text{дин}}^V$ могут в отдельных случаях достигать $\pm 100\%$ и более, что свидетельствует о недостоверности получаемой с их помощью информации.

2.5. Магнитные компасы и датчики ориентации

Магнитные компасы и датчики ориентации автономных измерений служат для определения положения этих приборов в пространстве. С помощью магнитных компасов получают информацию об ориентации измерителей в геомагнитном поле. Наличие этой информации является необходимым условием для получения достоверных данных о направлении α измеряемого вектора скорости течения. В тех случаях, когда сам корпус прибора с однокомпонентным датчиком скорости потока с помощью рулевых стабилизаторов ориентируется по течению, информация об азимутальном угле β его разворота, получаемая с помощью магнитного компаса, однозначно характеризует направление α действующего течения. Однако при таком способе определения этого направления возникают существенные методические погрешности, связанные с возможной неточностью установки корпуса прибора в потоке.

Действительно, гидродинамическая сила F_p , действующая на рули и разворачивающая прибор, определяется как

$$F_p = 0,5V^2\rho S_p C_p \sin \varphi, \quad (2.36)$$

где V — скорость водного потока; ρ — плотность воды; S_p — площадь рулей; C_p — коэффициент лобового сопротивления рулей; φ — угол между направлением водного потока и рулей.

Из этого соотношения видно, что при уменьшении угла φ гидродинамическая сила рулей F_p , устанавливающая прибор по течению, будет уменьшаться нелинейным образом, согласно закону синуса. Это ведет к тому, что при относительно малых углах φ измеритель течения становится вообще не чувствителен к направлению потока. Следует предполагать, что разворот корпуса прибора по потоку будет продолжаться до тех пор, пока гидродинамическая сила рулей не уравновесится силой трения $F_{\text{тр}}$ в системе его вращения. Отсюда следует, что ширина зоны нечувствительности к направлению течения в виде угла трения $\varphi_{\text{тр}}$ при котором $F_{\text{тр}} = F_p$, определится из соотношения (2.36) как

$$\varphi_{\text{тр}} = \arcsin [2F_{\text{тр}}/(V^2\rho S_p C_p)]. \quad (2.37)$$

Это выражение определяет собой погрешность $\pm \varphi_{\text{тр}}$ в определении направления течения по положению корпуса измерителя течения, ориентируемому в потоке воды. Согласно расчетам по формуле (2.37), при подвеске прибора на вертлюге, где $F_{\text{тр}} = 20 \dots 50$ Н, $S_p = 0,2 \dots 0,5$ м², значение этой погрешности при скоростях потока $V = 0,1 \dots 0,15$ м/с может достигать $\pm 90^\circ$, а при $V = 0,2 \dots 0,5$ м/с соответственно $\pm (5-10)^\circ$. Однако, несмотря на

указанные недостатки, благодаря своей простоте, данный способ определения направления течения до сих пор применяется, например, в приборах РСМ-4, -5, -8, -7 фирмы «Ондеро инструмент», ДИСК, «Поток».

В ряде современных измерителей течения для определения направления течения используются отдельные легкие флюгарки, ориентируемые по преимущественному направлению движения воды. По положению такой флюгарки судят об угле φ расположения вектора течения относительно приборной системы координат, положение которой в пространстве известно из показаний магнитного компаса. Тогда направление течения α определяется как

$$\alpha = \varphi + \beta, \quad (2.38)$$

где β — азимутальный угол, полученный с магнитного компаса.

В силу того, что масса флюгарки может быть несоизмеримо меньше, чем собственная масса прибора, определяющая силу трения в вертлюге, то указанная погрешность от трения оказывается достаточно малой, не более $\pm (1-2)^\circ$. Для передачи вращения флюгарки внутрь герметичного корпуса измерителя, как правило, используют магнитные муфты. Положение ответной части этой муфты, расположенной внутри приборного контейнера, определяют с помощью круговых потенциометров. Такие датчики ориентации потока применены в измерителях течения SLS11, VASM. Однако такой способ определения ориентации вектора течения так же, как и ранее описанный, не свободен от динамических погрешностей измерения направления течения. Это связано с тем, что в реальных конструкциях приборов практически нет возможности согласовать инерционность чувствительного элемента датчика скорости течения ротора или пропеллера и датчика ориентации — флюгарки или корпуса прибора с рулевым стабилизатором. Определенными преимуществами в отношении точности измерения направления течения относительно приборной системы координат обладают измерители с двухкомпонентными датчиками скорости течения [120, 146]. Это в равной степени относится к приборам с пропеллерным типом датчика, таким как VMCM, АЦИТ, АЦИТ-У-01, так и ко всем измерителям с электромагнитными и акустическими преобразователями потока. В них угол φ ориентации вектора V скорости течения относительно приборной системы координат однозначно определяется через отношение измеренных ортогональных компонентов V_1 и V_2 этого вектора как

$$\varphi = \arctg (V_2/V_1), \quad (2.39)$$

если угол φ отсчитывается относительно направления, совпадающего с направлением компонента V_1 .

Положение приборной системы относительно геомагнитного поля измеряется с помощью магнитных компасов.

В современных океанографических приборах для этих целей наибольшее распространение получили механические и феррозондовые магнитные компасы, представляющие собой датчики азимутального угла β расположения корпуса прибора. Принцип действия механических компасов заключается в свободной ориентации вдоль силовых магнитных линий Земли подвижных магнитов катушки компаса, способной свободно вращаться вокруг своей оси. В результате пространственный угол разворота этой катушки относительно своего первоначального положения будет однозначно характеризовать искомый азимутальный угол β . В свою очередь механические магнитные компасы различаются по виду преобразователя угла разворота катушки в цифровой эквивалент. Известны потенциметрические компасы и компасы с кодовыми масками. Первые из них преобразуют значение угла β в аналоговый электрический сигнал.

Один из вариантов такого потенциметрического компаса состоит из проволочного реохорда, подвижный электрод которого закреплен на катушке и в момент снятия отсчета с помощью соленоида прижимается к реохорду. Такой преобразователь применен в измерителе ДИСК и подробно описан в работе [89]. Основу конструкции данного компаса составляет круговой потенциометр с непрерывным круговым реохордом и тремя отводами. Стабилизированное напряжение постоянного тока подается на скользящие контакты потенциометра. В зависимости от положения катушки в момент подачи напряжения питания на соленоид один из подвижных электродов поджимается к круговому потенциометру. С потенциометра сигнал напряжения U_{β} , значение которого характеризует азимутальный угол β , поступает на вход релаксационного генератора. Частота следования импульсов с этого генератора пропорциональна углу f_{β} разворота катушки и подсчитывается в счетчике. Старший разряд выходного кода, накапливаемый в счетчике, устанавливается в зависимости от сигнала на входе нуля-органа, собранного на базе блокинг-генератора.

Основными недостатками такого компаса являются недостаточная надежность механического контакта подвижного электрода с проволочным реохордом, снижение точности за счет деформации иглы катушки во время прижима и значительное потребление энергии.

Более удачная конструкция потенциметрического компаса с использованием жидкостного потенциометра [23]. Такой компас (рис. 2.17) состоит из котелка 1, заполненного электролитической жидкостью 4 (табл. 2.1), и плавающей внутри котелка компасной катушки 3. В качестве заполняющей жидкости применен водно-спиртовой раствор с добавкой солей хлористого натрия и формалина для его электрической проводимости.

Жидкостный преобразователь угла поворота катушки в электрический сигнал является линейным потенциометром. В нем роль проволочного реохорда выполняет слой жидкости, заполня-

ющей тороидальную полость между боковыми стенками катушки и котелка, а роль подвижного токосъема — узкая вертикальная прорезь 12 на боковой поверхности катушки. Через эту полость

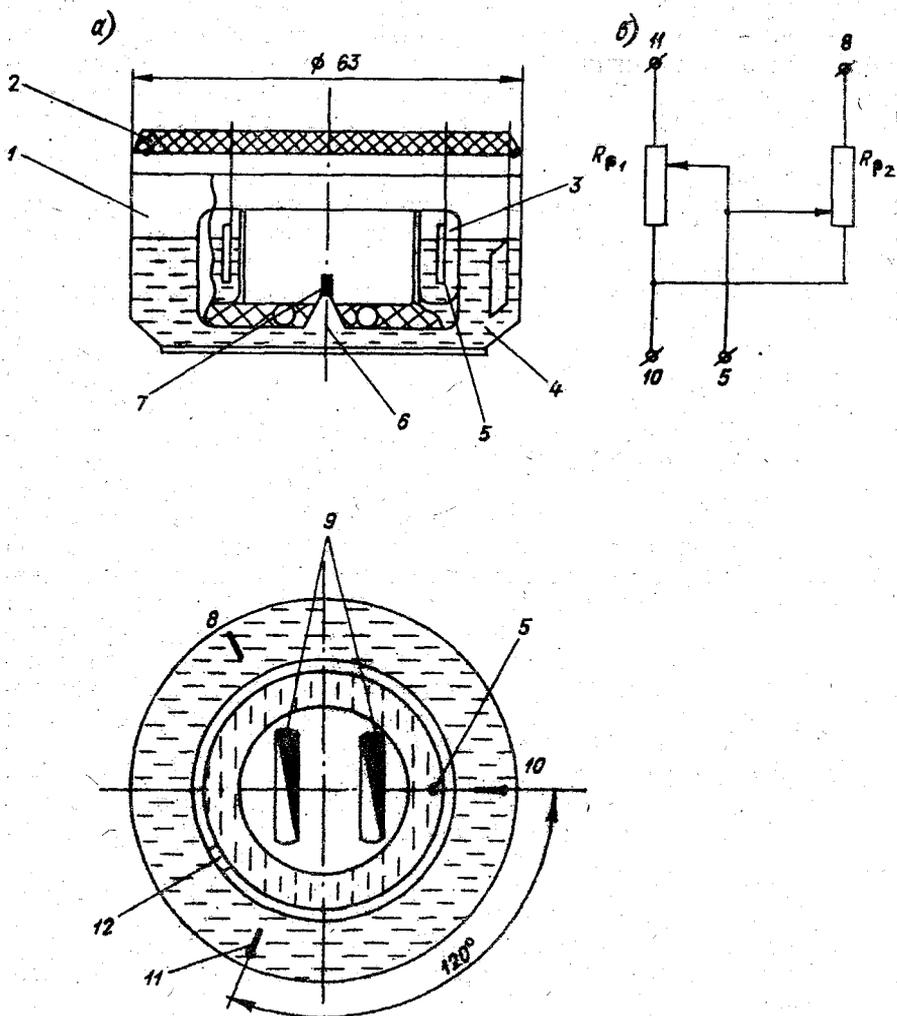


Рис. 2.17. Жидкостный компас АЦИТа (а) и его эквивалентная схема (б).

1 — котелок; 2 — герметизирующая крышка; 3 — катушка; 4 — электрическая жидкость; 5 — токосъемный электрод; 6 — игла; 7 — подпятник; 8, 10, 11 — питающие электроды; 9 — магниты; 12 — прорезь.

сообщаются объемы жидкости в тороидальной наружной полости и внутри самой катушки, в которой расположен токосъемный электрод 5. Напряжение на этом электроде 5 представляет собой выходной аналоговый сигнал компаса. Жидкостный компас обладает малой надежностью за счет трудности

Таблица 2.1
Состав компасной жидкости

Компонент	ГОСТ	Число объемных частей
Вода дистиллированная	ГОСТ 6709-72	150
Спирт этиловый ректи- фикованный	ГОСТ 18300-72	50
2,5 %-ный раствор хло- ристого натрия	ГОСТ 4233-77	5,6
Глицерин дистиллиро- ванный	ГОСТ 6824-76	35
Формалин 1-й сорт	ГОСТ 1625-75	2,5

герметизации котелка и существенно дополнительной температурной погрешностью в $\pm (5-10)^\circ$ в диапазоне рабочей температуры от 0 до 30°C [59], а также малой технологичностью за счет применения карданного подвеса и гибких проводов подключения к измерительной схеме. В зависимости от их жесткости при наклоне прибора свыше 10° возникает дополнительная погрешность, достигающая $\pm 5^\circ$.

Вследствие изменения уровня электролита в котелке возникают дополнительные погрешности, ухудшающие стабильность индивидуальных градуировочных характеристик такого компаса, которые крайне трудно свести к номинальной. Водно-спиртовой раствор разъедает клеевые швы картушки и котелка, что может явиться причиной выхода компаса из строя. При недостаточно точной центровке картушки внутри котелка сокращаются зазоры между картушкой и стенкой, что приводит к возрастанию капиллярных сил на границах картушка—котелок, или картушка—электрод. В результате угол застоя может возрасть до 5° . Кроме того, при транспортировке или хранении компаса при температуре ниже -30°C компасная жидкость замерзает и компас может выйти из строя.

Одним общим недостатком всех механических магнитных компасов является недостаточная эффективность демфирования компасной картушки. Согласно известным экспериментальным исследованиям [87], установлено, что переходная характеристика вышеописанной конструкции компаса имеет графический вид, показанный на рис. 2.18. Таким образом, данный азимутальный преобразователь представляет собой аperiodичное звено второго порядка, у которого намерет затухания близок к 1,0, а передаточная функция компасного угла $\beta(p)$ описывается уравнением

$$\beta(p) = \beta_0 / (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1), \quad (2.40)$$

где β_0 — значение компасного угла, при котором происходит стабилизация его картушки; T_1 , T_2 — постоянные времени компаса, равные соответственно 16 и 8 с; p — оператор.

Данный компас не может осуществлять эффективную фильтрацию достаточно низкочастотных возмущающих колебаний корпуса АЦИТа, лежащих в диапазоне частот от 10^{-2} до 10^{-4} Гц при его установке на буйковые станции [87]. Возможными путями в направлении повышения демпфирующих свойств компаса является увеличение момента инерции его катушки или вязкости

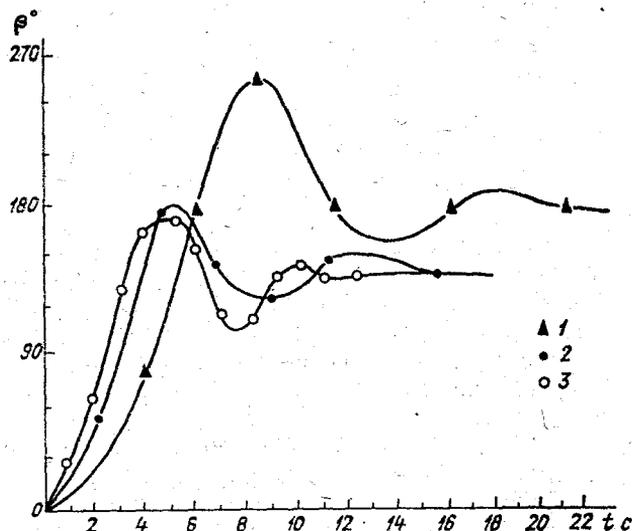


Рис. 2.18. Переходные динамические характеристики компасов.

1 — АЦИТ; 2 — АЦИТ-У-01; 3 — «Вектор».

заполняющей жидкости. Однако в рамках настоящей конструкции такие пути не могут быть реализованы, так как повышение момента инерции катушки ведет к росту погрешностей от углов застоя, а вязкости компасной жидкости — к потере ее электролитических свойств [59]. Более приемлемым способом улучшения фильтрующих свойств такого компаса является установка дополнительного котелка, заполненного полисилаксановым маслом, обладающим значительно большей вязкостью, чем компасная жидкость (см. табл. 2.1). Главным препятствием на этом пути являются технологические трудности изготовления таких компасов [23].

Отличительной особенностью магнитных компасов с потенциометрическими преобразователями является необходимость исключения неоднозначности их отсчетов при углах, близких к 0° или 360° . С этой целью в проволочных реохордах прибора ДИСК используется нуль-орган, а в жидкостных компасах АЦИТа подача питающего напряжения $U_{пит}$ осуществляется поочередно на две различные пары электродов, один из которых

(в первой паре) сдвинут относительно другого (из второй пары) на пространственный угол в 120° . В результате в АЦИТе получается две характеристики магнитного компаса $U_{\beta_1} = F_1(\beta)$ и $U_{\beta_2} = F_2(\beta)$, одна из которых сдвинута относительно другой на азимутальный угол 120° . В соответствии с этим такой жидкостный компас имеет довольно сложный алгоритм вычисления значения искомого азимутального угла, который трудно реализовать аппаратными средствами, встроенными в автономный прибор.

Все вышеописанные конструкции компасов предполагают преобразование пространственного азимутального угла в аналоговый выходной сигнал в виде амплитуды напряжения $U_k = F(\beta)$. Для его представления в цифровой форме могут служить различные типы АЦП.

В других типах механических компасов в качестве вторичного преобразователя используются кодирующие маски, непосредственно связанные с картушкой и осуществляющие преобразование угла β ее разворота в цифровой код [101]. В приборах «Поток» такая маска выполнена на диске, с нанесенным на него фотографическим способом кодом Грея. Считывание с диска кодовой комбинации, несущей информацию об азимутальном угле β , выполняется с помощью оптронных пар. Для этого с одной стороны этого диска располагается источник света, а с другой — ряд фотодиодов. Число фотодиодов равно числу разрядов кода Грея, которое в данном случае равно восьми. Применение в компасах такой конфигурации кодирования информации кодом Грея позволяет свести погрешность дискретности к единице младшего разряда.

Во всех вышеописанных конструкциях механических компасов их правильная работа обеспечивается только при вертикальном расположении картушки магнитного компаса. Для этого в конструкциях измерителей течения АЦИТ, «Поток» используются карданные подвесы компаса. Кроме того, имеющуюся информацию о положении корпуса прибора в пространстве в виде азимутального угла β бывает полезно дополнить сведениями об угле его наклона. Для этого могут быть использованы датчики углов отклонения корпуса прибора от вертикали. При сохранении строго косинусоидальной пространственной характеристики чувствительных элементов датчиков скорости также в вертикальной плоскости и измерении углов наклона ψ_1 и ψ_2 прибора вдоль каждого компонента скорости V_1 и V_2 выражение (2.27) для расчета скорости V течения примет вид

$$V = \sqrt{V_1^2 / \cos^2 \psi_1 + V_2^2 / \cos^2 \psi_2}, \quad (2.41)$$

а формула (2.39) для определения угла φ ориентации этого вектора относительно приборной системы — следующий вид:

$$\varphi = \arctg [V_1 \cos \psi_2 / (V_2 \cos \psi_1)]. \quad (2.42)$$

В частности, однокомпонентный датчик угла наклона имеется в АЦИТе. Его конструкция представляет собой жидкостный элек-

тролитический потенциометр, аналогичный вышеописанному компасу. В зависимости от угла отклонения ψ корпуса данного прибора от вертикали жидкость, заполняющая датчик, перетекает

и изменяет отношение сопротивлений потенциометра.

По справочным материалам приводятся следующие сведения о точностных характеристиках компасов, которые следует относить к основным погрешностям. Разрешающая способность компаса с проволочным реохордом 2° , а погрешность $\pm 10^\circ$, разрешающая способность жидкостного компаса $2-3^\circ$, а погрешность $\pm 10^\circ$. Дисковые компасы с 8-рядным кодом Грея позволяют обеспечить разрешающую способность в 2° и погрешность $\pm 10^\circ$.

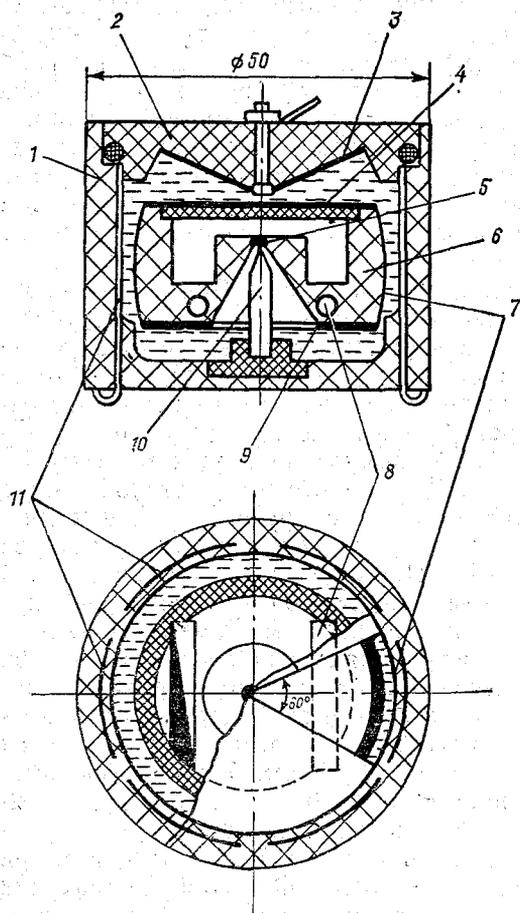


Рис. 2.19. Гониометрический компас с емкостным преобразователем.

1 — котелок; 2 — верхняя крышка; 3, 4, 7, 9, 11 — электроды: токосъемный, верхний, боковой, нижний, питающие; 5 — подпятник; 6 — картушка; 8 — магниты; 10 — игла.

Одной из наиболее удачных конструкций механического преобразователя азимутального угла в электрический кодированный сигнал является магнитный компас гониометрического типа с емкостным преобразователем угол—фаза [5].

Конструктивно преобразователь выполнен в виде системы из шести неподвижных питающих электродов 11, распределенных равномерно с шагом в 60° по внутреннему периметру компасного котелка 1, и одного подвижного электрода 7, размещенного на боковой поверхности картушки 6 (рис. 2.19). Полость котелка 1 герметично и целиком до верхней крышки 2 заполнена трансформаторным маслом. Особенностью конструкции данного компаса является самобалансирующая картушка 6, имеющая одну

точку опоры в подпятнике 5 иглы 10, установленном выше центра тяжести этой картушки 6. В результате такой компас не требует систем карданной подвески. В качестве опорной иглы 10 применена типовая керновая игла из иридиевого сплава с радиусом закругления не более 0,02 мм и стандартный агатовый или корундовый подпятник 5. Этот подпятник в месте крепления к картушке 2 подпружинен резиновым амортизатором, предохраняющим острие опорной иглы 10 от наклона, возникающего при тряске компаса в процессе его транспортирования или эксплуатации. В картушке 6, выполненной из оргстекла с запрессованными магнитами 8, имеются воздушные полости, обеспечивающие отрицательную плавучесть картушки 6 в масле и силу ее давления на иглу не более 30 мН. Все перечисленное позволяет минимально уменьшить трение иглы в опоре, при котором углы застоя данного компаса не будут превышать 0,5°.

Выходным сигналом гониометрического компаса с емкостным преобразователем является фазовый сдвиг напряжения, снижаемого с подвижного электрода 7 картушки относительно фазы сигнала на одном из неподвижных электродов, расположенных на внутренней стенке котелка 1. Питание в виде синусоидального напряжения переменного тока подается на все неподвижные электроды 11. На каждый из этих электродов питающее напряжение поступает в своей фазе, соответствующей их пространственному расположению по периметру котелка 1. Поэтому на боковом подвижном электроде 7 за счет переходной емкости между боковым и близрасположенными питающими электродами наводится напряжение $U_{\text{вых}}$, фаза θ_{β} которого определяется фазой напряжения, сформированного в результате векторного сложения питающих напряжений U_1 и U_2 , поданных на эти два смежных близрасположенных электрода. Таким образом, вектор $U_{\text{вых}}$ может быть представлен как

$$U_{\text{вых}} = U_1 + (U_1 + U_2) C_{\text{э}2} / (C_{\text{э}2} + C_{\text{э}1}), \quad (2.43)$$

где $C_{\text{э}1}$, $C_{\text{э}2}$ — переходные емкости между боковым и соответствующими неподвижными электродами.

Из выражения (2.43) видно, что фаза вектора $U_{\text{вых}}$ не совсем линейно зависит от переходной емкости $C_{\text{э}1}$ и, следовательно, от пространственного угла β разворота компасной картушки. В данном азимутальном преобразователе с шестью электродами эта погрешность не будет не превосходить $\pm 1,1^\circ$.

Для бесконтактного вывода с компаса выходного сигнала $\bar{U}_{\text{вых}}$ использован емкостной токосъем, представляющий собой два электрода 4 и 3, расположенных на верхней стороне картушки и внутренней стороне крышки 2. Для того чтобы при наклонах котелка 1 емкостная наводка на токосъемный электрод 3 оставалась симметричной и не оказывала заметного влияния на показания компаса, на нижней стороне картушки 2 установлен дополнительный электрод 9. Кроме того, подпятник 5 распо-

жен в такой точке катушки 6, чтобы горизонтальная плоскость, проведенная через эту точку, делила площадь неподвижных электродов 11 пополам.

Описанная конструкция 6-электродного гониометрического компаса с емкостным преобразователем угол—фаза (см. рис. 2.19) применена в АЦИТе-У-01. В данном компасе диаметр котелка составляет 50 мм, а зазор между катушкой и стенками котелка 1,5 мм. Экспериментально установлено, что у такого компаса с самобалансирующей катушкой дополнительные погрешности от наклона в пределах углов $\pm 20^\circ$ не превосходят $\pm 3^\circ$. Другие его инструментальные погрешности, вызванные отклонениями геометрических размеров деталей компаса от заданных, не превышают $\pm 1^\circ$ при их изготовлении по пятому классу точности. При этом переходные емкости между подвижными и неподвижными электродами составляют порядка 2 пкФ.

Для питания данного азимутального преобразователя в АЦИТе-У-01 применен трансформатор с заземленной средней точкой и фазовращатель, выполненный на четырех RC-цепочках. Схема подключения трансформатора и RC-цепочек к неподвижным электродам 11 компаса показана на рис. 2.20. Согласно этой схеме, номиналы резисторов R_1 — R_4 и конденсаторов C_1 — C_4 RC-цепочек выбраны такими, чтобы фаза питающего напряжения на электродах изменялась от 0 до 360° с шагом через 60° относительно средней точки трансформатора. При значении емкости конденсаторов $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 150$ пкФ фаза θ_i питающего напряжения не искажается нагрузочным током и вычисляется по следующей формуле:

$$\theta_i = \arctg(x_{Ci}/R_i) = \arctg(2\pi f_k C_i/R_i),$$

где $i = 1, 2, 3, 4$; f_k — частота напряжения питания компаса.

В качестве элементов RC-цепочек применены конденсаторы и резисторы, обладающие наибольшей временной и температурной стабильностью соответственного типа К10-7 и С2-29В, что позволяет свести дополнительные погрешности компаса от их изменения до $\pm 1^\circ$.

Для согласования выходного импеданса преобразователя со входным последующей измерительной цепи в АЦИТе-У-01 применен истоковый повторитель Т1, выполненный на транзисторной сборке К190КТ1 (см. рис. 2.20). Входной импеданс $Z_{вх}$ такого согласующего каскада характеризуется активным сопротивлением не менее 5 МОм и емкостью $C_{вх}$ не более 10 пкФ, что позволяет получить на выходе компаса электрический сигнал $U_{вых}$ амплитуды порядка 0,5 В. Отсчет фазы θ_β этого сигнала, несущего информацию об азимутальном угле β , производится относительно опорного $U_{оп}$, сформированного на емкостном делителе, образованном конденсаторами $C_{д1}$ и $C_{д2}$. Этот делитель служит для компенсации дополнительных фазовых сдвигов, возникающих на токосъемном электроде 3, относительно опорного. Отношение

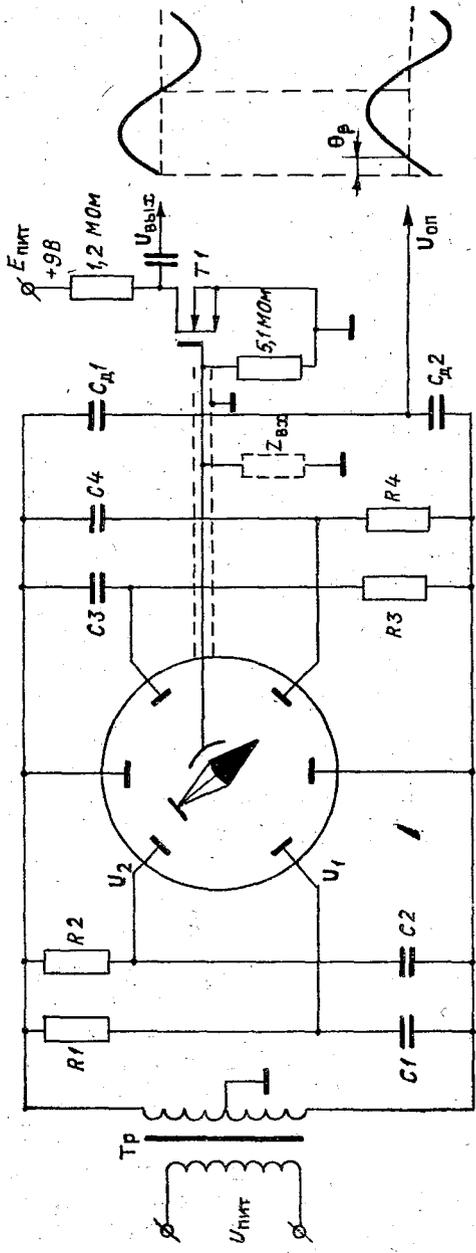


Рис. 2.20. Многофазная схема питания компаса с емкостным преобразователем.

номиналов конденсаторов $C_{д1}$ и $C_{д2}$ равно отношению токоъемной емкости C_0 и входной $C_{вх}$ истокового повторителя.

Для уменьшения паразитных электрических наводок на токоъемный электрод 3 его подключение ко входу истокового повторителя, выполнено экранированным кабелем с заземленным экраном. Для исключения влияния высших гармоник в спектре питающего напряжения на показания компаса в АЦИТ-У-01 применена дополнительная фильтрация на LC-контуре трансформатора питающего напряжения компаса. Частота питающего напряжения выбрана равная 10 кГц и ее стабильность поддерживается на уровне $\pm 0,1\%$. Это вполне достаточно для обеспечения погрешности преобразования азимутальный угол—фазовый сдвиг с погрешностью не более $\pm 0,5^\circ$.

Определенные искажения в результаты измерения направления течения может вносить магнитная девиация компасов. Например, в АЦИТе-У-01 ее появление обусловлено наличием магнитов в датчике скорости потока, батарей—в блоке питания или других металлических деталей, расположенных вблизи компаса.

Для устранения девиационных погрешностей более $\pm 5^\circ$ в АЦИТе-У-01 магнитный компас отделен от остальной части прибора экраном из магнитомягкого железа (армко, пермаллой и т. п.). С этой же целью прокладка проводников выполнена в жгуте таким образом, чтобы проводники с токами различного направления не создавали бы вблизи блока питания контуров значительной площади.

Экспериментально были определены динамические характеристики компаса АЦИТа-У-01 в виде его полной переходной характеристики (см. рис. 2.18). Передаточная функция соответствует выражению (2.40) с $T_1=12$ с и $T_2=4$ с. Таким образом, динамические характеристики такого компаса с достаточной приближенностью описываются дифференциальным уравнением второго порядка, обычно применяемым [18, 67] для представления в математической форме малых колебаний магнитной картушки при наличии линейного трения

$$Jd^2\eta/dt^2 + k_{тр}d\eta/dt + MH\eta = 0, \quad (2.44)$$

где J — момент инерции картушки; η — угол между направлением на нулевой магнитный меридиан и положением картушки; $k_{тр}$ — коэффициент момента силы трения вращения картушки компаса; M — магнитный момент картушки; H — горизонтальная составляющая напряженности локального геомагнитного поля. В приведенном уравнении угол η характеризует собой динамическую погрешность компаса.

Однако в автономных измерителях течения, размещаемых на буйковых станциях, в процессе наблюдений имеют место не только малые колебания картушки. Это обусловлено тем, что котелок компаса, жестко связанный с корпусом прибора, постоянно испытывает случайные рывки, вращения и наклоны. В результате непрерывно меняется баланс сил, действующих на картушку.

Кроме того, силы трения возможно аппроксимировать линейной зависимостью от угла η только для жидкостных компасов. В соответствии с этим В. М. Абрамовым предложена нелинейная модель, более точно описывающая динамику картушки магнитного компаса в условиях работы в составе аппаратуры буйковых станций [14]. Эта модель применительно к гониометрическим компасам с самобалансирующей картушкой может быть представлена в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} Jd^2\eta/dt^2 + \text{sign}(d\beta/dt)q + m_1 d\eta/dt\omega_K - m_2\omega_K + MH \sin \eta = \\ = -m_K r_K a_K \text{ при } d\eta/dt \neq 0; \\ Jd^2\eta/dt^2 + q_0 + MH \sin \eta = m_K r_K a_K \text{ при } d\eta/dt = 0 \text{ и } p > q_0; \\ \eta = \text{const} \text{ при } d\eta/dt = 0 \text{ и } p < q_0, \end{aligned} \quad (2.45)$$

где

$$p = Jd^2\eta/dt^2 + MH \sin \eta + m_K r_K a_K,$$

q и q_0 — модули моментов кулонового трения соответственно движения и покоя картушки; m_1 и m_2 — коэффициенты пропорциональности, зависящие от угла отклонения оси вращения картушки от вертикали; ω_K — угловая скорость вращения котелка; m_K — масса картушки; a_K — ускорение движения центра инерции картушки; r_K — расстояние между центром инерции и точкой крепления картушки.

Следует отметить, что эффективное использование данной модели для проектирования компасов с заданными динамическими характеристиками представляется довольно затруднительным, поскольку решения приведенных нелинейных дифференциальных уравнений могут быть получены только численным методом на ЭВМ [14].

Феррозондовые компасы типа «flux gate» нашли наиболее широкое применение в зарубежных моделях автономных измерителей течения, в том числе приборах АСМ-2. Принцип действия такого компаса подробно изложен в работе [101] и основан на измерении двух ортогональных горизонтальных компонентов напряженности H_x и H_y локального геомагнитного поля:

$$\begin{aligned} H_x &= k_m H \cos \beta; \\ H_y &= k_m H \sin \beta, \end{aligned} \quad (2.46)$$

где H — напряженность локального геомагнитного поля; β — угол между направлением на север и приборной системой координат; k_m — масштабный коэффициент.

Чувствительным элементом феррозондового (магнитометрического) компаса является тороидальный сердечник из магнитопроницаемого материала, на котором имеются три обмотки (рис. 2.21). Обмотка возбуждения W_B равномерно распределена по всему тороиду и позволяет возбуждать сердечник компаса в том и ином направлении до насыщения. Две диаметрально

обмотки AB и $A'B'$ располагаются на тороиде перпендикулярно друг к другу и предназначены для определения и компенсации небаланса, возникающего в намагниченности сердечника под действием внешнего магнитного поля. Этот небаланс однозначно связан со значением искомым компонентом напряженности H_x , H_y

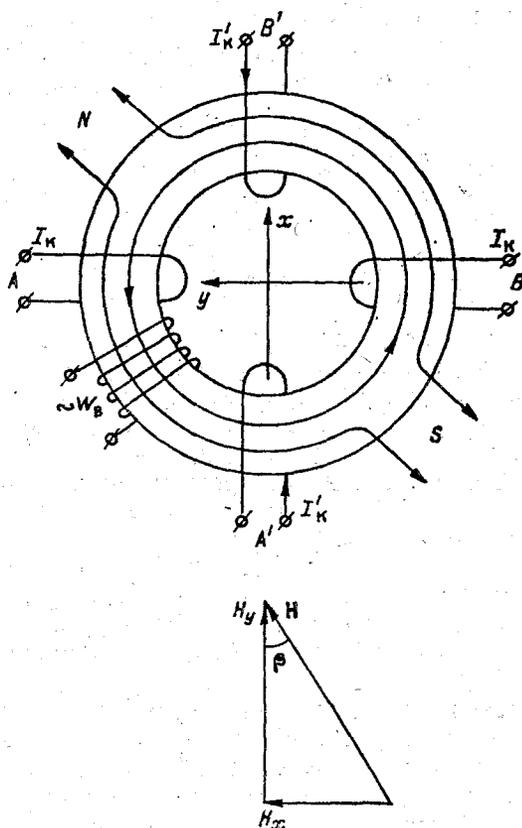


Рис. 2.21. Феррозондовый компас.

локального геомагнитного поля. На рис. 2.21 диаметральные обмотки AB и $A'B'$ показаны условно раздельно.

Сигнал возбуждения, подаваемый на обмотку W_B в виде напряжения переменного тока, создает переменное магнитное поле сердечника. Во время одного полупериода этого сигнала возникающее поле ориентировано по окружности тороида в направлении по часовой стрелке, а в другой — против (см. рис. 2.21). При этом в течение каждого из периодов сердечник дважды возбуждается до насыщения. В случае, показанном на рис. 2.21, внешнее геомагнитное поле частично противоположно с полем сердечника в районе B обмотки AB и совпадает — в районе A . Поэтому сер-

дечник в точке A достигает насыщения раньше, чем в точке B . Во время последующего полупериода сигнала возбуждения направление намагниченности сердечника меняется на противоположное и, следовательно, сердечник в точке B насыщается по времени раньше, чем в точке A . В результате при расположении обмотки AB под углом β к внешнему геомагнитному полю в ней появляется сигнал рассогласования, содержащий вторую гармонику частоты возбуждения. Таким образом, индуцируемый в обмотке AB сигнал оказывается пропорциональным компоненту H_x локального геомагнитного поля, направление которого диаметрально перпендикулярно расположению этой обмотки. Равным образом в обмотке $A'B'$ на второй гармонике частоты возбуждения возникает сигнал рассогласования, характеризующий другой ортогональный компонент H_y магнитного поля Земли.

Измерительная схема компаса воспринимает сигналы с обмоток AB и $A'B'$ и формирует обнуляющие токи I_K и I'_K , которые, действуя соответственно по контурам AB и $A'B'$, обеспечивают противодействие внешнему полю, тогда компенсирующий ток I_K оказывается мерой напряженности компонента H_x геомагнитного поля, а ток I'_K соответственно — компонента H_y .

Конструкция феррозондового компаса подразумевает стабилизацию его сердечника в горизонтальной плоскости с помощью маятниковой карданной подвески, закрепленной на верхней крышке корпуса этого датчика. Для демпфирования движений сердечника корпус заполнен силиконовой жидкостью вискозы. Проводники от всех трех обмоток заканчиваются гибким проводом и выведены на наружные клеммы корпуса.

Для преобразования компенсирующего тока I_K и I'_K магнитометрического компаса в цифровую форму используется довольно сложная электронная схема, предназначенная для выделения второй гармоники частоты сигнала возбуждения.

Далее амплитуда этого сигнала измеряется и преобразуется в цифровой эквивалент двух горизонтальных компонентов напряженности H_x и H_y локального геомагнитного поля.

Основной отличительной особенностью феррозондового датчика азимутального направления является практически полное отсутствие в его конструкции движущихся частей. В итоге компасы типа «flux gate» являются практически безынерционными и фиксируют без демпфирования все колебания измерителей течения, установленных на буйковых станциях. Поэтому для получения репрезентативной информации о направлении течения при использовании таких азимутальных преобразователей в измерителях предусмотрена высокочастотная фильтрация сигнала с компаса.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

3.1. Аналого-цифровые преобразователи

Значительное число датчиков океанографических средств измерения в качестве своего выходного параметра, несущего информацию об измеряемой величине, имеют аналоговый сигнал в виде напряжения переменного или постоянного тока. Поэтому для применения таких датчиков в цифровых средствах измерения в состав последних включают аналого-цифровые преобразователи АЦП. АЦП, пригодные к использованию в автономных океанографических приборах, должны обладать рядом особенностей. К ним относится относительно высокая долговременная стабильность (не менее 0,01—0,02 % на 1000 ч работы) и довольно высокая точность преобразования. Совокупная статическая погрешность преобразования должна быть не ниже $\pm 0,025$ %.

В настоящее время разработан широкий класс различных АЦП широкой области применения, в том числе с использованием современной микроэлектронной техники [28, 75]. Однако из всего многообразия разных видов АЦП для океанографических автономных приборов в наибольшей степени подходят преобразователи последовательных двоично-взвешенных приближений. Такие устройства обладают более высоким быстродействием по сравнению с АЦП с единичными приближениями и требуют меньше аппаратных затрат, чем параллельные АЦП или АЦП, работающие в двоично-десятичном коде. Как правило, АЦП, встроенные в океанографические средства измерения с аналоговыми датчиками, строятся по классической схеме [28] и включают в себя компаратор или нуль-орган (НО), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), регистр выходного кода $K_{\text{вых}}$ и схему управления (рис. 3.1). На один вход компаратора подаются сигналы с датчиков D_1, D_2, \dots, D_n , а на другой — с ЦАП, управляемого через регистр выходного кода, командами, поступающими со схемы управления, связанной с выходом компаратора. При такой структуре построения главным элементом АЦП оказывается ЦАП, определяющий основные метрологические характеристики данного средства измерения.

Отличительной особенностью встроенных в океанографические средства измерения АЦП является обеспечение измерения температуры и электрической проводимости морской воды с погрешностью не более $\pm 0,05$ %. В наиболее полной степени такими свойствами обладают АЦП с ЦАП, построенными с использованием резистивных делителей $R-2R$, выполненных по интегральной тех-

нологии [105]. Они имеют высокую временную стабильность отношения сопротивлений делителей (не хуже 0,02 % в год) и примерно такую же погрешность этого коэффициента. Тонкопленочные резисторы изготавливаются методом совмещенной технологии, предусматривающей покрытие кремневой подложки окисной диэлектрической пленкой, на которую затем напыляют резистивную и металлическую пленки. К недостаткам таких делителей относится относительно большая 50... 100 пкФ/см паразитная емкость резистивной схемы относительно кремневой подложки.

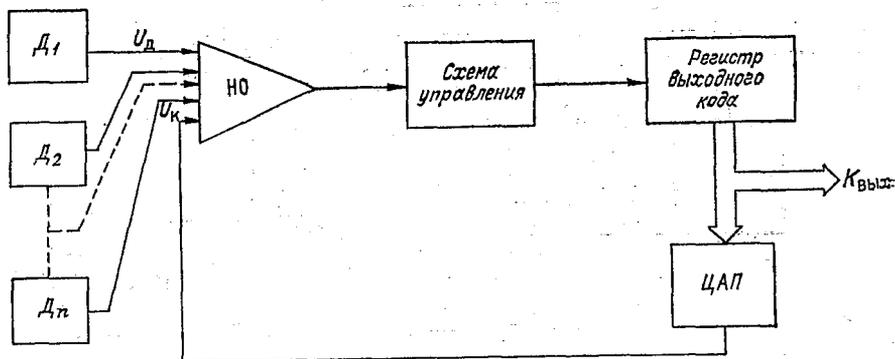


Рис. 3.1. Структурная схема АЦП последовательного поразрядного уравнивания.

ограничивающей быстродействие этих преобразователей. По такой гибридно-пленочной технологии отечественной промышленностью налажен выпуск микросхем резистивных делителей ЗНО13 и ЗНО12, обладающих нелинейностью не больше $\pm 0,1\%$. С помощью таких схем возможно построение ЦАП с последовательными делителями напряжения, однако их погрешность преобразования не может быть меньше $\pm 0,1\%$. Аналогичными точностными характеристиками обладают 10- и 12-разрядные АЦП К572ПА1 и К572ПА2 [105], выполненные по той же технологии и объединяющие в едином корпусе микросхемы резистивные делители и схему управления этими делителями. Поэтому АЦП с такими делителями используются в океанографическом приборостроении пока только в относительно малоточных средствах измерения.

Для достижения требуемых метрологических характеристик в них для ЦАП нашел широкое применение принцип суммирования напряжений для формирования выходного аналогового сигнала. Это позволяет обеспечить стабильность выходного сопротивления ЦАП. Указанный принцип наилучшим образом реализуется с помощью трансформаторных схем, некоторые варианты которых к настоящему времени появились в интегральном исполнении [127]. Погрешность коэффициента трансформации трансформаторных делителей напряжения на фиксированной частоте может быть снижена до $\pm 10^{-4}\%$ в широком диапазоне температуры

с учетом изменчивости характеристик магнитных сердечников [52]. Однако такие метрологические характеристики могут быть получены только при использовании контактных переключателей или реле для коммутации обмоток трансформаторов. Применение таких переключателей нецелесообразно в автономной аппаратуре ввиду их малого быстродействия, большой потребляемой мощности, ограниченного ресурса работы, больших габаритов. Бесконтактные ключи свободны от указанных недостатков, но имеют значительно большее переходное сопротивление в открытом со-

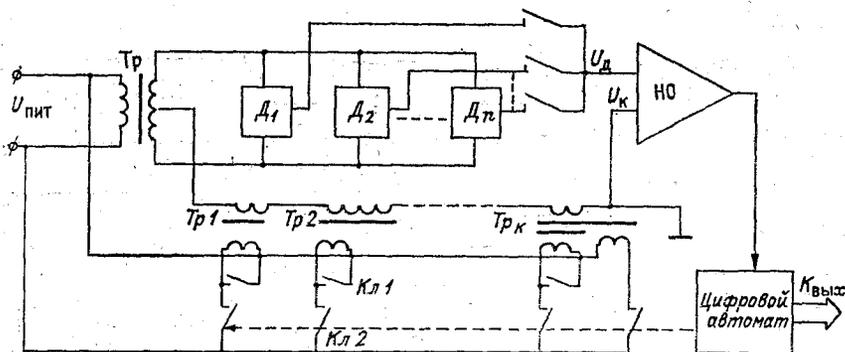


Рис. 3.2. Структурная схема модернизированного АЦП АЦИТа.

стоянии, что приводит к существенному снижению точности коэффициента трансформации под действием дестабилизирующих факторов.

Два различных варианта подобных схем построения ЦАП нашли применение в АЦИТе и *STD*-зонде *MARK-III*. В первом из них коммутируется первичная обмотка трансформаторного делителя, во втором — бесконтактные ключи установлены во вторичной обмотке.

По принципу действия измерительная схема АЦИТа относится к аналого-цифровым преобразователям последовательных, двоично-взвешенных приближений, в которых делитель компенсирующего напряжения построен из набора измерительных трансформаторов Tr_1, Tr_2, \dots, Tr_k (рис. 3.2). Эти трансформаторы выполнены таким образом, чтобы обеспечить изменение выходного напряжения U_k делителя по двоичному закону. Вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно, а первичные обмотки включены параллельно и коммутируются бесконтактными ключами $Kл1$ и $Kл2$.

В разомкнутом состоянии ключи имеют проходную емкость, поэтому для замыкания емкостной составляющей тока и для снижения выходного сопротивления делителя отключенные трансформаторы закорачиваются с помощью дополнительных ключей $Kл2$. Выходное напряжение U_k делителя используется для уравновешивания напряжения каждого датчика поочередно. Уравнове-

шивание измеряемого параметра происходит ступеньками, пропорциональными весу разрядов двоичного кода, обеспечивая количество дискретных значений измеряемой величины в соответствии с разрядностью делителя.

Заданный алгоритм функционирования такого АЦП обеспечивается цифровым автоматом, выполненным на кольцевом счетчике-распределителе и JK-триггерах памяти, управляющих бесконтактными ключами. В отличие от классической схемы (см. рис. 3.1) данный цифровой автомат объединяет в своем составе одновременно блок управления и выходной регистр [1]. В процессе уравнивания на выходе этого устройства формируется последовательный двоичный код $K_{\text{вых}}$, несущий информацию об измеряемом параметре. Величина и знак разбаланса в каждом такте поразрядного уравнивания определяются нуль-органом НО с фазовым детектором на входе. Делитель работает в режиме отсутствия токовой нагрузки, что необходимо для обеспечения точности коэффициента деления. Датчики D_1, D_2, \dots, D_n подключаются ко входу нуль-органа поочередно с помощью коммутатора параметров. С целью исключения влияния переходного сопротивления ключей в коммутаторе параметров переключаются только выходные потенциальные цепи с нулевым значением тока в момент равновесия. В качестве ключей $K_{\lambda 1}$ и $K_{\lambda 2}$ используются биполярные кремниевые транзисторы. Трансформаторы намотаны на миниатюрные кольцевые сердечники из феррита марки 6000НМ. Питание схемы осуществляется через трансформатор от синусоидального генератора частоты 10 кГц.

Однако обычная конструкция измерительных трансформаторов с бесконтактными ключами в первичной обмотке не обеспечивает требуемой точности и стабильности работы АЦП. Погрешность образуется за счет тока намагничивания сердечника, создающего падение напряжения на прямом сопротивлении ключа. Ток имеет реактивную и активную составляющие, обусловленные индуктивным сопротивлением обмотки и активными потерями в сердечнике на вихревые токи и гистерезис. Активная составляющая падения напряжения на ключе приводит к изменению коэффициента передачи каждого из звеньев трансформаторного делителя, а реактивная — к фазовому сдвигу выходного напряжения. В свою очередь, фазовый сдвиг приводит к образованию квадратурной помехи на входе нуль-органа, которая при определенных условиях проявляется как дополнительная погрешность измерения. Аналогичные погрешности наблюдаются и в схеме с контактными ключами за счет падения напряжения на индуктивности рассеяния и активном сопротивлении первичной обмотки. Но эти сопротивления меньше сопротивления ключа примерно в 30 раз, поэтому в такой же степени ослаблены и вызванные ими погрешности.

Согласно результатам, полученным в [22], относительное значение погрешности, вызванной указанными причинами, может достигать в АЦПТе при изменениях сопротивления бесконтактного ключа от 25 до 40 Ом почти $\pm 0,07\%$.

С целью снижения уровня этой погрешности в одном из модернизированных вариантов АЦИТа применен трансформаторный делитель напряжения, составленный из звеньев двух типов [22]. Первые четыре звена делителя, соответствующие старшим разрядам двоичного кода, дают основной вклад в общую погрешность коэффициента деления. Поэтому они выполнены по более сложной схеме на основе вдвоенных трансформаторов. Сдвоенный трансформатор представляет собой конструкцию из двух сложенных вместе кольцевых сердечников с тремя обмотками, одна из которых — первичная вспомогательная обмотка, охватывает только первый сердечник, а две других намотаны поверх обоих сердечников.

Принцип действия такой конструкции заключается в компенсации погрешности коэффициента передачи, вызванной падением напряжения в первичной обмотке, путем уменьшения протекающего по ней тока за счет вспомогательной первичной обмотки [51]. При этом основная часть полного магнитного потока трансформатора — более 99 % — замыкается по первому магнитному сердечнику и создается током вспомогательной обмотки. Потери на вихревые токи и гистерезис также почти полностью сосредоточены в первом сердечнике. По основной первичной обмотке протекает только малая часть тока, обусловленная падением напряжения на индуктивности рассеяния и активном сопротивлении вспомогательной обмотки. Ток основной обмотки создает во втором сердечнике корректирующий магнитный поток. Лучшие образцы трансформаторов такого типа при жгутовой конструкции обмоток и компенсации асимметрии распределенной межвитковой емкости имеют погрешность коэффициента передачи не более $\pm 10^{-5}$ %. В комбинации с бесконтактными ключами в основной и вспомогательной обмотках, включаемых и выключаемых синхронно, в полном диапазоне рабочей температуры АЦИТа нестабильность коэффициента передачи, согласно оценкам [22], достигает $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ %.

Помимо точности коэффициента деления, вторым параметром, определяющим метрологические характеристики трансформаторного делителя, является его выходное сопротивление. Чем меньше выходное сопротивление, тем меньшим изменениям подвержено выходное напряжение под влиянием емкостных наводок, утечек изоляции, неизбежных нагрузочных токов, создаваемых емкостью выходных цепей. В рассматриваемой схеме делителя полное сопротивление создается суммой сопротивлений последовательно соединенных обмоток разрядных трансформаторов. Выходное сопротивление r_0 каждого из них в свою очередь определяется сопротивлением ключа $r_{кл}$ в первичной обмотке и коэффициентом трансформации n , согласно выражению $r_0 = r_{кл}/n^2$.

Необходимо учитывать, что коэффициенты трансформации последовательных разрядов n_1, n_2, \dots, n_k , начиная со старшего, возрастают обратно пропорционально весовым коэффициентам двоичного кода: $n_2 = 2n_1$; $n_3 = 4n_1$; $n_4 = 8n_1$; \dots ; n_k ; $n_k = 2^{k-1}n_1$.

В соответствии с этим полное выходное сопротивление R_{Σ} трансформаторного делителя можно выразить следующим соотношением:

$$R_{\Sigma} = 2r_{к\lambda}/n_1^2, \quad (3.1)$$

где n_1 — коэффициент деления старшего разряда.

В частности, у АЦИТа выходное сопротивление не превышает 4 Ом, что крайне сложно достигается с помощью формирователей компенсирующего напряжения другого типа.

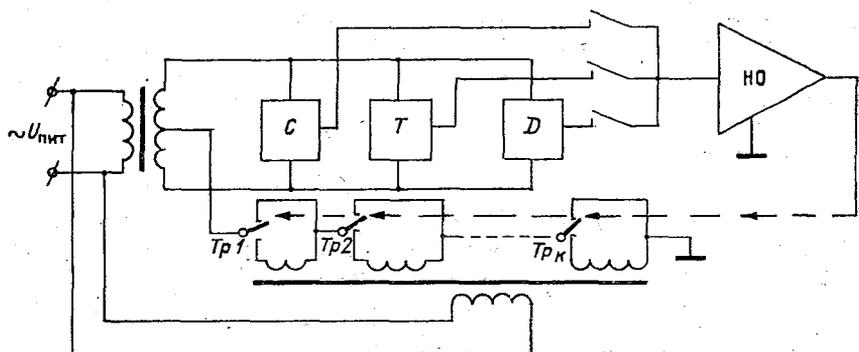


Рис. 3.3. Структурная схема АЦП CTD-зонда MARK-III.

Принцип действия и основные элементы преобразователя CTD-зонда MARK-III (рис. 3.3) аналогичны рассмотренному выше. Основное отличие состоит в том, что коммутирующие бесконтактные ключи установлены непосредственно во вторичных выходных обмотках и работают на переключение. Первичные обмотки измерительных трансформаторов Tr_1, Tr_2, \dots, Tr_k подключены постоянно к питающему напряжению $U_{пит}$, а вторичные — соединяются последовательно в различных комбинациях с помощью управляемых ключей. Число витков во вторичных обмотках, как и в первой схеме, пропорционально весовым коэффициентам разрядов двоичного кода. Поэтому выходное напряжение делителя получается прямо пропорциональным двоичному коду соответствующих замкнутому и разомкнутому состоянию коммутирующих ключей.

Основная особенность этой схемы состоит в разгрузке коммутирующих ключей от намагничивающего тока трансформатора. В результате в таких АЦП отсутствуют погрешности, обусловленные нестабильностью магнитных характеристик сердечника. Определенным преимуществом этого варианта схемы является меньшее количество трансформаторов, необходимое для построения многоразрядного преобразователя, поскольку на одном трансформаторе может быть размещено несколько вторичных обмоток.

В то же время схема делителя CTD-зонда MARK-III имеет два существенных недостатка по сравнению с рассмотренной выше.

Первый из них обусловлен последовательным соединением коммутирующих ключей, что приводит к возрастанию общего выходного сопротивления. Второй недостаток связан с тем, что ключи не имеют точки заземления. Это приводит к необходимости применения МДП-ключей взамен более стабильных и низкоомных биполярных транзисторов. При этом непостоянство сопротивления ключей, вызывает изменения модуля и фазы выходного напряжения такого делителя.

Из анализа, выполненного в работе [22] методом контурных токов, и решения на ЭВМ составленной матричной системы уравнений, следует, что суммарная погрешность данного типа трансформаторного делителя составляет примерно $\pm 0,01\%$. Также было установлено, что квадратурная составляющая этой погрешности равна $\pm 0,4\%$, а выходное сопротивление делителя зонда MARK-III лежит в пределах 480—720 Ом, что существенно выше, чем у АЦИТа.

Наряду с АЦП последовательных приближений в океанографических средствах измерения нашли применение АЦП с двухтактным интегрированием, причем с управлением от микропроцессора. Полный цикл работы такого АЦП осуществляется в два такта [28]. В первом с помощью аналогового интегратора происходит интегрирование входного напряжения, поступающего с датчика, за фиксированный интервал времени заряда t_3 . В результате на интегрирующем конденсаторе накапливается заряд

$$q_1 = U_{вх} t_3 / (RC),$$

где $U_{вх}$ — среднее значение напряжения с датчика за время t_3 ; R — сопротивление резистора интегратора; C — емкость интегратора.

Во втором такте происходит разряд конденсатора от источника опорного напряжения $U_{оп}$, который имеет полярность, противоположную входному напряжению, и подключается к интегратору с помощью переключателя. Этот процесс продолжается до возвращения конденсатора в начальные условия, что фиксируется компаратором. В результате удаленный из конденсатора заряд $q_2 = U_{оп} t_p / (RC)$, где t_p — время разряда конденсатора. Это время является переменным, и его значение однозначно характеризует напряжение с датчика. В том случае, если в качестве конденсатора C выбран элемент с малой адсорбцией заряда за время t_p , то $q_1 = q_2$ и, следовательно,

$$t_p = U_{вх} t_3 / U_{оп} \quad (3.2)$$

Существенными достоинствами такого типа АЦП является, во-первых, сглаживание и усреднение всех быстрых по сравнению со временем интегрирования помех, наводок и шумов. Во-вторых, интегрирование выходного сигнала с датчиков ведет к уменьшению погрешностей, связанных со стохастическими изменениями измеряемых океанографических величин в процессе их АЦ преобразования. В-третьих, использование двухтактного интегрирования позволяет компенсировать статистические погрешности, возникаю-

щие за счет изменения коэффициента усиления буферных усилителей нуль-органа его синфазной чувствительности к входному сигналу, возможных дрейфов характеристик указанных усилителей.

В настоящее время подобного рода АЦП применяются только в отдельных образцах *CTD*-зондов, например АЦИТ-У-06, а для их управления и обработки интервалов времени t_p и t_z используется микропроцессорный комплект серии 580 [104].

В последние годы наметилась тенденция развития интегральных АЦП, выполненных на одном-двух кристаллах. Это позволяет в значительной степени преодолеть противоречивые требования к точности и быстродействию данных устройств. Появлению интегральных АЦП способствовало развитие технологии промышленного производства микропроцессоров, полупроводниковых запоминающих устройств, а также широкое внедрение цифровых методов обработки информации и резкое удешевление цифровых систем.

Одним из первых интегральных АЦП является 12-разрядный преобразователь фирмы «Siliconics», выполненный на двух микросхемах *LD111* и *LD110*, первая из которых реализует аналоговые функции, а вторая является цифровым процессором, выполненным по КМОП-технологии. Данный преобразователь представляет собой АЦП-преобразователь интегрирующего типа с погрешностью на уровне разрешающей способности и быстродействием 83 мс на полный цикл преобразования [38].

Главным направлением в разработке интегральных АЦП высокой точности является использование в них принципа 2-тактного интегрирования с одновременной коррекцией напряжения смещения операционных усилителей нуль-органа. В этом отношении представляет интерес разработанный фирмой «Интерсил» (Intersil) 16-разрядный АЦП, выполненный на двух БИС 8052 и 7103 [130]. В микросхеме 8052 сосредоточен аналоговый процессор вместе с цепью коррекции нуля, а в 7103 — цифровой, выполненный по КМОП-технологии. В таком преобразователе достигается погрешность, соответствующая разрешающей способности 16 двоичных разрядов. При входном сигнале ± 2 В время преобразования составляет 330 мс. При уменьшении числа разрядов данного АЦП до 12 время преобразования можно уменьшить до 20 мс.

Отечественный аналог этой разработки микросхема 572ПВ1 имеет разрешающую способность только в 12 двоичных разрядов и погрешность не более $\pm 0,1$ %. В соответствии с этим при создании отечественных СИ океанографических величин до сих пор не было возможности прямого использования серийно выпускаемых промышленностью преобразователей аналог—код.

Дальнейшее развитие КМОП-технологии привело к появлению за рубежом 16-разрядных АЦП с быстродействием 1 мкс на цикл преобразования и потребляемой мощностью не более 10 мВт [127]. Применение таких устройств в составе подводных измерительных модулей океанографических величин позволяет существенно улучшить метрологические характеристики этой аппаратуры.

за счёт коррекции динамических и пространственных характеристик первичных преобразователей в реальном масштабе времени выполнения измерений [83, 13]. В перспективе это делает реальным значительно расширить объём операций по преобразованию, сжатию и обработке океанографической информации в автономных СИ непосредственно *in situ*.

3.2. Преобразователи напряжение—частота

В общем случае преобразователи напряжение—частота (ПНЧ) относятся к аналого-цифровым преобразователям. Известен широкий класс таких преобразователей. В них используется включение частотозависимых элементов в цепь низкодобротного контура LC -генераторов [40, 79]. Однако они не обладают необходимой для океанографических СИ погрешностью преобразования в $\pm 0,01\%$.

Наилучшие результаты по точности достигнуты в интегрирующих преобразователях напряжение—частота с внешней синхронизацией выходного сигнала от кварцевого генератора и двухстадийным интегрированием [113]. Фактически такие ПНЧ осуществляют вычисление интеграла по времени от измеряемого сигнала U_x с датчика D путем формирования видеопульсов стабильной амплитуды, длительность которых однозначно зависит от измеряемого напряжения (рис. 3.4).

Работа преобразователя начинается после поступления на тактовый C -вход счетчика-распределителя $СТДС$ сигнала кварцеванной частоты $f_{кв}$. При этом напряжение U_x с выхода датчика подано на прямой вход операционного усилителя $ОУ$, образующего совместно с конденсатором C_0 и резистором R_0 интегратор.

Значение напряжения $U_{вых}$ на выходе интегратора меняется по линейному закону в зависимости от соотношения напряжения с источника опорного напряжения и преобразуемого U_x , поступающего с датчика.

В исходном состоянии счетчик-распределитель находится в состоянии, при котором на всех его выходах за исключением Q_{n+1} присутствует сигнал логического «0». Во время первой стадии длительности t_1 сигнал логической «1» с выхода Q_{n+1} подключает инверсный вход $ОУ$ с помощью ключа K_1 к шине «Корпус». Тогда конденсатор C_0 заряжается с постоянной времени $\tau = K_{yc} C_0 R_0 \gg t_1$ и в результате обеспечивается практически линейное возрастание напряжения $U_{вых}$. После достижения $U_{вых}$ значения U_D , равного порогу логической «1» на D -входе D -триггера, последний переключается в состояние логической «1» очередным импульсом, поступившим на его тактовый C -вход с генератора Γ кварцеванной частоты $f_{кв}$. В результате элемент $\&$ открывается и сигнал логической «1» с Q_{n+1} -выхода счетчика-распределителя попадает на его R -вход. Указанный счетчик сбрасывается в состояние $Q_1 = \text{«1»}$, а остальные его выходы Q_2, \dots, Q_n, Q_{n+1} принимают состояние логического «0». Тогда сигнал логического «0» с Q_{n+1} -выхода счет-

чика *СТДС* снимает блокировку с *V*-входа этого счетчика и прекращает действие сигнала сброс по его *R*-входу. Одновременно

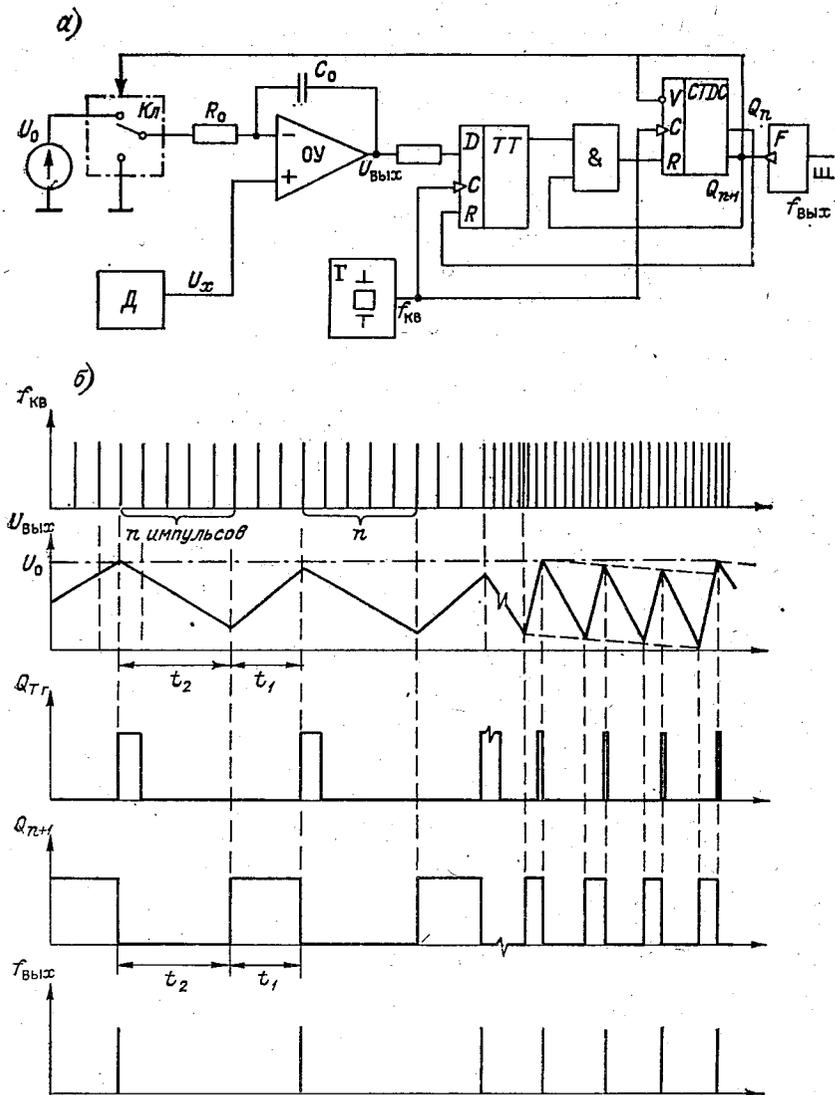


Рис. 3.4. Преобразователь напряжение—частота.
а — структурная схема; б — временные диаграммы работы.

появление сигнала логического «0» на выходе Q_{n+1} переключает ключ *Кл* в состояние, при котором на инверсный вход *ОУ* через резистор R_0 будет подключено опорное напряжение U_0 . С этого момента начинается вторая стадия работы данного преобразователя напряжение—частота. В течение этой стадии длительностью

t_2 счетчик-распределитель осуществляет подсчет импульсов кварцевой частоты $f_{\text{кв}}$, поступающих на его тактовый C -вход.

После подключения опорного сигнала U_0 на инверсный вход OY конденсатор C_0 начинает разряжаться и напряжение $U_{\text{вых}}$ начнет уменьшаться. После снижения $U_{\text{вых}}$ ниже уровня U_D очередной импульс с генератора кварцевой частоты переключает D -триггер в состояние $Q = \langle 0 \rangle$ и тем самым снимается разрешение с элемента U на прохождение сигналов на R -вход счетчика-распределителя. Счетчик-распределитель во время второй стадии осуществляет подсчет импульсов частоты от кварцевого генератора $f_{\text{кв}}$. После поступления на тактовый C -вход этого счетчика n импульсов, число которых равно его емкости по выходу Q_n , счетчик-распределитель по выходу Q_{n+1} вновь принимает состояние логической «1». Сигнал логической «1» с этого выхода вновь блокирует счетчик-распределитель по V -входу и переключает с помощью ключа $Kл$ конденсатор C_0 на заряд. Далее цикл работы рассматриваемого преобразователя повторяется. В результате на a_{n+1} выходе счетчика-распределителя с помощью формирователя F формируется последовательность видеоимпульсов, частота следования которых будет прямопропорциональна значению напряжения U_x с датчика.

В таком преобразователе сигнал на выходе OY имеет пилообразную форму с низкочастотной огибающей также пилообразного вида. Это является следствием того, что выходная частота $f_{\text{вых}}$ в общем случае не будет точно кратна частоте кварцевого генератора. Результатом эффекта пилообразной модуляции является некоторая нерегулярность импульсов на выходе формирователя F . В итоге к погрешности квантования $\delta_{\text{кв}}$, возникающей при измерении $f_{\text{вых}}$ за фиксированный интервал времени $t_{\text{оп}}$ (см. рис. 3.3), добавляется погрешность преобразования $\delta_{\text{пр}}$ напряжения — частота.

Из рассмотрения временной диаграммы работы данного преобразователя (см. рис. 3.4 б) видно, что максимальная погрешность преобразования будет иметь место в том случае, когда длительность t_1 пилообразного процесса будет максимально отличаться от требуемой по соотношению U_x/U_0 . Это максимальное различие Δt равно периоду следования сигналов кварцевой частоты. В соответствии с этим погрешность преобразования можно определить как

$$\delta_{\text{пр}} = \Delta t / t_{\text{оп}} = (t_{\text{оп}} f_{\text{кв}})^{-1}. \quad (3.3)$$

В свою очередь относительная погрешность квантования при измерении частоты $f_{\text{вых}}$ связана с фиксированным интервалом времени $t_{\text{оп}}$, за который она измеряется, соотношением

$$\delta_{\text{кв}} = (t_{\text{оп}} f_{\text{кв}})^{-1}. \quad (3.4)$$

Поэтому желательно длительность временного интервала $t_{\text{оп}}$ и частоту $f_{\text{кв}}$ выбирать таким образом, чтобы $\delta_{\text{пр}}$ не оказывала

заметного влияния на суммарную погрешность $\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\text{КВ}}^2 + \delta^2}$ преобразования данной океанографической величины в код. Это означает, что для достижения приемлемой суммарной погрешности $\mp 0,01\%$ при частоте $f_{\text{КВ}} = 32768$ Гц для максимально возможного отношения частот $f_{\text{КВ}}/f_{\text{ВЫХ}} = 2:1$, время измерения $t_{\text{оп}}$ на основании формул (3.3) и (3.4) должно быть установлено не менее 0,5—0,6 с.

Равномерное следование импульсов выходной частоты данного преобразователя достигается только тогда (см. рис. 3.4 б), когда эти импульсы будут сформированы по задним фронтам сигналов с выхода Q_{n+1} счетчика-распределителя.

Формула для расчета выходной частоты $f_{\text{ВЫХ}}$ такого преобразователя получается исходя из условия сохранения энергии на конденсаторе C_0 в течение каждого цикла его заряда и разряда. В соответствии с этим считается, что суммы положительных q_1 и отрицательных q_2 зарядов на конденсаторе C_0 в процессе его многократного перезаряда должны быть равны между собой, если начальное и конечное напряжение на конденсаторе остается неизменным. Если исходить из этого, то можно считать, что за интервал времени $t_{\text{оп}}$ числа циклов заряда и разряда конденсатора C_0 равны. Сумма положительных зарядов q_1 конденсатора C_0 в течение интервала времени $t_{\text{оп}}$ измерения равняется произведению тока I_1 через резистор R_0 на суммарное время t_1 заряда конденсатора C_0 . Ток заряда I_1 однозначно определяется выходным напряжением U_x с датчика и резистором R_0 , поэтому

$$q_1 = I_1 t_1 = U_x t_1 / R_0. \quad (3.5)$$

Аналогичным образом сумма разрядов q_2 конденсатора C_0 определится падением напряжения на резисторе R_0 в отрицательной стадии процесса и суммарным временем разряда t_2 , согласно выражению

$$q_2 = (U_0 - U_x) t_2 / R_0. \quad (3.6)$$

Поскольку считается, что время измерения $t_{\text{оп}}$ выбрано таким, что в нем укладывается целое число N интервалов времени t_1 и t_2 , а $q_1 = q_2$, то, приравнивая выражения (3.5) и (3.6), получим

$$(U_0 - U_x) t_2 / R_0 = U_x t_1 / R_0$$

или

$$(U_0 - U_x) t_2 N / R_0 = U_x t_1 N / R_0,$$

где N — общее число циклов заряда/разряда конденсатора за время $t_{\text{оп}}$.

Тогда

$$U_0 t_2 N = U_x (t_1 N + t_2 N) = U_x t_{\text{оп}}. \quad (3.7)$$

В свою очередь, выходная частота $f_{\text{ВЫХ}}$ связана с общим числом N циклов заряда/разряда конденсатора соотношением

$$f_{\text{ВЫХ}} = N / t_{\text{оп}}.$$

а кварцованная частота $f_{кв}$ с интервалом времени t_2 разряда — соотношением

$$f_{кв} = n/t_2,$$

где n — разрядность счетчика-распределителя.

Тогда выражение (3.7) может быть записано как

$$U_0 n / f_{кв} = U_x / f_{вых}.$$

Отсюда вытекает, что частота $f_{вых}$ выходного сигнала данного преобразователя связана с входным напряжением U_x с датчика Δ и параметрами схемы следующей зависимостью:

$$f_{вых} = (U_x / U_0) (f_{кв} / n). \quad (3.8)$$

Полученное выражение показывает, что выходная частота $f_{вых}$ описываемого ПНЧ линейно зависит от отношения преобразуемого напряжения U_x к опорному U_0 и не зависит от параметров резистора R_0 и конденсатора C_0 .

В реальной схеме выходная частота несколько отличается от теоретического значения, полученного по формуле (3.8), в пределах $\pm 0,1\%$ за счет отклонений параметров OU и ключа от идеальных: ненулевым значением входного тока OU , не бесконечно большим коэффициентом OU и наличием дрейфа нуля, вследствие чего $U_x \neq U_{вых}$. Некоторый вклад на уровне $\pm 0,005\%$ в общую погрешность преобразования вносят задержки на фронтах цифровых элементов схемы, а также возможная асимметрия переходного сопротивления ключа $Kл$ в двух возможных состояниях. В связи с отсутствием в СССР интегральных АЦП достаточной для нужд океанографии точности такие устройства находят широкое применение в отечественных автономных СИ океанографических величин. В частности, подобного рода схемно-технические решения реализованы в конструкции *STD*-измерителя АЦИТ-У-02, в каналах измерения температуры и электрической проводимости автоматической телеизмерительной станции ДУ-МГ. В них удалось снизить суммарную погрешность аналого-цифрового преобразования до $\pm 0,01\%$ в полном диапазоне рабочей температуры от -5 до -35°C при частоте кварцевой стабилизации 32768 Гц. При этом частота выходного сигнала изменяется от 0 до 4 кГц при вариации сигналов с датчиков от 0 до 100 мВ.

3.3. Цифровые измерительные преобразователи

Целый ряд датчиков, такие как вертушечный датчик скорости водного потока, пьезокварцевый датчик температуры, компас фазовращающего типа, вибратронные и пьезокварцевые датчики давления, имеют на своем выходе сигнал, пригодный для непосредственного преобразования в цифровой код. Это частота вращения вертушек, либо частота собственных колебаний кварцевой пластины или вибратронного резонатора, либо фазовый сдвиг, снимаемый с компасного фазовращающего преобразователя.

В равной степени это относится к сигналу, поступающему с выхода преобразователя напряжения — частота. Однако даже сигналы от таких датчиков или преобразователей, несущие информацию об измеряемых океанографических величинах в виде частоты f_d или временного интервала t_d , требуют дальнейшего преобразования в автономных СИ. Это связано с тем, что запись и долговременное хранение полученных результатов измерения непосредственно в форме частотного или широтно-импульсного сигнала выполнять невозможно. Необходимо осуществлять представление данной информации в кодовом виде. В автономных океанографических приборах для этого используется, как правило, двоичный взвешенный код, поскольку тогда достигается минимум аппаратных затрат для регистрации 1 бита информации. Для этого служат цифровые измерительные преобразователи.

В настоящее время в измерительной и вычислительной технике разработан широкий класс таких устройств [40, 72, 73, 78, 109]. В их состав входят накопительный счетчик СТ выходного кода $K_{\text{вых}}$, несущего информацию об измеряемой океанографической величине, ключевой элемент, генератор Г опорной (обычно кварцовой) частоты $f_{\text{кв}}$ и делитель-формирователь временного измерительного интервала $t_{\text{оп}}$.

Такие схемы обеспечивают получение искомого результата измерения в виде значения кода $K_{\text{вых}1,2}$, накопленного в счетчике СТ, либо в результате счета импульсов частоты f_d с датчика за фиксированный временной интервал $t_{\text{оп}}$:

$$K_{\text{вых}1} = f_d t_{\text{оп}1} = f_d m / f_{\text{оп}1}, \quad (3.9)$$

где m — коэффициент деления делителя D , либо в результате подсчета импульсов опорной частоты $f_{\text{оп}2}$ за временной интервал t_d , поступающий от датчика:

$$K_{\text{вых}2} = f_{\text{оп}2} t_d. \quad (3.10)$$

При использовании в автономных океанографических СИ приведенных классических схем такого рода цифровых преобразователей главной задачей становится выбор элементной базы для их построения и определения параметров $f_{\text{оп}}$ и m исходя из требований необходимой точности измерения и характеристик датчиков. К выбору элементной базы можно подходить с общих позиций требований к аппаратуре, работающей от ограниченных по мощности и емкости источников энергии. Отсюда вытекает необходимость применения маломощных цифровых интегральных элементов, к которым относятся микросхемы серий 176, 561 или 564, выполненные по КМОП-технологии. Определение значений $f_{\text{оп}}$ и m или $t_{\text{оп}}$ может быть проведено почти целиком на основе требований к погрешности квантования.

Относительное предельно допустимое значение этой погрешности $\delta_{\text{кв}}$ однозначно определяется разрядностью выходного кода $K_{\text{вых}}$, т. е.

$$\delta_{\text{кв}1} = (f_d t_{\text{оп}})^{-1} = f_{\text{оп}1} / (f_d m) \quad \text{или} \quad \delta_{\text{кв}2} = (f_{\text{оп}2} t_d)^{-1}. \quad (3.11)$$

Известно, что график распределения вероятностей погрешности квантования имеет вид треугольника и их средние квадратические отклонения $\sigma_{\text{кв}}$ связаны с предельно допустимыми соотношением

$\sigma_{\text{кв}} = \delta_{\text{кв}} / \sqrt{6}$ [79]. Поэтому выражения для определения параметров рассматриваемых измерительных преобразователей могут быть с учетом выражения (3.11) представлены в следующем виде:

$$t_{\text{оп}1} \geq (\sigma_{\text{кв}1} f_{\text{д}} \sqrt{6})^{-1} \quad \text{и} \quad m \geq f_{\text{оп}1} / (\sigma_{\text{кв}1} f_{\text{д}} \sqrt{6}). \quad (3.12)$$

$$f_{\text{оп}2} \geq (\sigma_{\text{кв}2} t_{\text{д}} \sqrt{6})^{-1}. \quad (3.13)$$

Исходя из этого при заданном значении $\sigma_{\text{кв}}$ и известных характеристиках датчиков определяются параметры рассматриваемых преобразователей.

В тех случаях, когда нет возможности неограниченно увеличивать $f_{\text{оп}2}$ или есть необходимость уменьшить время выполнения измерения $t_{\text{оп}1}$, при тех же требованиях к точности получаемых результатов, производят дополнительную синхронизацию измерительных интервалов $t_{\text{оп}1}$ или частоты $f_{\text{оп}2}$ от сигналов с датчиков.

Это позволяет при тех же параметрах измерительной схемы и датчиков уменьшить погрешность квантования вдвое или без потери точности сократить в 2 раза длительность временного интервала $t_{\text{оп}}$ и, следовательно, уменьшить на единицу разрядность выходного кода. Последнее обстоятельство может оказаться полезным при проектировании автономных приборов с полупроводниковым блоком памяти ограниченной емкости. Уменьшение времени $t_{\text{оп}}$ и, следовательно, повышение быстродействия описанных цифровых преобразователей имеет существенное значение при выполнении измерений таких гидрофизических величин, как температура, электрическая проводимость и давление. Это позволяет снизить методические погрешности, связанные с возможной асинхронностью измерений, выполняемых по последовательной схеме.

Одна из возможных схем независимой синхронизации временных интервалов $t_{\text{оп}}$ для каждого измерительного канала *СТД*-измерителя с частотными датчиками D_T , D_R , D_P температуры, электрической проводимости и давления показана на рис. 3.5. В ее состав входят генератор Γ опорной частоты $f_{\text{оп}}$, три независимых делителя-формирователя измерительных временных интервалов t_T , t_R , t_P , три ключа $\&_T$, $\&_R$, $\&_P$ и три накопительных счетчика $СТ_T$, $СТ_R$ и $СТ_P$. Каждый из делителей выполнен на основе *JK*-триггера, счетчика $СТ_m$ и формирователя F одиночного импульса. В исходном состоянии счетчик $СТ_m$ «обнулен», а *JK*-триггер установлен в состояние $Q = \langle 0 \rangle$, при котором работа указанного счетчика по тактовому *C*-входу заблокирована наличием сигнала логического «0» на его *V*-входе «Запрет счета». По команде «Пуск», поступающей в заданные моменты времени от таймера, на *J*-входе *JK*-триггера появляется сигнал уровня логической «1», разрешаю-

ший установку этого триггера в состояние $Q=«1»$. Поэтому первый же сигнал, поступивший от соответствующего датчика вслед за командой «Пуск» переведет его в положение $Q=«1»$ и разрешит работу счетчика $СТ_m$. Данный счетчик осуществляет подсчет импульсов сигнала опорной частоты $f_{оп}$ от генератора Г. После поступления на тактовый С-вход m таких импульсов счетчик $СТ_m$ переполняется и срабатывает формирователь F. Импульсный си-

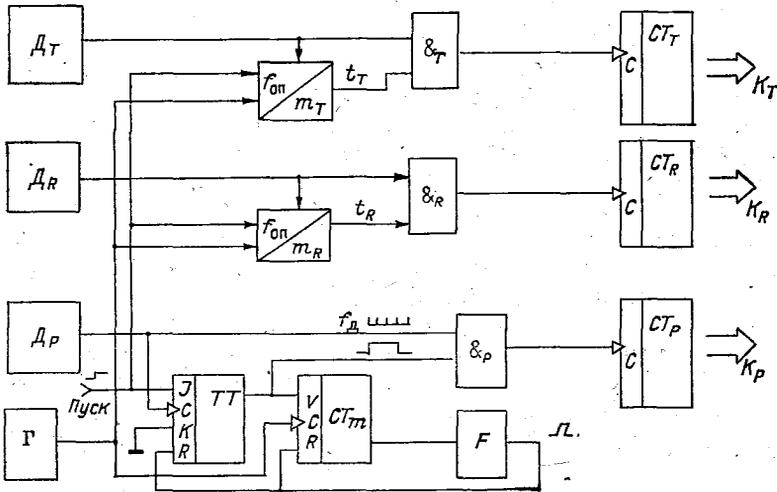


Рис. 3.5. Структурная схема CTD -измерителя с синхронизацией сигналов с датчиков.

гнал с этого формирователя возвращает JK -триггер в состояние $Q=0$ и обнуляет счетчик $СТ_m$. В результате на Q -выходе JK -триггера оказывается сформирован сигнал длительностью $t_{оп} = f_{оп}m$, передний фронт которого совпадает с передним фронтом первого сигнала, поступившего с датчика вслед за сигналом «Пуск». При этом точность совмещения тем выше, чем больше отношение $f_{оп}/f_d$ вне зависимости от величины m . Практически возможная асинхронность такой схемы не оказывает влияния на точность измерения при

$$f_{оп} \geq 3f_d. \quad (3.14)$$

Во время сигнала t_T , t_R или t_P соответствующие ключи $\&_T$, $\&_R$ или $\&_P$ были открыты и сигналы с датчиков поступают на тактовые С-входы соответствующих накопительных счетчиков. В результате в них оказываются получены коды K_T , K_R и K_P , характеризующие собой измеряемые CTD -параметры с погрешностью квантования $\delta_{кв}$, которая по сравнению с расчетами по формуле (3.11) будет за счет синхронизации уменьшена в 2 раза. Значит выражение (3.12) можно представить как

$$m \geq f_{оп}/(\sigma_{кв} f_d 2 \sqrt{6}). \quad (3.15)$$

Отсюда видно, что при проектировании подобных схем при заданных характеристиках датчиков, погрешности $\sigma_{\text{КВ}}$ и при выполнении условия (3.14) необходимо лишь выбрать емкость m счетчика CT_m , входящего в состав делителей-формирователей измерительных интервалов. Выражение для этого выбора, полученное на основании формул (3.15) и (3.14), имеет вид

$$m \geq 3/(\sigma_{\text{КВ}} 2 \sqrt{6}) \approx 0,6/\sigma_{\text{КВ}}. \quad (3.16)$$

Подобная схема реализована в АЦИТе-У-02, в котором для обеспечения погрешности квантования менее $\pm 0,015\%$ искомая емкость счетчика равна $2^{12} = 4096$, что несколько больше 4000, требуемой по условию (3.16).

Наряду с традиционными цифровыми измерительными преобразователями в океанографических СИ применяются отдельные специфические. К ним относятся преобразователи частоты вращения лопастного винта в число-импульсный код с определением направления вращения этого винта и преобразователи азимутального угла β магнитных компасов в цифровой код.

Преобразователи вращения лопастного винта в число-импульсный код строятся в основном на герметичных управляемых магнитным полем контактах (герконах), оптронных парах или магнитодиодах. В них в зависимости от конструкции датчика скорости потока используется один, два или даже три магниточувствительных элемента [3]. Так, например, в вертушечных датчиках с однонаправленным вращением ротора Савониуса или при строгой ориентации оси вращения лопастного винта ограничиваются только одним магниточувствительным элементом. Такова конструкция измерителей течения SLS 11 французской фирмы «Сьюбер», фирмы «Ондеро инструментс» RCM 4S, 5, 7, 8, модель 135, ДИСК. В приборах АЦИТ-У-01 и VMCM используются спаренные магниточувствительные элементы, в первом — герконы, а во втором — магнитные диоды, установленные так, что возможно определять направление вращения реверсивных лопастных винтов.

Устройство этого преобразователя измерителя VMCM подробно описано в работе [149], а конструкция герконного преобразователя [10], приведена на рис. 3.6. Данная конструкция содержит цилиндрические магниты 4, закрепленные в специальном держателе 6 на оси 5 вращения лопастного винта 2 и установленные таким образом, чтобы их полюса были направлены друг к другу, а также герконы Гк1 и Гк2. Герконы неподвижно закреплены в непосредственной близости от траектории движения магнитов 4 (см. рис. 3.6, А—А). Встречное включение магнитов позволяет геркону при каждом его срабатывании перематываться, что предотвращает «залипание» геркона. Частота срабатывания $f_{\text{ГК}}$ геркона оказывается прямопропорциональна частоте вращения f лопастного винта. При подключении герконов Гк1 и Гк2 через резистора $R_{\text{ГК}}$ к источнику питания $U_{\text{пит}}$ на их выходе формируется последовательность электрических импульсных

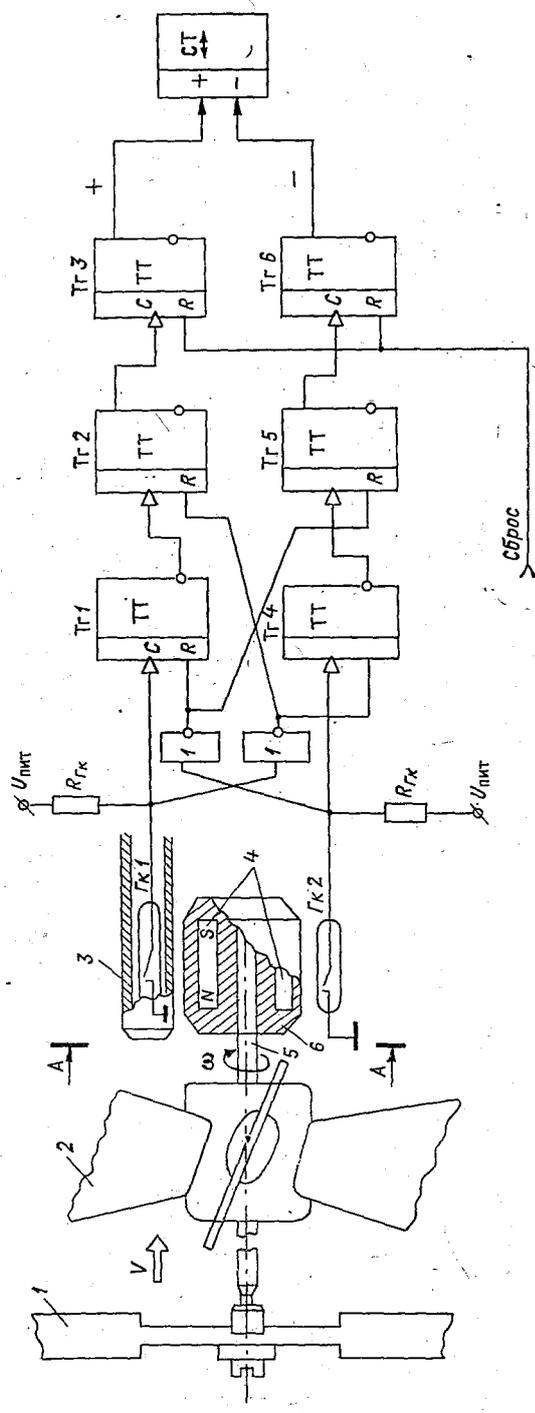
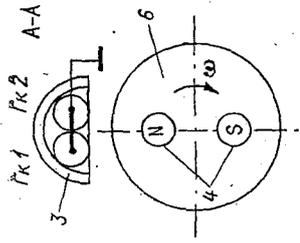


Рис. 3.6. Кинематическая и электрическая схемы герконового преобразователя пропеллерного датчика скорости.
 1 — стойка; 2 — лопастной винт; 3 — держатель геркона; 4 — магниты; 5 — ось; 6 — держатель магнита.

сигналов, частота следования которых характеризует частоту вращения f_v лопастного винта, а их взаимное расположение — направление этого движения. Конструкция крепления герконов вблизи траектории движения магнита выполнена таким образом, чтобы их зоны срабатывания перекрывались. Тогда схема логического анализа электрических сигналов с этих магниточувствительных элементов может однозначно определять направление вращения лопастных винтов. Главной задачей проектирования таких схем является обеспечение безошибочного алгоритма определения и фиксирования направления вращения лопастного винта, в том числе при его реверсировании в зоне срабатывания герконов.

Удачным примером подобной схемы может явиться устройство, выполненное согласно работе [10] и примененное в АЦИТ-У-01. В нем использованы герметизированные контакты (герконы) типа КМ-26, а цилиндрические магниты 4 изготовлены из магнитотвердого сплава ЮНДК35АА или ЮН14ДК24. В состав приведенной схемы, служащей для определения направления вращения лопастных винтов, входят: две пары триггеров $T_{г1}, T_{г4}$ и $T_{г2}, T_{г5}$ определения направления вращения лопастного винта, пара исполнительных триггеров $T_{г3}, T_{г6}$, два инвертора. Взаимное соединение элементов, входящих в рассматриваемую схему, обеспечивает однозначное формирование на ее выходах «+» и «-» сигнала логической «1» при прохождении любым из магнитов всей зоны срабатывания обоих герконов $G_{к1}$ и $G_{к2}$. При частичном прохождении этой зоны или при срабатывании только одного геркона сигналы на выходах данной схемы вырабатываться не будут. Алгоритм работы представленного устройства такой, что в случае возникновения изменения направления вращения лопастного винта (его реверса) в зоне срабатывания герконов на выходах «+» и «-» или вообще не будут формироваться сигналы логической «1» или эти сигналы будут появляться последовательно по выходам «+» и «-» один за другим. Их поочередное появление не свидетельствует о совершении лопастным винтом полного оборота и не подсчитывается реверсивным накопительным счетчиком число-импульсного кода СТ. Это исключает возможность накопления ошибки при измерении скорости ω колебательного вращения лопастного винта и, следовательно, скорости течения при близкой к нулевой скорости движения воды через датчик.

Магнитные диоды используются в преобразователях рассматриваемого типа в долговременном измерителе скорости течения МГИ 1301 ДИСК и VMСМ. В VMСМ применяются двоянные магнитные диоды, а в ДИСКе — одиночные. В VMСМ магнитные диоды расположены по траектории движения магнита и сдвинуты под углом 90° , что дает возможность по соотношению интервалов времени между их срабатываниями определять направление вращения лопастных винтов. В ДИСКе лопастной винт однозначно с помощью стабилизатора системы подвески прибора ориентируется по потоку, поэтому необходимость в определении направления вращения винта отсутствует.

Оптронные преобразователи вращения лопастного винта в число-импульсный электрический сигнал применены в приборах типа «Поток». В качестве излучателя и фотоприемника оптронной пары применены светодиоды АА107Б. Недостатком такой системы является относительно высокий ток потребления оптронной пары до 100 мА, а также необходимость ввода вращения лопастного винта внутри герметичного корпуса измерителя, поскольку в противном случае указанной паре приходится работать под высоким внешним давлением и зависеть от прозрачности воды, в которую помещен прибор. Принцип работы такого преобразователя довольно прост. Шторка с отверстиями периодически перекрывает луч света, связывающий светодиод-излучатель и приемник. В результате на выходе светодиода-приемника во время вращения лопастного винта возникает последовательность электрических импульсов. Эти сигналы анализируются логической схемой для определения направления вращения лопастного винта и подсчитываются счетчиком.

До последнего времени в измерителях течения в качестве компаса с цифровым выходом в основном использовались устройства с кодирующими дисками. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании дисков с нанесенными на них фотографическим способом масок кода Грея и считывании информации с помощью миниатюрных фотодиодов или волоконно-оптических приспособлений. Сведения об этих преобразователях имеются в соответствующей литературе [89, 101]. Однако все компасы с такими преобразователями обладают довольно сложной конструкцией, требуют при их изготовлении использования специальных технологий и не получили широкого использования в отечественных серийных океанографических приборах.

В соответствии с этим в последние годы начали применяться компасы гониометрического типа с емкостными преобразователями азимутального угла β в фазовый сдвиг электрического сигнала, снимаемого с подвижного электрода катушки, относительно питающего напряжения (см. п. 2.5). Для преобразования этого фазового сдвига в цифровой код используются специальные измерители фазы (рис. 3.7). В его состав входят усилители $У1$ и $У2$ измерительного и опорного сигналов, формирователи импульсов $F_{оп}$ и F_{β} , триггер формирования временного интервала T_2 , генератор опорного сигнала Γ , делитель частоты $СТ2$ и счетчик $СТ1$. Отличительной особенностью такого генератора является то, что резонансный усилитель $У3$ генератора опорного сигнала одновременно используется при измерении временного интервала t_{β} и для формирования питающего напряжения на компасе. Он собран по схеме LC -генератора ударного возбуждения. В результате нестабильность такого генератора в пределах $\pm 10\%$ не оказывает влияния на точность измерения компасного угла.

Измерение компасного угла в такой схеме производится после запуска генератора Γ , который выдает сигнал опорной частоты $f_{оп} = 1,28$ МГц. Из него на выходе делителя частоты $СТ2$ формиру-

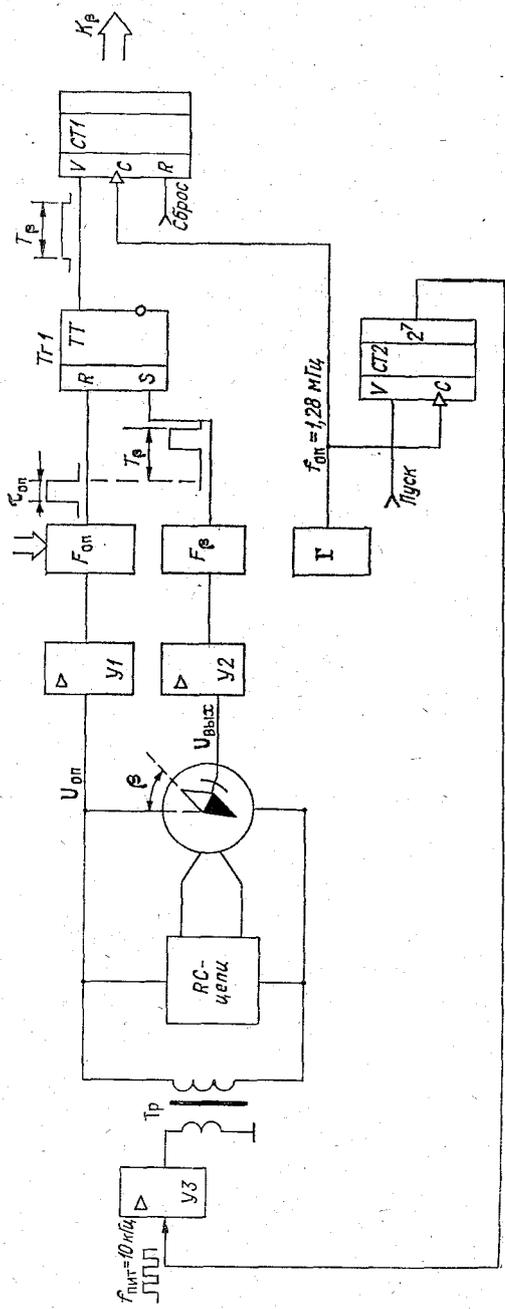


Рис. 3.7. Преобразователь азимутального угла β в цифровой код.

ется сигнал прямоугольной формы частоты питания $f_k = 10$ кГц компаса. Резонансный усилитель $У3$ преобразует этот сигнал в синусоидальный, который далее в виде напряжения питания компаса поступает через трансформатор на фазовращающие RC-цепи компаса. В результате с подвижного электрода компаса, установленного на его картушке, снимается выходной сигнал $U_{\text{вых}} \approx 1$ В.

Это напряжение в пределах 10 % остается постоянным при различных положениях картушки, а его фаза θ_β , согласно принципу работы, меняется в соответствии с пространственным углом β разворота картушки. Для съема выходного напряжения используется емкостной токосъем, имеющий конструктивную емкость порядка 2 пкФ. Поэтому входные цепи такого преобразователя стремятся обеспечить минимальной входной емкостью. Для этого на входах обоих усилителей $У1$ и $У2$ имеются истоковые повторители, которые могут быть выполнены на различных типах полевых транзисторов. Например, в данной схеме использованы повторители, построенные на микросхеме К190КТ1, обеспечивающие входную емкость не более 10—12 пкФ. Таким образом, сигнал в схему цифровой обработки поступает с емкостного делителя 1 : 5, образованного конструктивной емкостью токосъема подвижного электрода и входной емкости истокового повторителя. В соответствии с этим в канале опорной фазы также установлен емкостной делитель с тем же коэффициентом деления. Два усилителя $У1$ и $У2$, расположенные в измерительном и опорном канале, обеспечивают на своем выходе сигналы $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{оп}}$ уровня, достаточного для срабатывания последующих формирователей $F_{\text{оп}}$ и F_β . Временной интервал t_β между задними фронтами импульсов с этих формирователей однозначно характеризует измеряемый фазовый сдвиг θ_β .

Длительность $t_{\text{оп}}$ опорных импульсов при настройке компаса может плавно изменяться от 1,2 мкс до 31 мкс, что позволяет проводить регулировку фазового сдвига выходного сигнала относительно опорного. Тем самым обеспечивается возможность только электрическими регулировками выполнять условное совмещение пространственного положения нулевого питающего электрода с приборной системой координат, относительно которой должен отсчитываться компасный угол β .

В свою очередь временной интервал t_β оказывается однозначно связан с пространственным углом β разворота картушки магнитного компаса и его питающим напряжением следующей зависимостью:

$$t_\beta = (\beta/360)(1/f_k), \quad (3.17)$$

где f_k — частота питания компаса.

В описанной схеме при $f_k = 10$ кГц интервал времени будет меняться от 0 до 100 мкс. Этот временной интервал выделяется на выходе триггера $Tg1$, который на это время открывает счет по V-входу счетчика-измерителя. В итоге в счетчике $СТ1$ оказывается

накоплен код: $K_{\beta} = t_{\beta} f_{оп}$, который будет однозначно характеризовать значение измеренного компасного угла

$$K_{\beta} = (\beta/360) (f_{оп}/f_{к}). \quad (3.18)$$

Метод жесткой связи измерительной частоты $f_{оп}$ и частоты $f_{к}$ питания компаса не всегда является приемлемым в связи с трудностями настройки резонансного усилителя УЗ, обеспечивающего питание компаса, на требуемую частоту и достижения высокоэкономического режима его работы с потреблением не более 1 мА. В частности, в АЦИТе-У-01 для питания компаса используется отдельный независимый LC-генератор ударного возбуждения на частоте $f_{к}$. В таком случае нестабильность генератора по частоте оказывает непосредственное влияние на точность измерения азимутального угла.

В заключение необходимо отметить, что цифровые методы преобразования океанографической информации не ограничиваются кругом только перечисленных задач. В современные автономные приборы также помещают устройства, служащие для обработки сигналов, поступающих от нескольких датчиков для получения непосредственно *in situ* результатов косвенных измерений океанографических величин. Цифровые схемы применяются для измерения среднего вектора скорости течения, элементов волнения и солёности морской воды. Данный вид преобразователей широко используется при коррекции характеристик датчиков океанографических СИ (см. п. 3.5, 3.7).

3.4. Сжатие информации

В автономных средствах измерения крайне остро стоит вопрос об оптимальном сжатии получаемой измерительной информации. Это обусловлено тем, что автономные океанографические средства измерения, в отличие от зондирующих и буксируемых, не передают непосредственно пользователям результаты измерения.

В автономных средствах измерения обязательно между датчиком и потребителем океанографической информации находится блок накопления и хранения результатов измерения. В соответствии с этим крайне важным является оптимальная загрузка этого блока максимально информативными данными. Поэтому в средства измерения целесообразно включать элементы, позволяющие исключать избыточную информацию. При этом применяют обратимое и необратимое сжатие получаемой измерительной информации.

Одним из путей снижения избыточности накапливаемой информации является применение адаптивного квантования по времени измеряемых гидрофизических величин с занесением в блок памяти только значимых результатов. В этом случае сохраняется возможность после окончания наблюдений этим автономным прибором считать из его памяти информацию и восстановить исход-

ные данные с помощью приближающихся функций минимальной сложности [109, 91]. Тогда задача квазиобратимого сжатия цифровой океанографической измерительной информации формулируется следующим образом.

Исходная непрерывная функция $x(t, r_i)$, характеризующая изменения измеряемой океанографической величины, в интервале времени наблюдений $[0, t_H]$ представлена с заданной погрешностью Δx функцией $y(t, a_1, a_2, \dots, a_n)$. Величины $\{a_i\}$ при $i=1, 2, \dots, n$ представляют собой равноотстоящие дискретные значения исходной функции $x(t, r_i)$. В том случае если возможно восстановить $x(t, r_i)$ с заданной погрешностью Δx другим набором значений $\{b_j\}$ при $j=1, 2, \dots, l$, которые приняты за значимые, причем $l < n$, то исходная информация является избыточной и подлежит сжатию. Коэффициент сжатия таких измерительных устройств с адаптивным шагом дискретизации определится как

$$k_I = n/l. \quad (3.19)$$

В автономных адаптивных СИ обычно необходимо иметь дополнительную информацию о датировании отсчета. Эта информация может быть представлена номером N_j , заносимого в память результата измерения, а число таких номеров в интервале времени $[0, t_H]$ также равно l . В таких устройствах коэффициент сжатия информации составляет:

$$k_I = n/2l. \quad (3.20)$$

Отсюда видно, что реализация адаптивного режима измерения позволяет уменьшить объем памяти проектируемого СИ только в тех случаях, когда $l < n/2$.

При океанографических исследованиях такая ситуация возникает при проведении наблюдений за электрической проводимостью и температурой в одном слое воды, например на одном горизонте заякорной буйковой станции. Такого рода наблюдения призваны выполнять *CTD*-измерители, работающие с постоянной временной дискретностью отсчетов. В них, как правило, из соображений минимума аппаратных затрат ограничиваются однопараметрической адаптацией с фиксированной зоной погрешности (апертурой). При этом апертура выбирается равной значению погрешности квантования Δ_{KB} или единице младшего разряда кода результата измерения каждого из параметров.

Пример реализации такого автономного *CTD*-измерителя на уровне его структурной схемы показан на рис. 3.8. В его состав входят три датчика D_T, D_R, D_P соответственно температуры, электрической проводимости и давления, три аналого-цифровых преобразователя $AЦП_T, AЦП_R, AЦП_P$, три регистра RG_T, RG_R, RG_P текущего значения соответствующего параметра, три компаратора кодов KK_T, KK_R, KK_P , таймер T , счетчик CT номера N_i измерения, блок памяти $OЗУ$, формирователь выборок памяти F_{CS} , элементы «ИЛИ 1, 2, 3, 4».

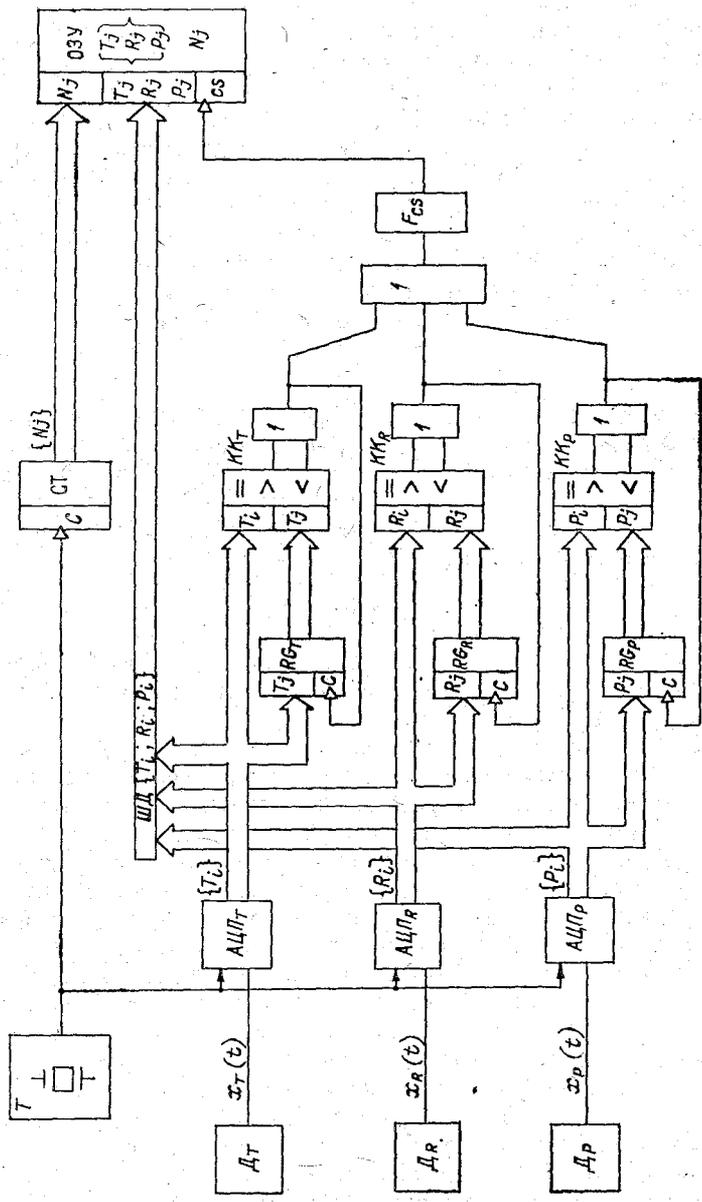


Рис. 3.8. Структурная схема STD-измерителя с адаптивной дискретизацией.

Данное устройство работает следующим образом. Через равноотстоящие отрезки времени t_0 таймер T дает команду на одновременное срабатывание всех трех аналого-цифровых преобразователей АЦП_T, АЦП_R, АЦП_P. Они осуществляют преобразование непрерывных сигналов $x_T(t)$, $x_R(t)$, $x_P(t)$, поступающих от датчиков D_T , D_R , D_P и несущих информацию соответственно о температуре, электрической проводимости и давлении, в набор дискретных кодовых значений $\{T_i\}$, $\{R_i\}$, $\{P_i\}_{i=1, 2, 3, \dots, n}$, т. е. при этом по каждой команде от таймера за один цикл измеряются по одному значения T_i , R_i , P_i указанных гидрофизических величин. В течение каждого такого цикла измерения полученные мгновенные значения T_i , R_i , P_i поступают по шине данных (ШД) на информационные входы блока памяти соответствующих регистров и компараторов. Текущий номер очередного цикла измерения подсчитывается счетчиком номера. В том случае если вновь поступившие коды T_i , R_i , P_i отличаются хотя бы на единицу младшего разряда от ранее записанных в эти регистры, то на одном из выходов соответствующего компаратора будет сформирован сигнал логической «1». Тем самым обеспечивается сравнение вновь измеренных значений температуры, электрической проводимости и давления с ранее записанными T_j , R_j , P_j в блок памяти ОЗУ и определение их разницы. Согласно алгоритму работы данного адаптивного СИ и выбранной апертуре, равной Δ_{KB} , при выполнении любого из неравенств:

$$|T_j - T_i| > \Delta_{KB}; \quad |R_j - R_i| > \Delta_{KB}; \quad |P_j - P_i| > \Delta_{KB}$$

в блок памяти должны быть занесены новые значения T_{j+1} ; R_{j+1} ; P_{j+1} измеренных CTD -параметров. Об этом будет свидетельствовать сигнал «1» на любом из выходов компараторов кодов. По этому сигналу срабатывает формирователь выборки F_{CS} , в результате чего в блок памяти записываются новые значения T_{j+1} , R_{j+1} , P_{j+1} и номер N_{j+1} цикла измерения. Тот из компараторов, который в этом цикле измерения зафиксировал выход текущего значения измеряемого параметра за границы зоны погрешности этим же сигналом логической «1» с выхода своего элемента «ИЛИ» произведет запись нового значения кода в соответствующий регистр RG_T , RG_R или RG_P .

Таким образом, за интервал времени $[0, t_n]$ в блок памяти будет записано l значений CTD -параметров и номеров N_{j+1} циклов измерений. Следовательно, в таком адаптивном CTD -измерителе полный набор исходных значений измеряемых величин $\{a_i\} = \{T_i\} + \{R_i\} + \{P_i\}$ преобразуется в сокращенный набор дискретных значений этих величин $\{b_j\} = \{T_j\} + \{R_j\} + \{P_j\} + \{N_j\}$. Если их кодирование производится кодами одной разрядностью, то на основании формулы (3.19) коэффициент сжатия информации в таком измерителе определится как:

$$k_1 = 3n/4l. \quad (3.21)$$

Из этой формулы видно, что применительно к CTD -системам адаптивное сжатие информации будет эффективно при $l < 3n/4$.

При необходимости апертура такого устройства может быть увеличена. Для этого сравнение занесенных в память и текущих значений кодов, несущих информацию об измеряемых величинах, должно производиться на компараторах по уменьшенному числу разрядов. В случае двоичной системы кодирования исключение из сравнения каждого очередного младшего разряда будет расширять зону погрешности вдвое. Тогда выше вероятность повышения эффективности применения такой адаптивной временной дискретизации.

В настоящее время подобные технические решения еще мало применяются в практике проектирования океанографических приборов. Однако по мере развития микроэлектронной и микропроцессорной элементной базы изложенные принципы построения должны будут найти широкое применение при построении автономных океанографических СИ.

Другим путем снижения избыточности океанографической информации является осреднение во времени результатов получаемых измерений с занесением в блок память уже осредненных данных. Это представляет собой уже необратимое сжатие исходной информации. Такому сжатию подвергаются текущие значения следующих величин: скорость и направление течения, гидростатическое давление или уровень моря, температура и соленость морской воды *in situ*, амплитуда, период и длина поверхностных волн.

В автономных СИ перечисленных океанографических величин в основном ограничиваются получением данных об оценке математического ожидания $M[x(t, r_i)]$ измеряемой величины $x(t, r_i)$ в интервале времени $[0, t_0]$ от одного момента занесения данных в память до другого, которое принимается за ее среднее значение \bar{x} . В соответствии с этим данную операцию сжатия информации применительно к рассматриваемым СИ можно представить в виде

$$\bar{x}[0, t_0, r_i] = M[x(t, r_i)] = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} x(t, r_i) dt. \quad (3.22)$$

Исходя из задач измерительного эксперимента выбирается длина интервала осреднения t_0 . Поскольку автономные СИ нацелены на получение данных о синоптических и мезомасштабных явлениях в океане, то в их конструкцию закладывают величину t_0 , лежащую в пределах от нескольких минут до 1 ч. Это дает возможность без потерь конечной точности результатов натурального эксперимента отфильтровать высокочастотные составляющие изменений измеряемых величин.

Таким образом, обобщенная структурная схема автономного СИ океанографических величин имеет вид, представленный на рис. 3.9. В его состав входит набор датчиков D_1, D_2, \dots, D_n измеряемых величин, набор аналого-цифровых или других измерительных преобразователей АЦП₁, АЦП₂, ..., АЦП_n сигналов с дат-

чиков, блок сжатия исходной информации ΣI , блок памяти ОЗУ, таймер T , счетчик $СТ$ N номера цикла измерения. Такое устройство через равностоящие интервалы времени t_0 по команде с таймера производит измерение сигналов с датчиков, преобразует их в цифровую форму с помощью набора и передает по шине данных (ШД) в блок сжатия информации. Этот блок производит по заданному алгоритму исключение избыточности полученной исходной информации I_i и в сжатом виде I_j подает на вход блока памяти ОЗУ, где он запоминается и хранится в течение всего вре-

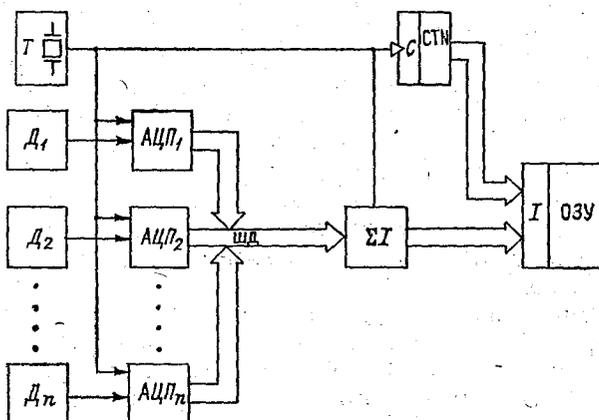


Рис. 3.9. Структурная схема автономного СИ гидрофизических величин.

мени наблюдения. В процессе выполнения автономных измерений счетчик номера осуществляет подсчет числа команд, поступивших от таймера. Таким образом, в нем непрерывно регистрируется номер выполняемого измерения, который также записывается в блок памяти ОЗУ.

При таком устройстве СИ алгоритм работы блока сжатия может быть различным и определяется целиком задачами измерений. Данный блок может производить как адаптивную дискретизацию измеряемых величин, так и их временное осреднение.

Значение такой океанографической величины, как соленость $S(t, g_i)$ морской воды *in situ*, представляющее собой функцию нескольких величин: температуры T , электрической проводимости R и давления P *in situ*, предварительно рассчитывается в каждый текущий момент времени $S(t) = F_s(T, R, P, t, g_i)$. Затем уже полученные в результате косвенных измерений данные о солености поступают в блок сжатия информации, где она осредняется согласно алгоритму (3.22).

Особое место в вопросах сжатия информации занимают измерения скорости течения, поскольку движение масс воды в океане представляет собой многомерный векторный процесс. В соответ-

ствии с этим методы измерения и осреднения скорости течения рассмотрены отдельно, в п. 3.5.

3.5. Методы и средства измерения скорости течения

Для наблюдения за течениями в океанографии наиболее широкое распространение нашли автономные позиционные СИ скорости и направления течения (измерители течения), устанавливаемые на заданных горизонтах автономных буйковых станций. В этих приборах в силу ограниченности емкости блока памяти нет возможности хранить все данные о течении, получаемые при непрерывном режиме измерения, поэтому в них производят средние значения значений скорости за фиксированный интервал времени t_0 . Тем самым реализуется операция необратимого сжатия исходной информации о течении с одновременной фильтрацией высокочастотных составляющих колебаний скорости.

В физике под течением понимают перемещение масс воды [70], которое в океане в основном описывается вектором в одной из плоскостей, параллельной условным границам воздух—вода, вода—дно. Исходя из этого скорость океанического течения также следует рассматривать как векторную величину $\mathbf{V}(t)$, являющуюся функцией времени t . В полярной системе координат в фиксированный момент времени она однозначно характеризуется модулем $|\mathbf{V}| = V$ и аргументом α этого вектора, которые согласно определениям, принятым в океанографии, соответствуют скорости и направлению течения. Поэтому в измерителях течения операция сжатия информации путем временного осреднения исходных данных за время t_0 , заданная в общем виде (3.22) описывается как

$$\bar{\mathbf{V}} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \mathbf{V}(t) dt \quad (3.23)$$

или применительно к меридиональной $V_M(t)$ и широтной $V_{Ш}(t)$ проекциям вектора скорости $\mathbf{V}(t)$ на ортогональные оси ou и ov географической системы координат uov может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{V}_M &= \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} V_M(t) dt; \\ \bar{V}_{Ш} &= \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} V_{Ш}(t) dt, \end{aligned} \quad (3.24)$$

где \bar{V}_M , $\bar{V}_{Ш}$ — соответственно меридиональная и широтная составляющие среднего вектора \mathbf{V} скорости течения.

Однако далеко не во всех измерителях течения осуществляется осреднение скорости или это осреднение выполняется без учета

векторного характера измеряемой величины. В результате в таких СИ возникают методические погрешности. По условиям и характеру проявления этих погрешностей все известные модели измерителей течения могут быть разделены на три группы.

Приборы первой группы, такие как БПВ, ЭСТ и ДИСК, производят раздельное скалярное осреднение модуля $V(t)$ и аргумента $\alpha(t)$ вектора $V(t)$ за время экспозиции t_0 , существенно

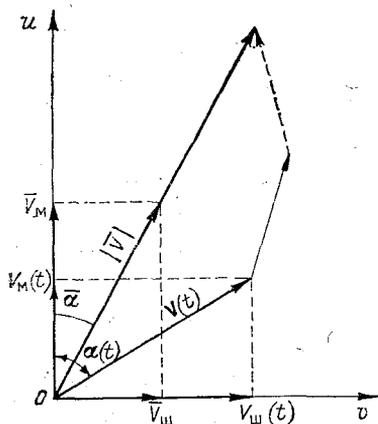


Рис. 3.10. Осреднение вектора $V(t)$ скорости течения.

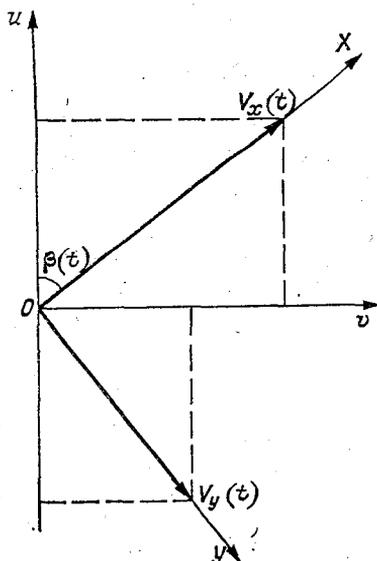


Рис. 3.11. Измерение скорости течения двухкомпонентным датчиком.

меньшее, чем дискретность t_0 измерения [68, 89]. Таким образом, получают в них модуль и аргумент фактически мгновенного значения этого вектора V_0 в момент времени экспозиции.

Ко второй группе относятся измерители течения типа «Поток», модели 135 и 135-М фирмы «Интероушен», РСМ-4,5. Они также раздельно скалярным образом осредняют скорость и направление течения, но время осреднения модуля равно интервалу дискретности t_0 , а время осреднения направления намного меньше.

Поэтому в таких СИ фактически получают средний модуль \bar{V} скорости путем интегрирования текущего значения модуля $V(t)$ за интервал времени t_0 и мгновенное значение направления α_0 течения, соответствующее концу этого временного интервала. Для определения условий возникновения и оценки методических погрешностей представим текущие значения проекций $V_M(t)$ и $V_{ш}(t)$ через значения модуля $V(t)$ и аргумента $\alpha(t)$ согласно геометрическим построениям рис. 3.10:

$$V_M(t) = V(t) \cos \alpha(t); \quad V_{ш}(t) = V(t) \sin \alpha(t). \quad (3.25)$$

Тогда модуль $|\bar{V}|$ и аргумент $\bar{\alpha}$ искомого среднего вектора скорости \bar{V} определяются исходя из формул (3.24) и (3.25) как

$$|\bar{V}| = \sqrt{\bar{V}_m^2 + \bar{V}_n^2} =$$

$$= \frac{1}{t_0} \sqrt{\left[\int_0^{t_0} V(t) \sin \alpha(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^{t_0} V(t) \cos \alpha(t) dt \right]^2};$$

$$\bar{\alpha} = \arctg(\bar{V}_m/\bar{V}_n) = \arctg \left[\int_0^{t_0} V(t) \sin \alpha(t) dt / \int_0^{t_0} V(t) \cos \alpha(t) dt \right]. \quad (3.26)$$

Значит методические погрешности Δ_V и Δ_α в измерении соответственно модуля и аргумента среднего вектора \bar{V} , связанные с осреднением скорости течения без учета векторного характера этой величины, в СИ, отнесенных к данной группе, могут быть представлены как:

$$\Delta_V = \bar{V} - |\bar{V}| =$$

$$= \frac{1}{t_0} \left\{ \int_0^{t_0} V(t) dt - \sqrt{\left[\int_0^{t_0} V(t) \sin \alpha(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^{t_0} V(t) \cos \alpha(t) dt \right]^2} \right\};$$

$$\Delta_\alpha = \alpha_0 - \bar{\alpha} = \alpha_0 - \arctg \left[\int_0^{t_0} V(t) \sin \alpha(t) dt / \int_0^{t_0} V(t) \cos \alpha(t) dt \right]. \quad (3.27)$$

Отсюда видно, что рассматриваемые методические погрешности находятся в прямой зависимости от изменчивости скорости течения по направлению $\alpha(t)$ за время t_0 . Только при постоянном направлении течения $\alpha(t) = \alpha_0$ эти методические погрешности будут отсутствовать. Это находит свое подтверждение в многочисленных экспериментальных исследованиях [41, 46, 47, 102]. Согласно данным этих исследований, погрешности измерения скорости и направления могут достигать в натуральных условиях соответственно $\pm(40-50)\%$ и $\pm(40-60)^\circ$ при установке вышеречисленных приборов на автономные заякоренные буйковые станции с надводным бумом.

К измерителям третьей группы относятся приборы типа АЦИТ с двухкомпонентным датчиком скорости потока, в которых производится осреднение скорости течения в ортогональной, но подвижной системе координат XOY . Положение этой системы относительно географической uOv определяется углом ориентации $\beta(t)$, расположенном между осями Ou и OX . Данный угол β_0 измеряется в приборах в конце интервала времени t_0 интегрирования вектора скорости по двум ортогональным компонентам $V_x(t)$ и $V_y(t)$, принадлежащим соответственно осям OX и OY

(рис. 3.11). Таким образом, в измерителях этого типа получают и регистрируют средние значения компонентов скорости \bar{V}_x , \bar{V}_y и мгновенного — угла ориентации β_0 , по которым судят о среднем векторе скорости течения следующим образом:

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2} = \\ = \frac{1}{t_0} \sqrt{\left[\int_0^{t_0} V_x(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^{t_0} V_y(t) dt \right]^2};$$

$$\bar{\alpha} = \arctg(\bar{V}_y/\bar{V}_x) + \beta_0 = \arctg \left[\int_0^{t_0} V_y(t) dt / \int_0^{t_0} V_x(t) dt \right] + \beta_0. \quad (3.28)$$

Выразив $V_M(t)$ и $V_{ш}(t)$ через $V_x(t)$, $V_y(t)$ и $\beta(t)$ с учетом рис. 3.11, получим

$$V_M(t) = V_x(t) \cos \beta(t) - V_y(t) \sin \beta(t); \\ V_{ш}(t) = V_x(t) \sin \beta(t) + V_y(t) \cos \beta(t). \quad (3.29)$$

Тогда по аналогии с выражением (3.27) значения погрешностей Δ_V и Δ_α определяются как:

$$\Delta_V = \frac{1}{t_0} \left\{ \sqrt{\left[\int_0^{t_0} V_{x_s}(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^{t_0} V_y(t) dt \right]^2} - \right. \\ \left. - \sqrt{\left[\int_0^{t_0} V_M(t) dt \right]^2 + \left[\int_0^{t_0} V_{ш}(t) dt \right]^2} \right\}; \\ \Delta_\alpha = \arctg \left[\int_0^{t_0} V_y(t) dt / \int_0^{t_0} V_{x_s}(t) dt \right] + \beta_0 - \\ - \arctg \left[\int_0^{t_0} V_{ш}(t) dt / \int_0^{t_0} V_M(t) dt \right].$$

Анализ полученных выражений для оценки погрешностей Δ_V и Δ_α приборов с двухкомпонентными датчиками скорости потока и формул (3.29) показывает, что эти погрешности, связанные с отсутствием векторного осреднения, имеют место только при изменении ориентации датчика скорости потока. Причем значение Δ_V и Δ_α тем больше, чем выше изменчивость угла $\beta(t)$ ориентации корпуса прибора. Как показывают результаты экспериментальных исследований, в реальных условиях эксплуатации на буйковых станциях они достигают $\pm (20-30)\%$ измеряемого модуля и до $\pm (30-40)^\circ$ в направлении течения [25].

С целью исключения указанных методических погрешностей Δ_V и Δ_α , связанных с некорректным осреднением скорости тече-

ния, не учитывающим векторный характер этой измеряемой величины, в последние годы появились векторно-осредняющие измерители течения. К ним относятся отечественные приборы АЦИТ-У-01, «Поток-2М», ЦИИТ, «Вектор» и зарубежные VMCM, SLS-11, RCM-7, -8 и АСМ-2.

Аппаратурная реализация сжатия информации о течении путем векторного осреднения в рамках всех известных вышеперечисленных автономных измерителей основывается на независимом скалярном осреднении текущих значений ортогональных проекций $V_{ш}(t)$ и $V_{м}(t)$ вектора скорости $V(t)$ на оси Ou и Ov географической системы координат uOv согласно выражениям (3.24). С учетом формул (3.25) последние соотношения могут быть представлены в виде

$$\bar{V}_m = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} V(t) \cos \alpha(t) dt; \quad \bar{V}_{ш} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} V(t) \sin \alpha(t) dt. \quad (3.30)$$

Техническая реализация операций векторного осреднения скорости в измерителях течения осуществляется с помощью встроенных цифровых схем обработки сигналов, поступающих с датчика скорости потока и магнитного компаса. В зависимости от физических принципов, на которых работают эти первичные преобразователи, различаются и алгоритмы функционирования схем обработки.

Математические выражения для искомых алгоритмов вытекают из соотношений (3.24) и (3.30) при их записи в виде суммы мгновенных значений проекций V_{m_i} и $V_{ш_i}$ или модуля $|V_i|$ и аргумента α_i , отнесенных к длине шага дискретизации Δt , во время которого скорости и направление течения могут считаться практически неизменными. Тогда выражения (3.24), (3.30) можно представить как:

$$\bar{V}_m = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^n V_{m_i} \Delta t; \quad \bar{V}_{ш} = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^n V_{ш_i} \Delta t; \quad (3.31)$$

$$\bar{V}_m = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^n |V_i| \cos \alpha_i \Delta t; \quad \bar{V}_{ш} = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^n |V_i| \sin \alpha_i \Delta t, \quad (3.32)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ — число шагов дискретизации, условно разделяющих интервал времени t_0 на промежутки Δt .

В основу аппаратурной реализации данного алгоритма в приборах с вертушечными датчиками положена операция фиксирования единичных отрезков пути s_0 , пройденных течением воды. В момент фиксирования такого отрезка пути в этих средствах измерения производится определение направления течения, расчет мгновенных значений проекций единичных отрезков пути на географические оси Ov , Ou и их суммирование за интервал времени t_0 .

В отношении пропеллерных датчиков установлена однозначная связь между частотой вращения пропеллеров f_i и скоростью набегающего потока V_i вида (2.23): $V_i = k_V f_i$. В свою очередь единичный отрезок пути $s_0 = |V_i| \Delta t_i$, а частота $f_i = \xi_i / \Delta t_i$. При этом модуль течения $|V_i|$ можно считать эквивалентным скорости потока V_i , где Δt_i — интервал времени, за который вода проходит единичный отрезок пути s_0 и фиксируется частота f_i . Поэтому между s_0 и k_V существует однозначная связь через угол ξ_i , на который поворачивается пропеллер за интервал времени Δt_i , в виде:

$$s_0 = V_i \Delta t_i = k_V f_i \Delta t_i = k_V \xi_i.$$

Поскольку единичный отрезок пути s_0 , проходимый водой мимо датчика, представляет собой постоянную величину, то и вертушка при этом поворачивается на постоянный угол ξ_0 , т. е.

$$s_0 = |V_i| \Delta t_i = k_V \xi_0, \quad (3.33)$$

Отсюда следует, что из соотношений (3.32) вытекает следующий алгоритм работы схемы векторного осреднения измерителей течения с однокомпонентным вертушечным датчиком скорости:

$$\bar{V}_M = \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i; \quad \bar{V}_M = \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i, \quad (3.34)$$

где n — число поворотов вертушки датчика скорости потока на угол ξ_0 за интервал времени осреднения t_0 .

По такому алгоритму функционируют измерители течения типа ВАСМ, «Поток-2М», ЦИИТ. В тех приборах, в которых направление течения определяется непосредственно по ориентации их корпуса в системе географических координат значение угла α_i эквивалентно значению компасного β_i в данный момент времени. Если прибор включается в разрыв троса и ориентация его корпуса в общем случае не зависит от направления движения воды, а угол φ_i направления течения относительно приборной системы координат определяется с помощью специальной флюгарки, ориентируемой в потоке воды, например как в измерителе SLS-11, то в них используется несколько видоизмененный алгоритм обработки сигналов с первичных преобразователей. Этот алгоритм имеет следующий вид:

$$\bar{V}_M = \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \sum_{i=1}^n \cos (\varphi_i + \beta_i); \quad \bar{V}_M = \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \sum_{i=1}^n \sin (\varphi_i + \beta_i), \quad (3.35)$$

где β_i — значение компасного угла в момент поворота вертушки на угол ξ_0 ; φ_i — значение угла ориентации флюгарки относительно приборной системы координат.

В приборах с двухкомпонентными пропеллерными датчиками скорости потока и магнитным компасом типа АЦИТ-У-01 и VMСМ (США) реализован несколько иной алгоритм обработки сигналов с указанных первичных преобразователей [25, 13, 151]. Он полу-

чен из соотношений (3.31) с учетом (3.33) и (3.29) при условии выполнения разложения текущего значения вектора скорости течения на ортогональные проекции вдоль географических координат после прохождения потоком воды единичного отрезка пути, но только вдоль оси вращения каждого из пропеллеров, входящих в датчик скорости потока. Тогда алгоритм обработки сигналов с первичных преобразователей этих приборов имеет вид:

$$\begin{aligned}\bar{V}_M &= \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \left(\sum_{i=1}^{n_x} \cos \beta_i \operatorname{sign} i - \sum_{j=1}^{n_y} \sin \beta_j \operatorname{sign} j \right); \\ \bar{V}_Ш &= \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \left(\sum_{i=1}^{n_x} \sin \beta_i \operatorname{sign} i + \sum_{j=1}^{n_y} \cos \beta_j \operatorname{sign} j \right),\end{aligned}\quad (3.36)$$

где β_i, β_j — значения компасного угла в момент совершения соответственно пропеллером OX, OY полного оборота на угол ξ_0 ; $\operatorname{sign} i, \operatorname{sign} j$ — знак направления вращения соответственно пропеллеров OX, OY двухкомпонентного датчика скорости потока; n_x, n_y — полное число оборотов соответственно пропеллеров OX, OY за интервал времени t_0 .

Аппаратурная реализация алгоритма (3.36) может быть выполнена с помощью цифровых интегральных микросхем (как в АЦИТе-У-01) или с помощью встроенного в автономный прибор микропроцессора. Функциональная схема устройства, работающего по данному алгоритму и выполненному на отдельных микросхемах средней степени (рис. 3.12), подробно описана в работе [7]. В состав такого устройства, образующего векторный измеритель течения, входят: двухкомпонентный пропеллерный датчик скорости потока D_V , магнитный компас, две схемы определения знака направления вращения пропеллеров, синусно-косинусный преобразователь \sin/\cos , коммутатор и два счетчика-накопителя $СТV_M$ и $СТV_Ш$ соответственно меридиональной и широтной проекций V_M и $V_Ш$ среднего вектора скорости течения. Предполагается, что осреднение скорости течения в данном устройстве осуществляется в течение всего интервала времени t_0 между моментами времени запоминания цифровых кодов, накопленных в счетчиках $СТV_M$ и $СТV_Ш$. Поэтому работа такого измерителя фактически начинается сразу после помещения его в поток воды.

В результате под действием течения воды оба или один пропеллер датчика D_V совершают непрерывное вращение. После совершения любым из них полного поворота на заданный угол ξ_0 это фиксируется соответствующим преобразователем, например герконного типа (см. п. 3.2). Одновременно соответствующая схема ($\operatorname{sign} i$ или $\operatorname{sign} j$) определения направления вращения пропеллера фиксирует знак этого вращения и через элемент «ИЛИ» запускает в работу магнитный компас. На выходе компаса вырабатывается сигнал, который несет информацию о значении компасного угла β_i или β_j в момент окончания поворота пропеллеров

или на угол ξ_0 . Далее сигнал с компаса поступает на синусно-косинусный преобразователь, который фиксирует сигнал, несущий информацию о $\sin \beta_{i(j)}$ и $\cos \beta_{i(j)}$ измеренного компасного угла. Этот сигнал задан в виде двух серий электрических импульсов, число которых в одной из них пропорционально синусу, а в другой — косинусу угла β_i или β_j . Коммутатор служит для распределения полученных серий импульсов по входам счетчиков $CTV_{ш}$ и $CTV_{м}$ в соответствии с алгоритмом векторного осреднения, заданных уравнениями (3.36).

В измерителях течения типа АСМ-2 фирмы NBIS (США), в которых в качестве первичных преобразователей используется двухкомпонентный магнитный компас типа «flux gate» и двухкомпонентный акустический датчик скорости, применен иной алгоритм векторного осреднения. Этот алгоритм предполагает фиксирование с постоянным шагом дискретности Δt значения проекций $V_{ми}$ и $V_{шi}$ мгновенного значения вектора V_i скорости течения. Данные приборы в своей схеме обработки сигналов с первичных преобразователей реализует следующий алгоритм:

$$\begin{aligned} \bar{V}_м &= \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n H_{x_i} \theta_{x_i} - \sum_{i=1}^n H_{y_i} \theta_{y_i} \right); \\ \bar{V}_ш &= \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n H_{y_i} \theta_{x_i} + \sum_{i=1}^n H_{x_i} \theta_{y_i} \right), \end{aligned} \quad (3.37)$$

где H_{x_i} , H_{y_i} — мгновенные значения двух ортогональных горизонтальных компонентов локального геомагнитного H_i поля, соответствующие осям OX и OY приборной системы координат;

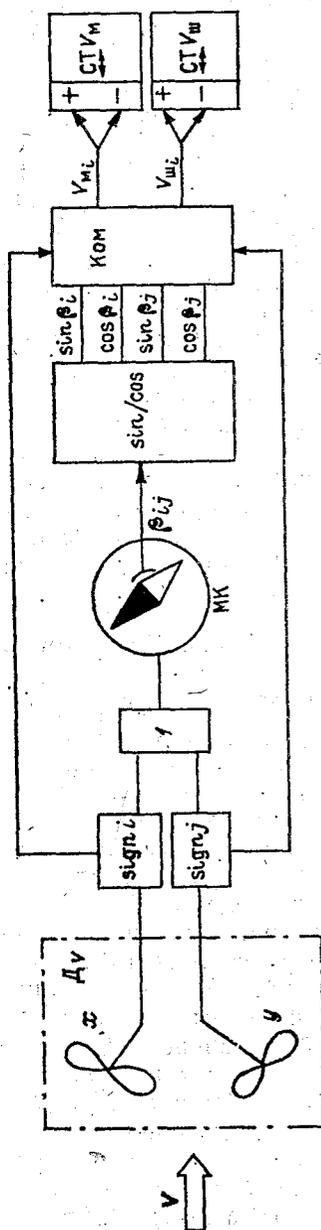


Рис. 3.12. Структурная схема векторного измерителя течения с двухкомпонентным датчиком скорости.

θ_{x_i} , θ_{y_i} — мгновенные значения фазовых сдвигов акустических сигналов, характеризующих собой скорость движения воды соответственно вдоль осей OX и OY приборной системы координат.

Как показала практика эксплуатации и проведения сравнительных наблюдений векторно-осредняющих измерителей течения вышеописанных типов, результаты их измерений на буйковых станциях практически оказываются сопоставимы друг с другом. Расхождения в их показаниях, как правило, не превышают по скорости $\pm(5-10)\%$ и по направлению $\pm(5-10)^\circ$, что соответствует уровню инструментальных погрешностей самих первичных преобразователей, примененных в этих средствах измерения [25, 120, 143, 146]. В определенном ряде случаев также наблюдалось получение сопоставимого материала наблюдений, полученного с помощью измерителей со скалярным и векторным алгоритмом осреднения. Однако это, как правило, имело место при условии притопленной буйковой станции на глубинных горизонтах, где практически отсутствовали динамические нагрузки на трос от несущего буйа и изменчивость течения по направлению.

Бесспорно, наиболее перспективным направлением применения автономных измерителей течения следует считать приборы со встроенными блоками векторного осреднения, позволяющие существенно расширить область их применения, а также качество и достоверность материала наблюдений.

3.6. Методы и средства измерения волнения

Известен целый ряд методов измерения поверхностного волнения открытых водоемов. Обычно определению подлежат следующие элементы волнения: средняя и максимальная высота волны, средний период волнения и длина волны. Однако для выполнения измерений этих элементов на автономных буйковых станциях с помощью автоматических приборов подходит ограниченное число методов. В качестве таких приборов могут быть названы акселерометрические буйковые волнографы открытого моря, волнографы, работающие на принципе обратного акустического эхолота и волнографы гидростатического типа.

Наиболее универсальным является акселерометрический волнограф, в котором элементы волнения определяются путем измерения и двойного интегрирования информации о движении буйа на открытой взволнованной поверхности. Подобные конструкции приборов были созданы в СССР и за рубежом, однако срок их живучести ограничен, особенно в районах замерзающих морей, покрытых льдом. К наилучшим моделям зарубежных волнографов с датчиками акселерометрического типа могут быть отнесены «Вейврайдер» фирмы «Датавел» (Нидерланды) [138], «Вейвтрэк» фирмы «Эндеко» (США) [153], «Вейвкрест буй» Национального морского института и фирмы «НБА Контролс ЛДТ» (Великобритания) с двумя буйами: несущим и волноизмерительным, связан-

ными кабель-тросом. Подобный автономный волнограф был разработан в ГОИНе с акселерометрическим датчиком в виде механической маятниковой системы с электролитическим потенциометром для преобразования углового перемещения маятника в электрический сигнал [37].

Главным ограничением на их применение является их низкая надежность работы в результате разрушающего действия поверхностного волнения и ледового покрова в замерзающих морях.

Для автоматического измерения элементов волнения также находят свое применение средства измерения, принцип работы которых основан на методах акустической эхолокации [69]. Прямые акустические измерения мгновенных значений высоты возвышения водной поверхности при зондировании со свободноплавающего заякорного буя не могут производиться при наличии льда в районе наблюдений. Волнографы, принцип действия которых основан на обратной эхолокации, как правило, не обеспечивают приемлемой 10 %-ной погрешности за счет не строго вертикального распространения отраженного от поверхности акустического сигнала. В равной степени аналогичный недостаток присущ и прямым эхолотам в связи с наличием боковых лепестков в диаграмме направленности их приемо-передающих антенн.

В соответствии с этим для автоматических измерений элементов волнения наилучшим образом подходят волнографы гидростатического типа. Их принцип действия основан на зависимости естественных колебаний гидростатического давления на некоторой глубине от волнения на поверхности.

Из теории известно, что волнение моря носит статистический характер и при постоянных внешних условиях характеризуется постоянством вероятностного распределения высот H , периодов T_b и длин волн λ независимо от интенсивности и стадии развития, описываемого законом Рэлея [36]. Из этого следует, что для описания процесса волнения как природного явления не требуется некое детальное воспроизведение геометрической формы поверхностной зоны на основе зарегистрированной реализации процесса колебаний давления на фиксированной глубине. Наблюдаемые средние значения высоты и периода поверхностной волны являются однозначной характеристикой волнения и позволяют на основе известного закона распределения вычислить процентное соотношение амплитуд и периодов всех спектральных составляющих и тем самым определить энергетический спектр волн.

Затухание отдельных спектральных составляющих волны зависит от их периода, поэтому по мере заглубления датчика высокочастотные составляющие исчезают из анализа, вследствие чего средний период зарегистрированных суммарных колебаний значительно возрастает. Однако коэффициенты пересчета средних значений амплитуды и периода колебаний давления и соответствующие им значения высоты и периода поверхностного волнения остаются постоянными для заданных глубин моря h (уровня) и заглубления z датчика давления. Это следует из постоянства ве-

ростности распределения характеристик случайного стационарного процесса.

Экспериментально было установлено [36], что коэффициент затухания γ волнового давления с глубиной для короткопериодных волн и глубокого моря довольно точно описывается соотношением вида

$$\gamma = \exp[-5,5(z/\lambda)^{0,8}]. \quad (3.38)$$

Для мелководной прибрежной зоны с учетом влияния дна значение этого коэффициента более точно определяется уже другим выражением

$$\gamma = \left[\operatorname{ch} \frac{2\pi}{\lambda} (h - z) \right] / \left(\operatorname{ch} \frac{2\pi}{\lambda} h \right) \exp[2\pi z - 5,5(z/\lambda)^{0,8}]. \quad (3.39)$$

В подавляющем числе случаев с $\pm 2\%$ -ной погрешностью расчетов коэффициента затухания для глубокого и мелкого моря можно пользоваться единой формулой, полученной из формул (3.38) и (3.39) с учетом $\lambda = g\tau_b^2/2\pi$:

$$\gamma = \exp\{-24[2\pi z/(g\tau_b^2)]^{0,8}\}, \quad (3.40)$$

где g — ускорение свободного падения.

Таким образом, значение коэффициента затухания волнового давления с глубиной может рассматриваться как однозначная функция глубины расположения датчика давления и периода волнения. Результаты экспериментальных исследований [32, 37] показывают, что значения γ лежат в пределах от 0,1 до 0,8 и могут быть рассчитаны по данным измерений z и τ_b в процессе наблюдений за поверхностным волнением. Тогда искомые высоты H_i поверхностных волн однозначно будут связаны с амплитудой максимумов гидростатического давления P_i , зафиксированных на глубине, следующей формулой:

$$H_i = P_i/(\rho g \gamma). \quad (3.41)$$

При этом период волнения будет однозначно определяться интервалом времени между моментами максимумов этого давления. В том случае, если за фиксированный интервал времени t_0 наблюдений за волнением будет зафиксировано определенное число m этих максимумов, то вычисление τ_b выполняется по формуле

$$\tau_b = t_0/(\gamma m), \quad (3.42)$$

где γ — коэффициент пересчета числа волн на поверхности к глубине z , равный 0,5—0,8.

Исходя из этих теоретических положений алгоритм работы устройства для измерения элементов поверхностного волнения по колебаниям гидростатического давления на глубине будет основываться на обработке сигналов с датчика давления по соотношениям, в равной степени применимым к текущим (мгновенным) значениям H_i возвышений (высот волн) водной поверхности (рис. 3.13). Этот алгоритм при измерении средних значений вы-

соты и периода волнения, а также максимальной высоты волны за фиксированный интервал времени в самом общем виде должен включать в себя следующий набор операций.

1. Измерение мгновенных (текущих) значений гидростатического давления P_i .

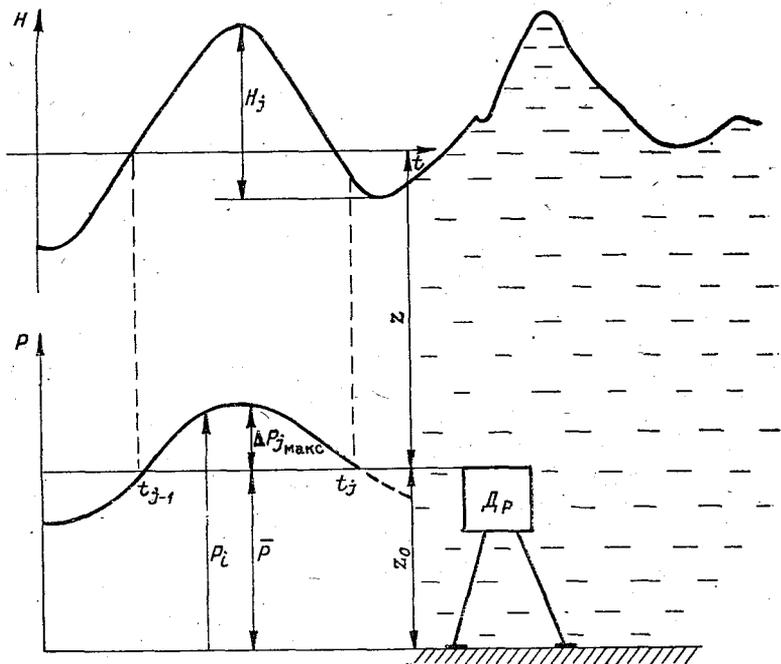


Рис. 3.13. Измерение волнения и уровня датчиком гидростатического давления.

2. Определение по P_i среднего значения гидростатического давления \bar{P} , которое после внесения необходимых поправок на изменения атмосферного давления и плотности воды характеризует заглубление датчика давления.

3. Фиксирование числа превышений m текущих значений гидростатического давления P_i над его средним уровнем. Полученное число m с учетом коэффициента пересчета γ_τ будет однозначно характеризовать собой средний период поверхностного волнения за интервал времени t_0 по формуле (3.42).

4. Вычисление максимума превышения $\Delta P_{i_{\max}}$ давления P_i над его средним уровнем $P_{\text{ср}}$ в пределах интервала времени Δt_j между двумя последовательными моментами времени t_j и t_{j+1} . Указанный интервал времени Δt_j соответствует длительности одной j -й волны, а полученное значение максимума $\Delta P_{i_{\max}}$ с уче-

том коэффициента затухания γ будет характеризовать ее высоту H_j .

5. Осреднение полученных максимумов $\Delta P_{j_{\text{макс}}}$ по числу зафиксированных переходов m за фиксированный интервал времени t_0 . Полученное среднее значение максимумов превышений с учетом коэффициента затухания будет характеризовать собой среднюю высоту волны:

$$\bar{H} = \sum_{j=1}^m \Delta P_{j_{\text{макс}}} / (\sigma \gamma m). \quad (3.43)$$

6. Выбор из всех зафиксированных максимумов $\Delta P_{j_{\text{макс}}}$ наибольшего за весь интервал времени t_0 , который и будет характеризовать собой с учетом коэффициента затухания максимальную высоту волны

$$H_{\text{макс}} = \{\Delta P_{j_{\text{макс}}}\}_{\text{макс}} / (\sigma \gamma). \quad (3.44)$$

Предложенный алгоритм обработки информации о давлении с целью получения значений искомых элементов волнения практически полностью совпадает с принятым порядком обработки аналоговых записей результатов измерений возвышений водной поверхности, используемых для тех же целей и рекомендованных в соответствующих наставлениях [77]. Единственное отличие принципиального характера заключается в том, что за характеристику высоты волны H_j принимается превышение давления $\Delta P_{j_{\text{макс}}}$ над средним уровнем, а не разница между максимальным и минимальным значениями давления, зафиксированными во время j -й волны. Поэтому для перехода от показаний волнографа, работающего по вышеописанному алгоритму, к элементам волнения, определенным согласно действующим наставлениям, в обработку полученных данных вводится поправочный коэффициент. Этот коэффициент определяется экспериментально и зависит от конкретных условий выполнения наблюдений.

Один из вариантов аппаратурной реализации предложенного алгоритма использован в устройстве для измерения средней и максимальной высот волны, а также периода волнения в зафиксированный интервал времени t_0 телеизмерительной океанографической станции типа ДУ-МГ. В состав этого устройства (рис. 3.14) входят следующие элементы: вибростержневой датчик гидростатического давления частотного типа ПДВ D_P ; генератор кварцеванной частоты 164 кГц; счетчик-делитель СТ1 ($S_1=512$); счетчик-делитель СТ2 ($S_2=2^{10}$); схема измерения заглубления z датчика, включающая в себя счетчик CT_z , регистр кода RG_z и компаратор $K_{\Delta P}$; схема измерения высоты волны H , включающая в себя счетчик CT_H , регистр кода RG_H и компаратор $K_{\Delta H}$; схема выделения максимальной высоты волны, включающая в себя регистр $RG_{H_{\text{макс}}}$ и компаратор $K_{H_{\text{макс}}}$; формирователь число-импульсного кода

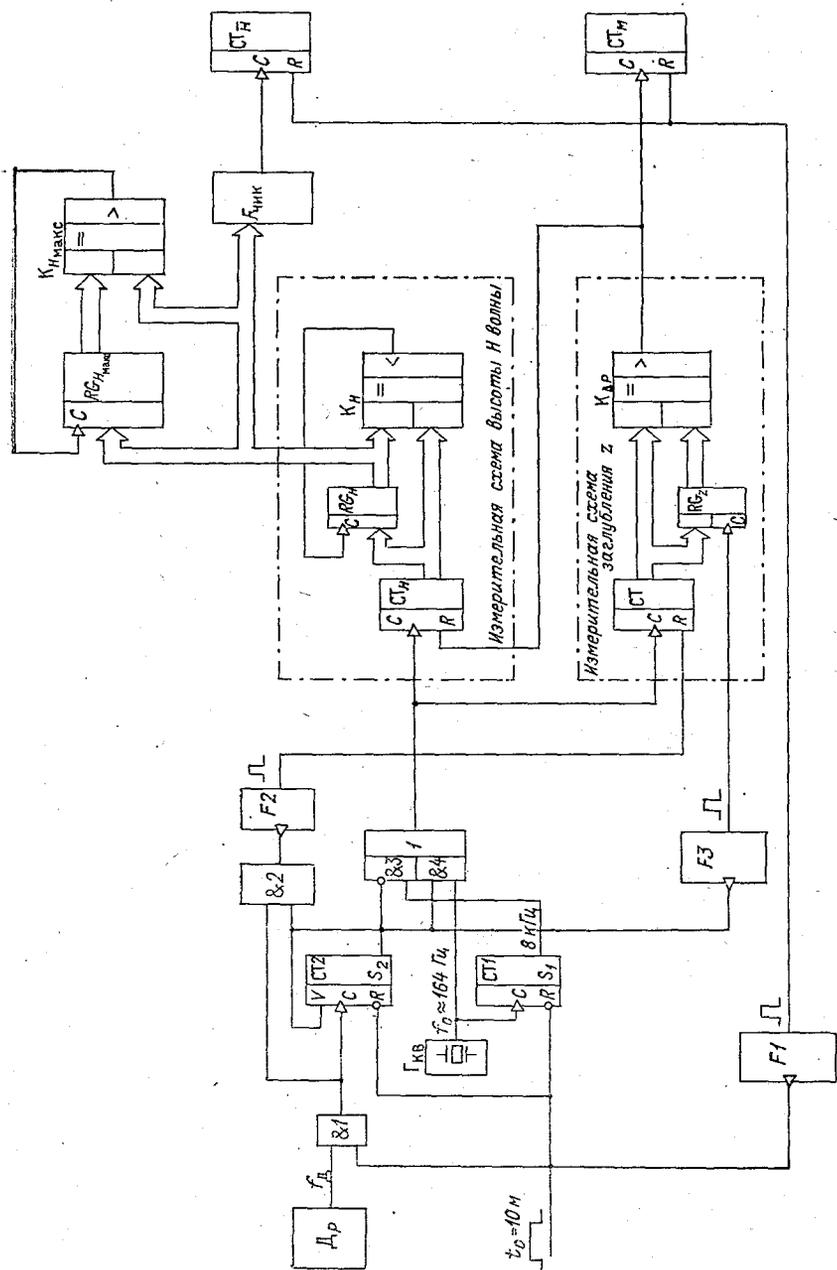


Рис. 3.14. Структурная схема гидростатического волнографа.

$F_{\text{чик}}$; счетчик средней высоты волны $CT_{\bar{H}}$; счетчик числа волн CT_m ; элементы автоматики: ключи &1, &2, &3 и &4, формирова-тели одиночных импульсов $F1, F2, F3$.

Работа рассматриваемого устройства осуществляется в два этапа, общая длительность t_0 .

На первом этапе, после появления сигнала t_0 , производится измерение глубины z расположения датчика давления D_P , одно-значно характеризующей средний уровень h водной поверхности, а на втором этапе выполняется измерение среднего и максималь-ного значения высоты волны и среднего периода по числу зафик-сированных волн. По переднему фронту сигнала срабатывает фор-мирователь $F1$ одиночного импульса, который, действуя по R -вхо-дам, «обнуляет» счетчики и высоты и числа волн.

На первом этапе наличие сигнала t_0 , поступающего на R -входы счетчиков-делителей $CT1$ и $CT2$, разрешает их работу и откры-вает ключ &1, через который сигнал с датчика давления D_P по-ступает на тактовый C -вход счетчика $CT2$. Одновременно сигнал кварцовой частоты f_0 после деления счетчиком $CT1$ поступает через открытый ключ &1 коммутатора K на тактовый C -вход счет-чика CT_z . Ключ &3 остается открытым до тех пор, пока счетчик $CT2$ не заполнится и на его выходе не появится сигнал логической «1», закрывающий ключ &3 и открывающий ключ &4. В резуль-тате после прохождения через ключ &1 заданного числа импульс-ных сигналов с датчика D_P , равного емкости S_2 счетчика-делителя $CT2$, в счетчике CT_z будет накоплен код K_z . Он однозначно связан

со средним значением частоты \bar{f}_0 датчика D_P и, следовательно, со средним значением гидростатического давления в месте его установки следующим соотношением:

$$K_z = f_0 S_2 / (\bar{f}_P S_1). \quad (3.45)$$

Затем полученное значение кода K_z переносится в регистр RG_z , где хранится в течение всего оставшегося интервала времени из-мерения волнения. На этом первый этап работы устройства закан-чивается, а его длительность t_z определится как

$$t_z = S_2 / \bar{f}_P = S_1 K_z / f_0. \quad (3.46)$$

На втором этапе для каждой волны определяются значения высоты H_j . Для этого дискретно с шагом, равным периоду Δt_i следования сигналов с датчика D_P , счетчиком $CT_{\bar{H}}$ измеряется текущее значение ΔP_j превышения давления над его средним зна-чением. Предварительно в начале каждого очередного периода Δt_i счетчик CT_z принудительно сбрасывается по R -входу сигналом с формирователя $F2$. Затем этот счетчик в процессе подсчета ча-стоты f_0 , поступающей через открытый ключ &4 на его тактовый C -вход, непрерывно измеряет текущее значение давления P_j . В конце каждого интервала времени Δt_i в нем оказывается запи-сан код $K_i = f_0 \Delta t_i$, однозначно характеризующий искомую вели-чину P_i . В момент превышения текущего значения кода K_i над

значением K_z , хранимым в регистре RG_z , компаратор $K_{\Delta P}$ выдает на своем выходе «Больше» сигнал логической «1», который по второму входу разрешает работу счетчика CT_H . В результате в этом счетчике периодически к концу каждого интервала Δt_i получают значение кода

$$\Delta K_i = f_0 \Delta t_i - K_z,$$

однозначно характеризующее собой искомое значение превышения давления ΔP_i над его средним уровнем \bar{P} .

Каждое очередное появление сигнала логической «1» на выходе «Больше» компаратора схемы измерения z свидетельствует о переходе волны среднего уровня водной поверхности и подсчитывается счетчиком числа волн. Для выбора из набора текущих значений ΔP_i такого значения ΔP_j , которое характеризует собой высоту волны H_j , служит регистр RG_H и компаратор схемы измерения высоты волны. Данный компаратор выдает на регистр RG_H сигнал на перезапись в него текущего значения ΔP_j давления только в тот момент, когда давление $\Delta P(t)$ в пределах одного j -го возвышения начинает убывать. В итоге в указанный регистр периодически заносится код K_{H_j} , который характеризует собой текущее значение волны H_j . В течение всего второго этапа каждое из выделенных значений кодов с помощью формирователя $F_{\text{чик}}$ преобразуется в число-импульсный код. Этот число-импульсный код, характеризующий высоту H_j , накапливается в течение всего второго этапа, длительность которого составляет $t_0 - t_z$ в счетчике высоты волны CT_H . Одновременно из всех выделенных высот в этом интервале времени с помощью компаратора $K_{H_{\text{макс}}}$ выбирается наибольшая $H_{\text{макс}}$, которая заносится в регистр $RG_{H_{\text{макс}}}$.

При аппаратурной реализации данной схемы параметры входящих в нее элементов, в том числе емкости S_1 и S_2 счетчиков-делителей $CT1$ и $CT2$, кварцованная частота f_0 , выбираются исходя из заданной точности и диапазона измерения высоты волны. В канале измерения элементов волнения телеизмерительной станции типа ДУ-МГ в качестве датчика давления использован вакуумированный вибростержневой преобразователь частотного типа ПДВ-1Б, помещенный в пассивный термостат. Его полный диапазон измерения по глубине составляет 100 м при девиации выходной частоты $f_P = 3 \dots 4$ кГц. При диапазоне измерения высоты волны до 20 м, что требует и соответствующего заглубления датчика $z = 20$ м, для обеспечения 5 %-ной погрешности емкости счетчиков $CT1$ и $CT2$ выбраны соответственно $S_1 = S_2 = 2^9 = 512$, а кварцованная частота $f_0 = 164$ кГц.

Данная схема практически полностью реализует предложенный алгоритм, за исключением того, что для расчета периода волнения τ_b необходимо с учетом формулы (3.46) пользоваться формулой, несколько отличной от (3.42):

$$\tau_b = (t_0 - t_z) / (\gamma_{\tau} m) = (t_0 - S_1 K_z / f_0) / (\gamma_{\tau} m). \quad (3.47)$$

В такой схеме погрешность измерения высоты волны δ_H складывается из погрешности датчика ПДВ-1Б δ_d и погрешности квантования $\delta_{кв}$ измерения текущих значений приращений давления ΔP_j , которая рассчитывается как

$$\delta_{кв} = (f_0 \Delta t_j)^{-1}. \quad (3.48)$$

В соответствии с этим при заданном диапазоне изменения i , следовательно, Δt_j частоту f_0 кварцевого генератора следует выбирать такой, чтобы она обеспечивала $\delta_{кв}$ существенно меньше $\delta_d \simeq \pm 0,01\%$ и не оказывала практического влияния на конечную точность результата измерения высоты волны.

Для получения с помощью описанного устройства информации об уровне по коду K_z определяется среднее значение гидростатического давления в месте расположения датчика, а далее рассчитывается его заглубление z и выполняется привязка результатов измерений к нулевому уровню по следующей формуле:

$$h = (\bar{P} - P_a) / (\rho g) - z_0, \quad (3.49)$$

где z_0 — расстояние от горизонта установки датчика до уровня нуля места наблюдений; P_a — атмосферное давление, приведенное к уровню поверхности воды; величина плотности воды ρ , как правило, уточняется по результатам синхронных измерений ее температуры и электрической проводимости.

3.7. Структурные методы и преобразователи повышения точности измерения

В автономных океанографических СИ для повышения точности измерения используют следующие структурные методы: автокалибровка измерительных каналов; исключение дополнительных систематических погрешностей с известными функциями влияния от неинформативных величин, таких, как, например, температура или напряжение питания; снижение уровня случайных составляющих погрешности; коррекция характеристик измерительных преобразователей.

Специфичной особенностью автономных океанографических средств измерения являются длительные сроки их функционирования без возможности контроля характеристик этих приборов. В соответствии с этим важным условием получения достоверных результатов измерения становится сохранение неизменными их метрологических характеристик. Подобная задача решается правильным выбором метрологически значимых элементов измерительной схемы, сохраняющих постоянными свои характеристики в течение срока автономной работы до 1 года. Наряду с этим практикуется автоматический контроль стабильности этих характеристик, который заключается в автокалибровке измерительных каналов. Данная операция заключается в подключении на вход измерительного тракта известного сигнала x_0 (уставки) с записью

результатов измерений в память автономного средства измерения. Как правило, автокалибровку вводят по тем измерительным каналам, которые требуют наибольших точностей. К таким каналам относятся каналы измерения температуры и электрической проводимости, а также давления при необходимости обеспечения измерений с погрешностью не более $\pm 0,3\%$.

Представим характеристику суммарной погрешности Δ_{Σ} измерительного канала в виде модели

$$\Delta_{\Sigma} = \dot{\Delta}_0 * \Delta(t), \quad (3.50)$$

где $\dot{\Delta}_0$ — случайная составляющая основной погрешности, имеющая условно высокочастотную структуру; $\Delta(t)$ — составляющая погрешности, имеющая относительно низкочастотную структуру и обусловленная временными изменениями метрологически значимых элементов измерительного тракта

Тогда полезный сигнал $y_x(t)$ на выходе измерительного канала с коэффициентом преобразования K при входном воздействии на $x(t)$ на датчик будет представлен как

$$y_x(t) = K [x(t) + \dot{\Delta}_0 * \Delta(t)]. \quad (3.51)$$

В случае подачи на вход рассматриваемого измерительного канала известного сигнала уставки x_0 на его выходе появится вполне определенная реакция y_0 . Причем сразу после поверки данного образца СИ низкочастотная составляющая погрешности $\Delta(t)$ будет отсутствовать, т. е.

$$y_0 = K (x_0 + \dot{\Delta}_0). \quad (3.52)$$

Если через фиксированный интервал времени калибровки t_k вновь на вход этого канала подать сигнал уставки x_0 , то реакция на него по выходу определится как

$$y_0(t_k) = K [x_0 + \dot{\Delta}_0 * \Delta(t)]. \quad (3.53)$$

При сравнении этого результата $y_0(t_k)$ с ранее полученным видно, что их разница $y_0(t_k) - y_0$ целиком обусловлена погрешностью $\Delta_0(t_k)$. Для ее исключения из конечного результата $y_x(t_k)$ измерения входной величины $x(t_k)$ указанную разницу следует вычесть из этого результата. Тогда в скорректированных показаниях $y'_x(t_k)$ данного СИ погрешность $\Delta(t)$, обусловленная временным уходом характеристик канала, будет отсутствовать, а именно:

$$y'_x(t_k) = y_x(t_k) - [y_0(t_k) - y_0] = K [x(t_k) - \dot{\Delta}_0]. \quad (3.54)$$

Однако в реальных конструкциях автономных океанографических СИ такой сквозной метод автокалибровки практически удастся реализовать только в отношении каналов измерения давления и электрической проводимости. Причем периодичность, т. е. интер-

вал времени $[0, t_k]$ автокалибровки, задается не конструктивными особенностями этих СИ, а задачами измерительного эксперимента. Это обусловлено тем, что требуемое значение уставки x_0 , действующей на датчики, может быть задано при нахождении данного прибора на воздухе. Тогда его датчики давления и электрической проводимости воспринимают соответственно нулевые значения гидростатического давления и электрической проводимости, т. е. $x_0 = P_0 = R_0 = 0$. В противном случае при нахождении прибора в воде исключительно сложно *in situ* смоделировать на входе его измерительных каналов с заданной точностью сигналы уставок.

В отношении канала измерения температуры вообще сложно автоматизировать процесс калибровки, поскольку обеспечение режима заданной температуры на датчик требует специальных термостатирующих прибор установок. Здесь, как правило, ограничиваются автокалибровкой только измерительной схемы, но уже с заданной периодичностью Δt_k . В равной степени такой подход при необходимости успешно реализуется в отношении каналов измерения электрической проводимости и давления. Тогда исключению подлежат только та составляющая погрешности $\Delta_{cx}(t)$, которая обусловлена временной нестабильностью работы измерительных схем, а погрешности $\Delta_d(t)$ самих датчиков войдут в случайную составляющую Δ_0 основной погрешности. В этом случае результат измерения на выходе данного прибора может быть представлен как

$$y_x(t) = K_{cx} K_d [x(t) + \Delta_0 * \Delta_d(t)] + K_{cx} \Delta_{cx}(t), \quad (3.55)$$

где K_d , K_{cx} — коэффициенты преобразования соответственно датчиками измерительной схемы.

Тогда после внесения поправки на значение временного ухода характеристик только измерительной схемы скорректированное значение y'_x результата измерения будет выражено как

$$y'_x(t_k) = K [x(t_k) + \Delta_0 * \Delta_d(t_k)]. \quad (3.56)$$

В тех случаях, когда погрешность $\Delta(t)$ имеет монотонный характер изменения, автокалибровка измерительных каналов может производиться 1 раз на несколько циклов измерения. Тогда интервал времени между автокалибровками Δt_k может быть выбран больше дискретности измерения Δt_i . При этом выборе исходят из остаточной неустранимой погрешности $\Delta'(t)$ меньше наперед заданного числа. В этом случае даже после внесения в результат измерения очередной поправки $y_0(t_k) - y_0 = K_{cx} \Delta_{cx}(t_i)$ в показаниях рассматриваемого СИ будет присутствовать некоторая погрешность $K_{cx} \Delta_{cx}(t_i)$, которая накопится в приборе за интервал времени $\Delta t_i(t_{i-1} - t_i)$. Структурная схема устройства, реализующего этот метод автокалибровки, показана на рис. 3.15. В нем измерение входных параметров $x(t)$ осуществляется при положении b переключателя $Пк$, а при его переводе в положение a произво-

дится автокалибровка измерительной схемы. В случае мультипликативного характера погрешности $\Delta_{сх}(t)$ значение уставки x_0 выбирается близкое к концу диапазона измерения x_k , а при аддитивном — близкое к началу этого диапазона. Для этого блок формирования уставок вырабатывает сигнал, эквивалентный по значению $K_{дх_0}$, который в момент калибровки, определяемый таймером, поступает на вход измерительной схемы. Подобная структура СИ

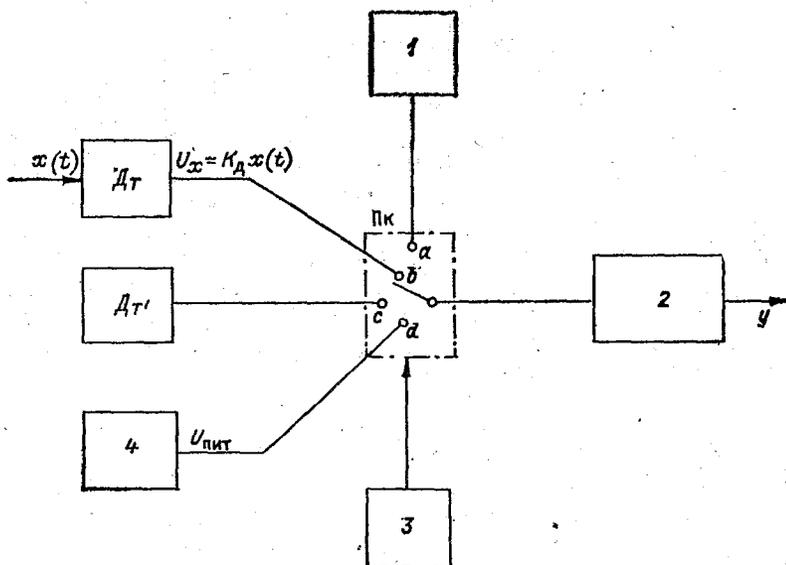


Рис. 3.15. Структурная схема устройства исключения дополнительных погрешностей.

1 — блок формирования уставок; 2 — измерительная схема; 3 — таймер; 4 — блок питания; а, б, в, д — положения переключателя.

может быть использована для исключения дополнительных погрешностей от действия неинформативных параметров, таких, например, как температура T' внутри корпуса прибора или напряжение $U_{пит}$ блока питания. Для этого в момент автокалибровки t_k ко входу измерительной цепи переключатель должен производить подключение датчика $Д_{T'}$ внутренней температуры T' или блока питания. При известных функциях влияния от внутренней температуры $\psi(T')$ и напряжения питания $\psi(U_{пит})$ в конечный результат измерения $y_x(t)$ должны быть внесены соответствующие поправки:

$$y'_x(t) = y_x(t) - \psi(T') - \psi(U_{пит}). \quad (3.57)$$

При этом интервал времени $[0, t_k]$, через который следует выполнять уточнение $\psi(T')$ и $\psi(U_{пит})$, определяется исходя из динамики измеряемого процесса и цикличности работы прибора.

Для снижения уровня случайных погрешностей широко используется метод статистического усреднения результатов много m -кратных измерений одного и того же значения измеряемого параметра. Тогда среднее квадратическое значение σ_x случайной составляющей погрешности конечного результата измерения

уменьшается в \sqrt{m} раз по сравнению с погрешностью σ_i однократного измерения величины. Такой подход к снижению уровня случайной составляющей погрешностей вибростержневого датчика давления ПДВ использован в самописце уровня «Цунами» (см. п. 3.6). Выходная частота f_P датчика ПДВ однозначно связана с гидростатическим давлением, значение которого в указанных устройствах необходимо измерять с допустимой погрешностью $\Delta_{\text{доп}}^P \leq \pm (0,005 - 0,01) \%$. Однако фактически случайная составляющая погрешности σ_d датчика ПДВ, проявляющаяся в нестабильности следования его сигналов от периода к периоду, может достигать 5—10%. Поэтому для достижения приемлемой точности обращаются к методу статистического усреднения длительности периодов следования сигналов с датчика по целому числу m таких периодов. В итоге конечный результат измерения давления получают с погрешностью

$$\sigma_P = \sigma_d / \sqrt{m}. \quad (3.58)$$

Отсюда вытекают требования к выбору параметров схем измерения длительности среднего периода. Они заключаются в одновременном выполнении следующих условий, полученных из формул (3.58) и (3.13):

$$m > \sigma_d^2 / (\Delta_{\text{доп}}^P)^2; \quad (3.59)$$

$$f_{\text{оп}} \geq f_P / (m \Delta_{\text{доп}}^P). \quad (3.60)$$

Применительно к рассмотренному случаю измерения уровня открытого моря на глубинах до 1000 м виброчастотным преобразователем давления ПДВ-100 с погрешностью до ± 5 см число m выделенных периодов должно составить не менее $250 \cdot 10^3$, что потребовало применения в самописце «Цунами» 18-разрядного двоичного счетчика емкости $2^{18} = 256 \cdot 10^3$.

В океанографических СИ, как правило, измерению подлежат усредненные значения выходных параметров, поэтому нелинейность характеристик первичных преобразователей ведет к возникновению дополнительных погрешностей. Действительно, если с выхода рассматриваемых преобразователей снимается полезный сигнал \bar{y} , осредненный в интервале времени t_0 ,

$$\bar{y} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} Kx(t) dt, \quad (3.61)$$

то в том случае, когда $K = F_i(x_i, t, r_i)$, последнее соотношение принимает вид

$$\bar{y} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} F_i(x_i, t, r_i) x(t) dt, \quad (3.62)$$

где x_i — мгновенное значение измеряемой гидрофизической величины; r_i — вектор пространственных координат местоположения рассматриваемого СИ.

Отсюда следует, что вынесение $F_i(x_i, t, r_i)$ за знак интеграла не может быть выполнено без внесения дополнительных погрешностей, а введение корректирующих поправок в конечный результат измерения не позволяет компенсировать нелинейность таких преобразователей. Поэтому коррекцию необходимо осуществлять либо одновременно с процессом измерения, либо вносить поправки непосредственно в результаты измерений.

Таким образом, в частности, выполняется линейризация статических характеристик вибростержневых датчиков ПДВ, используемых в самописцах уровня «Шельф» для измерения по гидростатическому давлению уровня водной поверхности. Такие датчики имеют принципиально нелинейную статическую характеристику выходной частоты f_P , описываемую уравнением (2.20):

$$f_P = f_0 \sqrt{1 + \alpha P_i + \gamma P_i^2},$$

где f_0 — выходная частота датчика при нулевом внешнем давлении; α, γ — градуировочные коэффициенты.

Известно [78], что для кривых такого вида (2.20) может быть подобрано такое значение постоянной величины f^* , при которой период t_P^* следования сигналов с частотой $f^* - f_P$ является линейной функцией от давления P_i :

$$t_P^* = (f^* - f_P)^{-1} = (f^* - f_0 \sqrt{1 + \alpha P_i + \gamma P_i^2})^{-1}. \quad (3.63)$$

Условием линейности уравнения (3.63) является равенство нулю ее второй производной $(t_P^*)'' = 0$, что имеет место при

$$f^* = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \alpha P_i + \gamma P_i^2}} \left[\frac{2(\alpha + \gamma P_i)^2}{\alpha + \gamma P_i^2 - 4\gamma(1 + \alpha P_i + \gamma P_i^2)} + 1 \right]. \quad (3.64)$$

Отсюда видно, что полная компенсация нелинейности таким способом достигается только в одной точке диапазона измерения давления P_i , в качестве которой обычно выбирают середину диапазона. Выражение (3.64) показывает, что частота f^* корректирующего сигнала зависит от коэффициентов α, γ и, следовательно, значение f^* должно устанавливаться индивидуально для каждого конкретного образца ПДВ. В соответствии с этим схема коррекции статических характеристик датчика ПДВ в своем составе должна иметь следующие элементы (рис. 3.16): синтезатор частот, схему вычитания частот, делитель частоты, формирователь характери-

стик датчика и счетчик-измеритель периода. В свою очередь синтезатор частот включает в себя генератор кварцовой частоты $f_{кв}$ и программируемый делитель, управляемый кодом с формирователем индивидуальных характеристик образцов датчика ПДВ.

Подобная схема была реализована в самописце уровня «Шельф», где $f_{кв} = 32\,768$ Гц, а в синтезаторе можно устанавливать частоты f^* от 1 до 65 576 Гц. С помощью такой схемы удастся линеаризовать характеристики датчиков ПДВ-100Б в полном

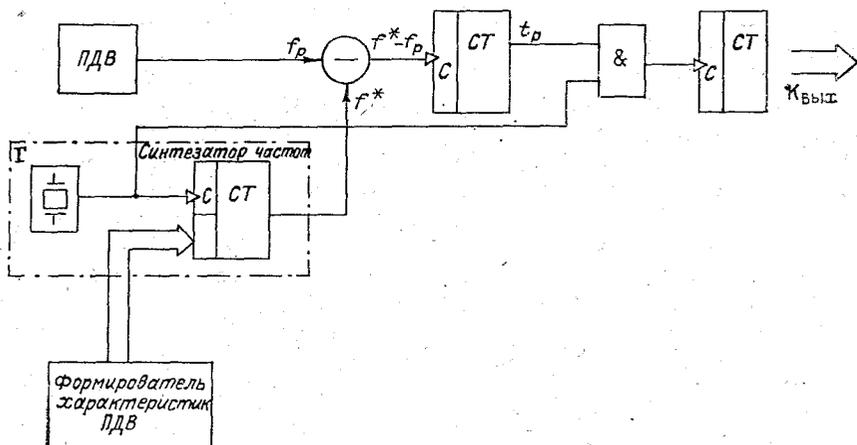


Рис. 3.16. Схема линеаризации статической характеристики датчика ПДВ.

диапазоне измеряемого давления при температуре $0-20^\circ\text{C}$ с погрешностью не хуже $\pm 0,3\%$, а в отдельных случаях $\pm 0,1\%$.

Подобный подход к повышению точности измерения структурными методами также может быть использован в вертушечных измерителях средней скорости течения. Известно, что функция преобразования скорости набегающего водного потока V в частоту f_V вращения лопастного винта в общем случае описывается нелинейным уравнением (2.22), которое удастся свести к соотношению (2.23). Последнее принимается за градуировочную характеристику такого датчика только при $V \gg 0,1$ м/с, когда $c \ll b f_V^2$,

$k_V = a + \sqrt{b}$. Это означает, что в векторно-осредняющих измерителях течения при повороте пропеллера на фиксированный угол ξ_0 вода фактически проходит за интервал времени Δt_i различные отрезки пути $s_i = |V_i| \Delta t_i$. В свою очередь $f_{V_i} = \xi_0 / \Delta t_i$ и, следовательно, с учетом нелинейностей градуировочной характеристики пропеллера, согласно формуле (2.23), S_i по аналогии с (3.33) может быть представлена как

$$\begin{aligned}
 S_i &= |V_i| \Delta t_i = a f_{V_i} \Delta t_i + \sqrt{b f_{V_i}^2 \Delta t_i^2 + c \Delta t_i^2} = \\
 &= \xi_0 k_V \left[1 + \frac{(\sqrt{b \xi_0^2 + c \Delta t_i^2} - \xi_0 \sqrt{b})}{(\xi_0 (a + \sqrt{b}))} \right]. \quad (3.65)
 \end{aligned}$$

Таким образом, при известных параметрах a , b , c пропеллерного датчика и фиксированном значении угла ξ_0 величина $(\sqrt{b\xi_0^2 + c\Delta t_i^2} - \xi_0\sqrt{b})/[\xi_0(a + \sqrt{b})]$ представляет собой поправку к нелинейной характеристике такого датчика и вполне определенную функцию вида $F_V(\Delta t)$, значение которой целиком зависит только от интервала времени Δt совершения пропеллером поворота на угол ξ_0 .

Тогда алгоритм векторного осреднения средств измерения скорости течения с двухкомпонентным пропеллерным датчиком более точно после введения указанной поправки описывается следующими уравнениями, полученными из выражения (3.36) с учетом (3.65):

$$\begin{aligned} \bar{V}_m &= \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \left\{ \sum_{i=1}^{n_x} [1 + F_V(\Delta t_i)] \cos \beta_i \operatorname{sign} i - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{j=1}^{n_y} [1 + F_V(\Delta t_j)] \sin \beta_j \operatorname{sign} j \right\}; \\ \bar{V}_ш &= \frac{\xi_0 k_V}{t_0} \left\{ \sum_{i=1}^{n_x} [1 + F_V(\Delta t_i)] \sin \beta_i \operatorname{sign} i + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{j=1}^{n_y} [1 + F_V(\Delta t_j)] \cos \beta_j \operatorname{sign} j \right\}. \end{aligned} \quad (3.66)$$

При аппаратной реализации такого алгоритма в блок-схему векторно-осредняющего измерителя течения (см. рис. 3.15) дополнительно вводятся блоки измерения интервалов времени Δt_i и Δt_j совершения соответствующими пропеллерами поворота на угол ξ_0 , блоки умножения тригонометрических функций $\sin \beta_{i(j)}$ и $\cos \beta_{i(j)}$ на функции поправок $F_V[\Delta t_{i(j)}]$ и функциональные преобразователи-формирователи поправок по измеренным значениям Δt_i и Δt_j [13]. В таком устройстве погрешности от нелинейности пропеллерного датчика удастся уменьшить с $\pm 0,02$ м/с до уровня случайных ($\pm 0,005$ м/с).

Аналогичный подход к повышению точности может быть рекомендован для коррекции пространственных и динамических характеристик вертушечных преобразователей. В отношении последних наиболее важным обстоятельством является установление и параметризация функции влияния, с помощью которой возможно однозначно определить искомое значение динамической поправки. Здесь полезно использовать численные методы статистического моделирования в сочетании с экспериментальной проверкой адекватности выбранных моделей исследуемых измерительных преобразователей и систем [83].

В частности, таким путем получены статистически устойчивые зависимости между значениями динамических поправок $\delta_{дин}^V$

в измерении модуля средней скорости течения роторными датчиками и коэффициентом C_f вариации частоты вращения ротора [83]. В данном случае под коэффициентом C_f понимают величину, рассчитанную по следующей формуле:

$$C_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{v_i} - \bar{f}_v)^2} / \bar{f}_v, \quad (3.67)$$

где f_v , \bar{f}_v — соответственно мгновенная и средняя частота вращения ротора за интервал времени t_0 осреднения модуля по n отсчетам f_{v_i} .

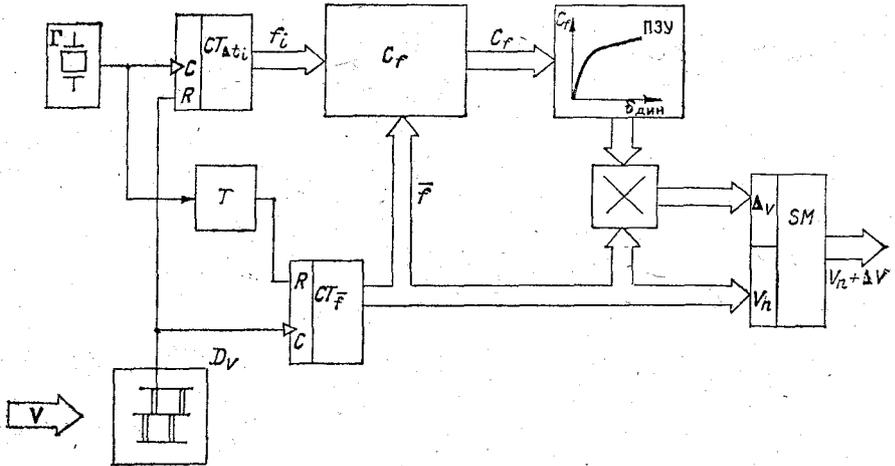


Рис. 3.17. Измеритель скорости течения с коррекцией динамической характеристики ротора.

Структурная схема такого устройства для измерения модуля скорости с введением динамических поправок на работу ротора в пульсирующем водном потоке, показана на рис. 3.17. В состав данного устройства входят: роторный датчик скорости D_v ; генератор опорной частоты Γ ; счетчик-измеритель интервала времени Δt_i оборота ротора $CT \Delta t_i$; счетчик-измеритель средней частоты \bar{f}_v вращения ротора $CT \bar{f}_v$; таймер T ; блок вычисления коэффициента C_f ; перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство ПЗУ динамических поправок $\delta_{\text{дин}}^v$; сумматор кодов SM ; блок умножения.

Работа такого устройства осуществляется циклически по команде с таймера, поступающей через заданные интервалы времени t_0 , равные времени осреднения скорости. При этом в течение всего заданного интервала времени счетчик $CT \Delta t_i$ производит измерение длительности интервалов времени Δt_i ; поворота ротора

на фиксированный угол, характеризующие собой мгновенную частоту f_i его вращения, а счетчик $CT \bar{f}_V$ производит подсчет числа этих оборотов. В результате к концу t_0 в счетчике $CT \bar{f}_V$ будет накоплен код, характеризующий собой среднюю частоту вращения ротора, однозначно связанную через гидрометрический шаг с предварительным результатом измерения модуля V_{Π} средней скорости ламинарного водного потока. Далее блок вычисления коэффициента вариации рассчитывает по формуле (3.67) значение C_f , а ПЗУ в зависимости от полученного значения выдает относительное значение динамической поправки. Затем блок умножения вычисляет абсолютное значение искомой поправки $\Delta_{\text{дин}}^V = \delta_{\text{дин}}^V V_{\Pi}$, которое в готовой форме вместе с предварительным результатом V_{Π} поступает на вход сумматора SM . На его выходе формируется окончательный результат измерения модуля средней скорости течения, зафиксированный за истекший интервал времени.

С помощью подобных преобразователей может быть организована коррекция динамических характеристик пропеллерных датчиков скорости, согласование динамических и пространственных характеристик STD -измерителей, а также других средств измерения океанографических параметров *in situ* [132]. Основной задачей при проектировании этих устройств является предварительное определение взаимных зависимостей искомых значений поправок с измеряемыми параметрами или вычисляемыми характеристиками этих поправок. Полученные зависимости в табличной форме при изготовлении такого средства измерения заносятся в ПЗУ или при его проектировании закладываются в специализированные функциональные преобразователи.

В качестве таких преобразователей могут использоваться различного рода цифровые кусочно-линейные аппроксиматоры нелинейных функций, а также — аналоговые, построенные на основе варикапов, термисторов или других элементов, описанных в соответствующей литературе [40, 78].

АВТОНОМНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ АЦИТ

4.1. Измеритель автономный цифровой АЦИТ

Океанографический комплекс АЦИТ включает в себя два отдельных изделия: измеритель автономный цифровой АЦИТ-А, располагаемый под водой *in situ* в точке выполнения измерений, и бортовое устройство обработки данных УОД.

Собственно сам АЦИТ-А предназначен для измерения *in situ* температуры, электрической проводимости и гидростатического давления морской воды, скорости и направления течения. Для получения значений двух последних океанографических величин измеритель производит измерение двух ортогональных компонентов скорости течения, двух компонентов азимутального угла ориентации корпуса измерителя и отклонение его оси от вертикали. Все измеренные значения параметров кодируются 12-разрядным двоичным кодом, регистрируются на ленте магнитофонной кассеты, передают по гидроакустическому и кабельному каналам связи. По гидроакустическому каналу дальность связи составляет не менее 2000 м.

УОД предназначен для считывания данных, записанных на магнитофонную кассету, приема этой информации по гидроакустическому и кабельному каналам связи.

В настоящее время АЦИТ широко применяется при океанографических исследованиях и стандартных океанографических наблюдениях в составе аппаратуры автономной буйковой станции и с борта дрейфующих судов любого водоизмещения, а также с различных неподвижных или медленно дрейфующих платформ (льдов, эстакад, пирсов и т. п.) в океанах, морях, озерах, водохранилищах и на устьевых участках рек. При этом собственно измеритель АЦИТ-А размещается в воде, в месте проведения наблюдений, а УОД АЦИТа располагается и эксплуатируется в лабораторных условиях.

В измерителе АЦИТ-А предусмотрены два основных режима работы:

— автономный (Автоном) с измерением следующих девяти параметров: контрольный, температуры воды T , удельной электрической проводимости воды κ , первого компонента скорости течения V_1 , второго компонента скорости течения V_2 , отклонения оси корпуса измерителя от вертикали ϕ , первого компонента азимутального угла ориентации измерителя β_1 , второго компонента азимутального угла ориентации измерителя β_2 , гидростатического давления P с различной циклическостью 300, 900, 1800, 3600 с, зада-

ваемой положением переключателя «Автоном—Зонд», установленного на стойке измерителя;

— зондирования (Зонд) с измерением следующих четырех параметров: контрольный, температуры воды, удельной электрической проводимости воды, гидростатического давления с цикличностью в 30 с, задаваемой также одним из положений переключателя «Автоном—Зонд».

Время передачи результатов измерения в режиме «Автоном» по гидроакустическому и кабельному каналам связи составляет 2,4 с, в режиме «Зонд» — 0,96 с. Тактовая частота передачи 50 Гц. В каждом такте передается значение одного двоичного разряда результата измерения. Погрешность срабатывания измерителя в заданные моменты времени находится в пределах ± 1 с в сутки.

Измеритель АЦИТ также имеет возможность работать в течение первых 1800 с после его включения в одном из двух дополнительных режимов, автономном или зондирования, каждый из которых отличается от соответствующего основного только цикличностью выполнения измерения. Цикличность измерений в дополнительном автономном режиме равна 30 с, в дополнительном режиме зондирования — 2 с.

Питание измерителя осуществляется от батарейного источника с напряжением 9 В, собранного на элементах «373» и обеспечивающего его правильную работу без замены батарей в течение 4 000 ч (6 мес). Сила тока между циклами измерения не более 2 мА, а во время измерения при передаче данных по гидроакустическому каналу связи — не более 450 мА.

Магнитофонная кассета МК-60-1(2) обеспечивает запись не менее чем 3 500 циклов, а магнитофонная кассета МК-120 — 7 000 циклов. В измерителе также могут использоваться магнитофонные кассеты производства иностранных фирм AGFA, DENON, «Sony», «ДК Тур-490». Скорость протяжки магнитофонной ленты при записи в начале кассеты равна 5 мм/с, в конце — 10 мм/с при номинальном напряжении питания 9 В. Вероятность сбоя магнитной записи — один сбой на 500 циклов записи. Диапазон измерения угла отклонения корпуса прибора от вертикали $\pm 30^\circ$ при основной погрешности $\pm 5^\circ$ (табл. 1.1).

В целом измеритель автономный цифровой АЦИТ представляет собой многоканальный измерительный прибор с аналого-цифровым преобразователем поразрядного уравнивания и датчиками с аналоговыми выходами, функционирующим автоматически по заданной программе от ограниченного по емкости и мощности батарейного источника питания. Описание конструкции АЦИТа и принципов его работы приведены в различных литературных источниках [23, 88, 94], а также кратко излагаются в документации, прилагаемой к каждому образцу прибора, поставляемого заводом-изготовителем.

В состав АЦИТа-А входят следующие основные конструктивные узлы и блоки (рис. 4.1): датчик скорости течения; магнитный компас; датчик температуры; датчик удельной электрической про-

водимости; датчик гидростатического давления; датчик угла наклона; магнитофон записи; блок кварцевых часов; блок измерительный; блок управления; блок питания генераторный; блок питания батарейный; корпус; крышка; кронштейн.

В свою очередь, указанные блоки (рис. 4.1) состоят из отдельных элементов и выполнены конструктивно каждый на отдельной печатной плате.

Блок кварцевых часов включает в себя: задающий генератор кварцовой частоты 10 кГц ($\Gamma_{кв}$), делитель этой частоты, программно-временное устройство, цифровой умножитель частоты ($\times 2$), ключевые элементы &1 и &2.

Блок измерительный включает в себя: 12-разрядный кольцевой распределитель, регистр трех триггеров памяти, набор из 12 ключей $K_{л1}, K_{л2}, \dots, K_{л12}$ компенсатора, источник компенсирующего напряжения $U_{к}$, представляющий собой трансформаторный делитель напряжения переменного тока 2,4 В, подробно описанный в п. 3.1.

Блок управления включает в себя: коммутатор параметров, нуль-орган, состоящий из последовательно соединенных усилителя переменного тока, фазочувствительного детектора (ФЧД) и интегратора, формирователь выходного кода, цифровой автомат, управляющий работой компенсатора, и состоящий из ключевого элемента &3, элемента «ИЛИ» и элементов задержки $D1$ и $D2$.

Блок питания генераторный включает в себя акустический передатчик, ключ напряжения питания АЦИТа, поступающего от батарейного блока, стабилизатор напряжения и генератор-формирователь питающих напряжений: постоянного тока $\pm 5,5$ В для питания микросхем, переменного тока частоты 10 кГц напряжения 15 В для питания датчиков температуры, электрической проводимости и давления, а также $U_0 \approx 2,4$ В — для питания компенсатора.

В свою очередь в качестве датчика температуры применяется платиновый терморезистор R_T с сопротивлением 500 Ом при 0 °С, выполненный из платиновой проволоки марки ПЛ1 в виде жгута, намотанного на пластину. Указанный терморезистор включен в мостовую измерительную схему, в которой в качестве опорного резистора $R_{обр}$ используется высокостабильный резистор С5-5В номинала 470 Ом совместно со специальным термокомпенсирующим сопротивлением, изготовленным из меди.

В АЦИТе применен индуктивный датчик относительной электрической проводимости, представляющий собой два торроидальных ферромагнитных сердечника из феррита марки М2000НМ, замкнутых витком морской воды. Компенсирующий сигнал на выход этого датчика поступает через опорный резистор $R_{к}$, представляющий собой образцовое сопротивление типа МВС1 номинала 50 кОм.

В качестве датчика гидростатического давления в АЦИТе применена манометрическая пружина — трубка Бурдона с индуктивным преобразователем $L_P - L_0$ ее перемещения в электрический

сигнал, который пропорционален измеряемому давлению (см. п. 2.3).

Магнитный компас АЦИТа представляет собой потенциометрический электролитический преобразователь R_{β_1} , R_{β_2} , положение картушки которого определяется по двум сигналам, снимаемым с выходов обоих потенциометров этого преобразователя. Датчик угла наклона АЦИТа также является электролитическим потенциометром R_{ψ} , выходной сигнал которого показывает угол отклонения корпуса прибора от вертикали (см. п. 2.5).

В качестве датчика скорости течения в АЦИТе применен двухкомпонентный вертушечный преобразователь. Его чувствительными элементами являются 8-лопастные винты с углом атаки 60° , которые изготавливаются из пропиленна методом литья под давлением и имеют совместно с осями их вращения нулевую плавучесть в воде (см. п. 2.4).

Для преобразования углов поворотов лопастных винтов в электрический сигнал используются круговые потенциометры R_{V_1} , R_{V_2} , вращение к которым передается от вертушек через червячную передачу 1 : 76, магнитную муфту и двухступенчатый редуктор с сумматорным коэффициентом передачи 1 : 326.

Процессы измерения, регистрации и передачи данных по каналам связи осуществляются в АЦИТе циклически с вышеуказанной периодичностью, задаваемой положением переключателя «Автоном — Зонд». Между циклами измерения в приборе работает только блок кварцевых часов, который в момент начала очередного цикла выдает команду «Включить питание», открывающую ключ в блоке питания.

Эта команда формируется программно-временным устройством из сигналов, поступающих от задающего кварцевого генератора частоты 10 кГц через делитель частоты на вход этого устройства. В результате запускается в работу генераторный блок питания, который выдает все питающие напряжения на электронные узлы АЦИТа и к его датчикам. Открытие ключа в этом блоке приводит к вращению двигателя магнитофона записи и к протяжке ленты магнитофонной кассеты. Одновременно по сигналу «Включить питание» открывается ключ &2, расположенный в блоке кварцевых часов, и тактовая частота 50 Гц подается в блок управления.

Установка программно-временного устройства в исходное положение и синхронизация кварцевых часов с сигналами точного судового времени производится либо нажатием кнопки K_n , расположенной в этом блоке, либо коммутацией с помощью магнита M геркона G_k , расположенного на верхней крышке прибора. Запуск кварцевых часов производится в момент размыкания кнопки или геркона. При их замыкании выдача команды «Включить питание» блокируется. Поступление сигнала тактовой частоты 50 Гц в блок управления и далее в блок измерительный приводит к осуществлению процесса поочередного уравнивания напряжения

со всех датчиков с помощью компенсатора. Для этого выходное напряжение со всех датчиков $U_{д_i}$ включено по схеме АЦИТа последовательно с выходом компенсатора $U_{к}$, а разностный сигнал $U_{д_i} - U_{к}$ подается на вход нуль-органа, управляющего состоянием ключей $Kл1, Kл2, \dots, Kл12$ компенсатора. В АЦИТе применен аналого-цифровой преобразователь с выдачей информации о значении измеряемого в виде последовательного позиционного двоичного кода одновременно с процессом уравнивания [1]. Такой код формируется на выходе ключа &3 и далее поступает на вход формирователя выходного кода, обеспечивающего выработку сигналов, необходимых для записи результатов измерения на магнитофонную ленту и передачу по каналам связи. Организация требуемого алгоритма работы аналого-цифрового преобразователя осуществляется с помощью элементов задержки $D1, D2$, ключа &3 и элемента «ИЛИ», входящих в состав блока управления. Согласно этому алгоритму, в один такт сигнала с частотой 50 Гц происходит сравнение напряжения датчика и компенсатора по одному разряду выходного кода и запись на магнитную ленту значения разряда, полученного в предыдущем такте сравнения. Для этого по переднему фронту каждого из тактовых импульсов, следующих с частотой 50 Гц, производится выключение ранее включенного ключа компенсатора при наличии перекомпенсации на выходе нуль-органа. Затем через задержку $D1$ производится переключение 12-разрядного кольцевого распределителя на следующий уравниваемый разряд и потом через задержку $D2$ включение последующего JK -триггера памяти и, следовательно, ключа компенсатора.

Уравнивание выходных сигналов с датчиков осуществляется, начиная со старшего, 12-го разряда, в той же последовательности, что и измерение соответствующих параметров, указанное выше. Для поочередного подключения датчиков служит коммутатор параметров, переключаемый после переполнения 12-разрядного кольцевого распределителя.

При измерении первого контрольного параметра на вход аналого-цифрового преобразователя с генератора-формирователя поступает сигнал, значение которого эквивалентно примерно 6000 единиц выходного кода. Для восстановления временной привязки результатов измерений, при сбое магнитной записи, в значения контрольного параметра периодически по команде с блока кварцевых часов вносится метка. Для внесения метки выход нуль-органа отключается от формирователя выходного кода и контрольному параметру кода присваивается значение, равное 0000 единиц выходного кода. В основном режиме работы метится каждый 20-й цикл измерения, а в дополнительном режиме, в первые 1800 с (30 мин) после включения измерителя — каждый 10-й.

Передача результатов измерения по гидроакустическому каналу связи осуществляется акустическим передатчиком одновременно с процессом измерения. Для этого на передатчик поступает видеосигнал, несущий информацию о значении измеряемого пара-

метра в виде последовательного двоичного кода. Такой сигнал модулируется частотой 20 кГц и далее подается на пьезоизлучатель, установленный на крышке измерителя АЦИТ.

Тактовая частота передачи 50 Гц, длительность акустического импульса, несущего информацию о наличии «1» в передаваемом разряде, равна 5 мс. Перед началом информационной посылки передается синхриимпульс длительностью не менее 40 мс. В режиме «Автоном» по гидроакустическому каналу связи передается каждый цикл измерения 108 бит информации. В режиме «Зонд» данные о результатах измерения передаются 48 битами информации. Во время дополнительного режима зондирования передаются результаты каждого 10-го цикла измерения.

Регистрация результатов измерения АЦИТа осуществляется с помощью асинхронной магнитной записи с отдельным занесением «1» и «0» двоичного кода по разным дорожкам. Способ записи — амплитудно-импульсный с двойным перемагничиванием. Привод магнитофонной ленты производится простой перемоткой ленты с катушки на катушку.

Длительность включения двигателя привода лентопротяжного механизма от блока кварцевых часов равна в режиме «Автоном» 3 с, в режиме «Зонд» — 1,5 с. При номинальной скорости протяжки ленты, равной в начале 5 мм/с, а в конце кассеты — 10 мм/с, длина зоны записи соответственно составляет в начале кассеты примерно 10 мм и 4 мм, а в конце — 20 мм и 9 мм. При этом длина межзонного участка ленты равна не менее 19 мм и 3 мм в начале кассеты, и 20 мм и 7 мм в конце.

Тактовая частота записи 50 Гц, длительность импульса записи 5 мс.

Конструктивно измеритель (рис. 4.2) выполнен в виде герметичного цилиндра диаметром около 0,22 м, длиной не более 1,4 м, на нижнем основании которого размещен датчик скорости течения, а на верхней крышке — датчики температуры, удельной электрической проводимости и гидростатического давления морской воды. Блок питания, магнитный компас, датчик угла наклона и электронные узлы измерителя размещаются внутри его корпуса. Он изготавливается из антимагнитного титанового сплава ВТ-3В или нержавеющей стали типа Х18 Н9Т или алюминиевого сплава АМГ-16. В зависимости от вида примененного материала и толщины стенок корпуса АЦИТ выпускается для глубин 6000, 2500 или 1000 м. Масса измерителя не превышает 40 кг.

Крепится измеритель к тросу толщины не более 9 мм с помощью специального кронштейна. Угол его подвески устанавливается таким, чтобы вертикальность корпуса сохранялась в пределах $\pm 15^\circ$. Карданный подвес магнитного компаса обеспечивает его свободное движение и, следовательно, паспортные метрологические характеристики.

Основная цифровая часть электронных узлов АЦИТа выполнена на макросхемах серии 134, а блок кварцевых часов — на микросхемах серии 176. В качестве ключей $Kл1$, $Kл2$, ..., $Kл12$

компенсатора использованы транзисторные сборки К198НТ, а трансформаторные делители изготовлены на сердечниках М2000НМ.

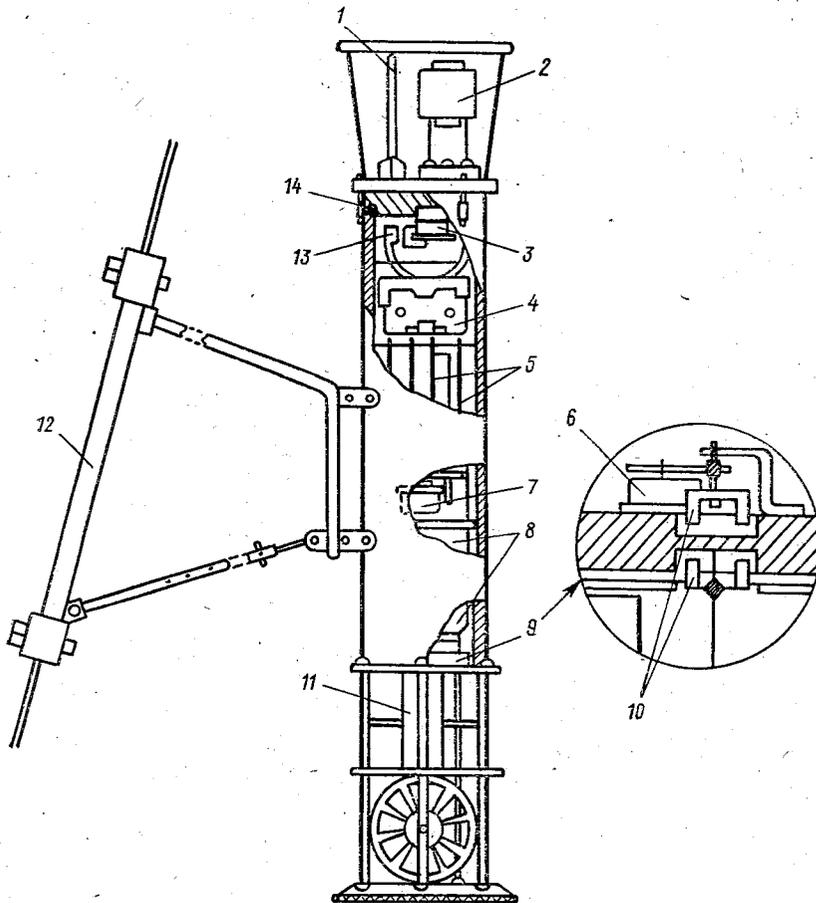


Рис. 4.2. Автономный цифровой измеритель течения (АЦИТ).

1, 2, 11 — датчики температуры (1), электрической проводимости (2), скорости течения (11); 3 — гидроакустический пьезондлучатель; 4 — магнитофон; 5 — платы электроники; 6 — круговой потенциометр с редуктором; 7 — магнитный компас; 8 — блок питания; 9 — блок потенциометров канала скорости; 10 — магнитная муфта; 12 — кронштейн крепления; 13 — трубка Бурдона датчика давления; 14 — уплотнительное кольцо.

4.2. Совершенствование измерителя АЦИТ

Многолетний опыт по эксплуатации измерительного комплекса АЦИТ показывает, что получить с его помощью материалы наблюдения стандартного качества можно только после выполнения отдельных доработок [57, 59, 61]. В первую очередь это связано с тем, что в рядах полученных данных могут иметь место значи-

тельные потери информации, затрудняющие последующий анализ и обработку материалов наблюдений. Причинами указанных потерь является низкая надежность магнитной записи и применение в блоке скорости круговых потенциометров типа ПТС-21 — 2,5 ком, у которых имеются разрывы рабочего участка шкалы в 30°. В результате потери информации о скорости и направлении течения могут достигать в отдельных случаях до 30 %.

С целью исключения данных конструктивных недостатков выполняется доработка измерителей непосредственно в эксплуатации.

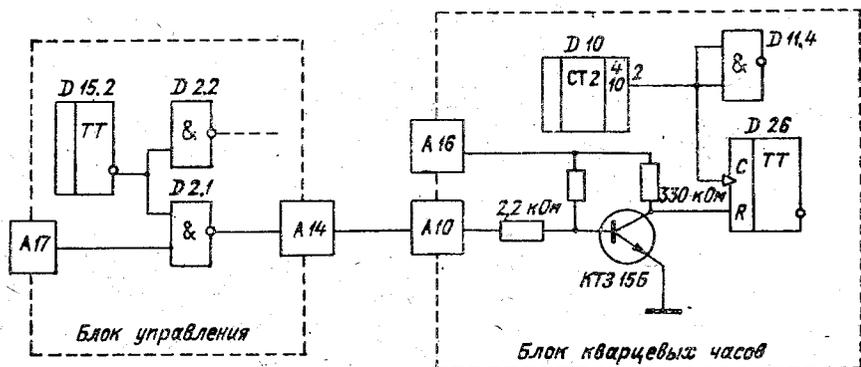


Рис. 4.3. Принципиальная схема доработки канала магнитной записи АЦИТа.

рующих организациях. При этом вносятся определенные изменения в схему прибора. Ненадежная работа канала магнитной записи отдельных образцов измерителей вызвана появлением случайных импульсов записи на магнитной ленте во время выключения двигателя магнитофона записи. Чтобы их избежать, выключение двигателя магнитофона записи следует совместить с моментом окончания работы измерительной схемы прибора. При этом длительность свободной протяжки магнитной ленты должна быть сохранена, чтобы длина межзонного участка записи осталась достаточной для ее воспроизведения на УОДе в старт-стопном режиме.

С этой целью на плате управления и на плате кварцевых часов, а также в схеме соединений прибора выполняются изменения, показанные на рис. 4.3. В результате сигнал логической «1», возникающий на выходе микросхемы D2.1 блока управления в момент окончания цикла измерения, поступает на сброс D-триггера D26 блока кварцевых часов, формирующего на контакте A17 команду «Включить питание».

Низкая надежность канала магнитной записи, обусловленная неудовлетворительным качеством магнитного покрытия магнитофонных лент, также приводит к частичным потерям записи данных и, как следствие, к нарушению синхронности рядов наблюдений. Для полного восстановления временной привязки получен-

ных результатов измерений в процессе доработки схемы стандартного АЦИТа предусмотрено включение в его состав счетчика номера цикла измерения, конструктивно располагаемого в блоке кварцевых часов. Это устройство непрерывно осуществляет подсчет числа срабатываний измерителя и формирование текущего номера измерения, начиная с первого, и его запись на магнитофонную ленту вместо контрольного параметра. Структурная схема такого устройства состоит из формирователя счетчика номера, регистра сдвига и фазового модулятора. Последний служит для кодирования цифровой информации о номере измерения, поступающей с регистра сдвига. Сброс счетчика номера цикла измерения осуществляется после нажатия кнопки «Кн» блока кварцевых часов или при коммутации геркона. Подробное описание схемы этого устройства имеется в работе [61].

Для исключения потерь информации о скорости и направлении течения в АЦИТах используются два варианта конструктивных доработок. Первый основывается на том, что фактически в потенциометрах блока скорости намотка провода, образующего резистор потенциометра, выполнена по всему круговому каркасу, а в секторе с углом в 30° она отключена от основного рабочего участка. Поэтому для устранения разрывов необходимо выполнить подключение проволочных резисторов из указанного сектора в 30° к резистору основного рабочего участка. Для этого на практике производится разборка каждого потенциометра и установка изоляционной вставки в середину между этими двумя проволочными резисторами. В результате два концевых участка потенциометра, лежащие в секторе 30° , оказываются электрически связаны с его рабочим участком, а «мертвая» зона уменьшена до $1-2^\circ$.

Второй вариант предполагает применение электронной счетной схемы числа оборотов пропеллеров датчика скорости вместо потенциометрической. Для этого внешняя часть магнитной муфты датчика выполняется в виде круговых магнитов, а внутри корпуса напротив магнитов располагаются три геркона. В процессе работы вращение от пропеллеров через внешнюю понижающую червячную передачу с коэффициентом $1:76$ передается к указанным магнитам и далее преобразуется герконами в последовательность электрических сигналов. Сигналы подсчитываются счетной реверсивной схемой, учитывающей направление вращения пропеллера и формирующей знак полученного числа. Этот знак кодируется четностью — нечетностью значений кодов K_4 и K_5 по четвертому и пятому параметрам. Данный электронный блок скорости конструктивно выполнен в тех же установочных размерах, что и стандартный потенциометрический блок скорости, и размещается на его же посадочном месте в общей схеме компоновки измерителя АЦИТ. Более подробное описание данного устройства также имеется в работах [61, 3].

Наряду с основными усовершенствованиями на практике в эксплуатирующих организациях в отдельные образцы приборов вносятся изменения в схему канала электрической проводимости

и блока кварцевых часов. Первое из них связано с тем, что канал измерения электрической проводимости имеет существенную дополнительную погрешность от влияния внешнего гидростатического давления, которая может достигать у отдельных образцов измерителей до 20 единиц кода. Это обусловлено наличием в рассматриваемом канале резонансного контура $L_{\kappa}C_{\kappa}$ на выходе датчика (см. рис. 4.1), выходная обмотка которого представляет индуктивность L_{κ} .

При действии на датчик гидростатического давления изменяется проницаемость сердечника μ_{κ} и, следовательно, сигнал в данном измерительном канале.

С целью исключения указанного явления и уменьшения дополнительной погрешности до 1—2 единиц кода в схеме прибора на плате верхней крышки прибора вместо одного конденсатора, образующего контур $L_{\kappa}C_{\kappa}$, устанавливается резистор номинала 5,1 кОм. В результате снижается добротность этого контура и уменьшается зависимость выходного сигнала датчика от возможных изменений магнитной проницаемости сердечника.

Второе изменение заключается в том, что в блоке кварцевых часов устанавливается последовательно с кварцевым резонатором дополнительный резистор номинала 10 кОм, ограничивающий амплитуду сигнала питания кварцевого резонатора. Это связано с тем, что кварцевый задающий генератор АЦИТа построен по схеме, не обеспечивающей надежного возбуждения кварцевого резонатора. В результате в процессе эксплуатации возможен срыв колебаний этого резонатора и даже его механическое разрушение, что ведет к полному нарушению работоспособности прибора.

Внедрение в эксплуатирующих организациях всех вышеперечисленных доработок схемы и конструкции стандартного измерителя АЦИТ-А существенно повышает качество материалов наблюдений и в первую очередь за течениями. Опыт применения прибора показал, что только после устранения «мертвых» зон в шкале потенциометров ряды наблюдений за скоростью становятся пригодны для статистического анализа с целью выявления закономерностей синоптического и мезомасштабного характера [57, 59].

4.3. Методика работы с измерителями АЦИТ

В связи с высокой стоимостью и трудоемкостью наблюдений на автономных буйковых станциях каждый отдельно взятый прибор, устанавливаемый на такую станцию, подвергается тщательной проверке. Поэтому все образцы АЦИТа перед их эксплуатацией проверяются с целью выявления и устранения дефектов, возникших в процессе их транспортировки или хранения.

Выполняются следующие виды проверок: внешний осмотр; проверка функционирования в различных режимах; проверка качества магнитной записи, герметичности уплотнения, кронштейна подвески, измерительных каналов.

Во время внешнего осмотра контролируются:

— отсутствие видимых дефектов конструкции и электронной схемы, таких как непаянка контактов, наличие небольших трещин в печатных платах, обрывы проводников межблочных соединений;

— отсутствие во внутренней полости измерительного преобразователя электрической проводимости пузырьков воздуха диаметром более 3,0 мм;

— отсутствие трещин и дефектов на корпусе преобразователя электрической проводимости сколов и смещений стеклянной калибрующей вставки;

— отсутствие обрыва проводов в магнитном компасе;

— отсутствие касания трубки Бурдона с монтажными проводниками;

— наличие нормального зазора в ферритовом сердечнике индуктивного преобразователя, который при нормальном атмосферном давлении должен составлять 0,3—0,6 мм;

— плотность затяжки и наличие контровки механических узлов;

— качество антикоррозийного покрытия магнитных муфт датчика скорости течений;

— герметичность уплотнений корпуса;

— герметичность датчика электрической проводимости воды, угломера, магнитного компаса;

— качество сборки и регулировки зазоров в зубчатых зацеплениях блока потенциометров и магнитофона.

В процессе проверки функционирования данного конкретного образца измерителя АЦИТ-А в различных режимах работы, как правило, контролируются:

— срабатывание прибора по командам от блока кварцевых часов и от кнопки *Кн*;

— переход через 30 мин после начала работы прибора из дополнительного режима в основной;

— работоспособность герконного выключателя;

— ток потребления в цикле измерения и в паузе между циклами;

— качество батарейного блока питания;

— точность хода кварцевых часов.

Проверка качества магнитной записи заключается в выполнении пробной магнитофонной записи с помощью испытуемого образца АЦИТа объемом примерно 200—250 циклов измерений. За время проведения этой записи одновременно регистрируется информация, поступающая по кабельному каналу от данного АЦИТа. Далее сравнивается информация, записанная на магнитофонную кассету, и информация, поступившая по кабельному каналу.

Как установлено в процессе эксплуатации, наиболее вероятными причинами возможных сбоев в канале магнитной записи АЦИТ являются;

— неравномерность протяжки магнитной ленты, осуществляемой на магнитофоне АЦИТа путем прямой перемотки с бобины на бобину;

— наличие дополнительного импульса в разделительной зоне между циклами;

— завышенная плотность записи;

— загрязнение поверхности головки или нарушение ее юстировки;

— дефекты магнитной ленты или кассеты.

Признаком неудовлетворительной работы механизма лентопротяжки является воспринимаемая на слух и визуально неравномерность протяжки. Ток двигателя лентопротяжки, составляющий в нормальных условиях 40 ± 3 мА, колеблется в пределах более 5 мА за время одного оборота катушки кассеты. Количество сбоев записи имеет перемежающийся характер и значительно превышает норму. В этом случае рекомендуется отрегулировать зазор в червячном зацеплении, смазать трущиеся поверхности и поставить двигатель на непрерывный прогон в течение 8 ч от внешнего источника питания с целью приработки зацеплений.

Признаком завышенной плотности записи является постепенное уменьшение числа сбоев от начала к концу ленты, а также преимущественные искажения информации в начале цикла (искажение контрольного параметра). Причиной повышенной плотности записи может быть малая скорость протяжки, обусловленная заниженным напряжением питания на двигателе, или чрезмерные нагрузки на двигатель из-за заклинивания катушки в кассете. Плотность записи соответствует номинальной в том случае, если общая длина записи 10 циклов по 9 параметров составляет в начале кассеты 148—152 мм. Устранение дефекта достигается исключением потенциометра, регулирующего напряжение на двигателе, так как наличие сопротивления в цепи двигателя не только снижает его установившуюся скорость вращения, но и значительно (в 2—3 раза) увеличивает время разгона. Исключение потенциометра рекомендуется также и при нормальной работе магнитофона, так как это увеличивает потенциальную надежность записи при повышенном напряжении батарей, а максимальный объем записи снизится несущественно.

Признаком загрязнения поверхности записывающей головки или нарушения юстировки может служить большое количество сбоев. В этом случае рекомендуется протереть головку ваткой со спиртом. Если это не дало результатов, то следует проверить юстировку путем считывания сигнала на УОД и контроля считываемого с магнитной ленты сигнала с помощью осциллографа. При нормальном уровне записи амплитуда считываемых импульсов на выходе усилителя воспроизведения УОД должна доходить до ограничения и составлять не менее 3 В. Нарушение юстировки записывающей головки можно проверить регулировкой углового положения считывающей головки. При этом амплитуда сигнала должна существенно возрасти на 40—50%. Эту операцию сле-

дует делать только в крайнем случае, если остальные виды проверок не дали результата, предварительно отметив исходное положение регулировочного винта. При подтверждении нарушения юстировки при записи головку считывания следует вернуть в исходное состояние, а головку записи развернуть на такой же угол в противоположном направлении.

Наличие дополнительного импульса записи на магнитной ленте в паузе между циклами проявляется в виде сбоев всей информации в цикле, представляющей собой сдвиг массива в десятичной форме на один разряд влево. Признаком этого вида сбоев может служить повторяющийся характер искажений всей строки при распечатке на телетайпе. Появление лишнего импульса связано с самопроизвольным переключением триггеров управления головкой записи в момент выключения питания. Для устранения такого сбоя служат изменения в блоке кварцевых часов (см. п. 4.2).

Дефекты магнитной ленты или кассеты обычно являются следствием ее износа, неправильного хранения или эксплуатации в неисправном магнитофоне. Признаком неисправности обычно являются помятость и резкие перегибы ленты, неровный край ленты в катушках, наблюдаемый в прозрачное окно кассеты. Показателем дефектности кассеты являются сбои информации, повторяющиеся в том же месте при многократном считывании, а также заклинивание катушек и неравномерный ход ленты при перемотках.

В отдельных приборах наблюдается низкая надежность магнитной записи из-за плоско-параллельного смещения головки или направляющего ролика от средней линии магнитофонной кассеты. Это приводит к смятию одного края ленты и смещению крайней внешней дорожки за пределы ленты. Подобный дефект обнаруживается методом проявления записи тонкомолотым магнитным порошком, который равномерным слоем наносится на ленту, а излишки удаляются. При этом запись становится видимой в виде поперечной штриховки шириной 0,7 мм и плотностью 10 импульсов на 1 мм. При нормальном положении головки внешняя дорожка записи должна отстоять от края ленты на 0,2 мм.

Надежность основного уплотнения верхней крышки АЦИТа проверяется по остаточному зазору после равномерной затяжки откидных болтов. При исправной прокладке зазор по всему периметру должен быть равномерным и составлять 1,0—0,5 мм. Если при сравнительно легкой затяжке металл крышки садится на металл корпуса, то это означает, что толщина резиновой прокладки мала и, следовательно, надежная герметизация не обеспечивается. При зазоре больше 1,0 мм во время погружения в воду на большие глубины резина, подвергаясь чрезмерно высоким нагрузкам, выдавливается в зазор. Это может приводить к разрушению прокладки и ее непригодности для повторного использования.

Проверка герметичности внешних уплотнений датчиков температуры и электрической проводимости выполняется путем контроля качества затяжки крепежных болтов и гайки.

Окончательная проверка герметичности производится в море методом пробного погружения приборов на глубину 100—300 м на 1 ч. Необходимость последней полной проверки подтверждается практикой, которая показывает, что 50 % всех отказов связано с попаданием воды внутрь корпуса. Затекание воды может происходить через дефектные резиновые прокладки, через возможные свищи в верхнем торце термометра, а главным образом через внутреннее уплотнение датчика электрической проводимости. До опускания прибора в воду эти причины визуально не обнаруживаются.

Перед герметизацией корпуса внутрь вкладывается пакет с селитратом не менее 30 г, предварительно прокаленным в течение 2 ч при температуре 150 °С.

Отдельно проверяется герметичность гидрофона гидроакустического канала связи из комплекта УОД путем его полного погружения в воду на глубину 5 м. Проверка кронштейна подвески заключается в контроле глубины канавок тросовых захватов и наличии на них цинковых протекторов, защищающих трос от интенсивной электрокоррозии в точках его контакта с элементами кронштейна АЦИТа, изготовленного из нержавеющей стали.

Соответствие контрольного параметра паспортному значению с допустимыми отклонениями в ± 5 ед. кода свидетельствует об исправности схемы компенсатора и об отсутствии электрических утечек в цепях датчиков АЦИТа. Исправность канала измерения температуры проверяется путем сличения результатов измерений температуры окружающего воздуха с помощью испытуемого АЦИТа и ртутного термометра. Обычно возможная разность не превышает 0,5—1,0 °С. Канал измерения электрической проводимости проверяется с помощью «сухого витка» в три петли, продетого в отверстие индуктивного датчика электрической проводимости и подключенного к магазину сопротивления переменного тока. Нагрузочные сопротивления этого магазина и получаемые значения кодов в исправных приборах не отличаются более чем на ± 5 ед. кода. С целью проверки исправности канала гидростатического давления контролируется соответствие начального значения этого кода паспортному, а также его изменение при перемещении трубки Бурдона, эквивалентное действию внешнего давления. В датчике скорости течения обязательно перед эксплуатацией проверяется отсутствие видимых деформаций пропеллеров, осей, легкость хода пропеллеров, наличие необходимых люфтов во всех механических узлах, целостность агатовых подшипников пропеллеров, а также состояние антикоррозийного покрытия и намагниченность магнитов магнитных муфт.

Кроме того, в поступивших с завода-изготовителя приборах проверяется легкость хода редукторов в блоке потенциометров и функционирование электрической части канала скорости течения. Для этого испытуемый датчик помещается в лаборатории под однонаправленный поток воздуха. Исправность магнитного компаса проверяется путем повторной градуировки в лабораторных усло-

виях с шагом в 30° и сравнения полученных результатов с паспортной характеристикой. Истинное направление на магнитный меридиан можно контролировать с помощью шлюпочного компаса или магнитной буссоли. Канал измерения вертикального угла проверяется путем наклона прибора в пределах $\pm 20^\circ$ в плоскости работы датчика. Наклон прибора в судовых условиях контролируется с помощью тросового угломера. В случае недостаточного уровня жидкости в компасе или угломере в них доливают жидкость (см. табл. 2.1).

Вышеописанный комплекс регламентных работ, проводимый в эксплуатирующих организациях, позволил в конечном итоге повысить достоверность информации, получаемой с АЦИТа, а также снизить ее потери с 30—40 % до 1—5 %. Дополнительно перед проведением наблюдений как в автономном режиме, так и режиме зондирования на научно-исследовательских судах непосредственно в море выполняется контроль сохранности градуировочных характеристик этого измерительного комплекса. Он заключается в проведении сравнительных измерений температуры, электрической проводимости и гидростатического давления с помощью испытуемого прибора и соответственно глубоководных термометров 1-й группы, электросолемера ГМ-65 и термоглубомеров в однородных слоях воды со стабильными термохалинными характеристиками.

В результате в процессе эксплуатации стало возможным уточнять паспортные характеристики АЦИТа по названным измерительным каналам, используя в качестве естественных образцовых мер указанные слои воды.

Получение качественного материала наблюдений с помощью АЦИТа предполагает априорное знание ориентировочной информации о гидрологическом режиме района планируемых инструментальных исследований. На основании этой информации устанавливается переключатель диапазонов измерения удельной электрической проводимости. При значениях удельной проводимости 0,9—3,3 См/м устанавливается 1-й диапазон, а 3,0—5,8 См/м — 2-й диапазон. Угол кронштейна крепления АЦИТа на трос регулируется в пределах 20° — 40° в зависимости от ожидаемого угла наклона буйрепа буйковой станции в месте крепления прибора. Согласно данным о полях скоростей течения рассчитываются характеристики несущей системы буйковой станции и исходя из них даются оценки предполагаемого угла отклонения измерителя от вертикали. При этом следует учитывать, что начальный излом троса в месте крепления АЦИТа составляет порядка 10° . Кронштейн подвески рассчитан на надежное крепление измерителя на трос диаметром 4—9 мм. Сборка и присоединение кронштейна к корпусу АЦИТа, как правило, производится в судовой лаборатории. При закреплении измерителя к тросу рекомендуется в целях страховки использовать для поддержки корпуса канат (диаметр 10—12 мм) с карабином. Карабин крепится за верхнее ограждение прибора.

Для работы АЦИТа в составе автономной буйковой станции в нем предусмотрены режимы цикличности в 5, 15, 30 и 60 мин, которые задаются переключателем. Обычно при установке АЦИТ-А на буйковую станцию дополнительный режим в 30 с из прибора исключается. Это облегчает синхронизацию полученных рядов наблюдений. Следует иметь в виду, что 5-минутная дискретность измерений обеспечивает измерение малых скоростей течения менее 0,5 м/с с относительно большой погрешностью порядка 10 %. В соответствии с этим рекомендуется АЦИТ для измерения скоростей использовать с дискретностью, начиная с 15 мин. Для совмещения инерционных свойств индуктивного датчика электрической проводимости и термометра сопротивления у последнего перед началом измерений необходимо снимать защитный кожух [106]. Тогда его постоянная времени не будет превышать 7 с.

Измерители, работающие в автономном режиме, используют не только в составе аппаратуры буйковых станций, но и при наблюдениях с борта дрейфующего судна или со льда. В этом случае АЦИТ снабжается хвостовым стабилизатором, уменьшающим рысканье прибора и снижающим погрешность измерения скорости за счет некорректного алгоритма осреднения, применяемого в этом приборе.

АЦИТ, работающий в основном 30-секундном режиме зондирования, используется для выполнения измерений *in situ* методом вертикального зондирования с выдержкой на фиксированных горизонтах. В таком случае получают данные об океанографических элементах с паспортной точностью. Длительность выдержки на каждом из выбранных горизонтов должна составлять не менее 2 мин. При постоянной эксплуатации определенного образца данного измерителя в режиме зондирования датчик скорости течения может быть отстыкован от корпуса прибора, что улучшит его габаритные характеристики и упростит работу с ним.

После проведения всех видов работ с АЦИТом в формуляре данного образца прибора должна делаться соответствующая отметка о всех выявленных дефектах, объеме и качестве полученного материала наблюдений, результатах контроля и испытаний. Как показал многолетний опыт эксплуатации АЦИТа, качественный материал наблюдений с его помощью может быть получен только после выполнения всех указанных подготовительных и контрольных работ, а также строгом соблюдении всех остальных вышеизложенных рекомендаций по методике применения и доработке данного средства измерения. При этих условиях потери информации, как правило, не превышают 5—10 % запланируемого объема данных [57].

4.4. Векторный измеритель течения АЦИТ-У-01

Векторный измеритель течения АЦИТ-У-01 — представитель нового поколения автономных цифровых средств измерения океанографических величин типа АЦИТ.

Фактически измеритель АЦИТ-У-01, как указывалось в п. 1.2, предназначен для измерения *in situ* скорости и направления океанического течения, информация о котором представляется в виде широтной и меридиональной составляющих среднего вектора скорости течения за фиксированный интервал времени 10, 30 или 60 мин в зависимости от режима цикличности, установленного в приборе. Полученные данные в каждый цикл измерения записываются во внутреннюю полупроводниковую память АЦИТа-У-01, емкостью 4096 циклов, где они могут храниться длительное (до 2 лет) время, а также передаются на частоте 32 кГц по гидроакустическому каналу связи на расстояние до 2 км. Одновременно измеритель осуществляет звуковую индикацию заданного режима цикличности числом подаваемых коротких гудков. Один гудок соответствует времени осреднения 10 мин, два — 30 мин, три — 60 мин. Основные метрологические характеристики АЦИТа-У-01 приведены в табл. 1.2, а дополнительные погрешности от его наклона, диаграммы направленности датчика скорости и орбитального движения воды не превосходят половины основной.

Для считывания результатов измерений из памяти, приема их по гидроакустическому каналу связи и представления пользователю в единицах измерения скорости (см/с) служит блок обработки данных (БОД). С его помощью также выполняется задание интервала времени осреднения. При всех этих операциях не требуется доступ внутрь герметичного корпуса измерителя, а подключение БОД к нему производится по одnorазрядной шине внешней магистрали (ВМ) через герметичный разъем (ГР) (рис. 4.4).

Для управления измерителем АЦИТ-У-01 с БОД и считывания накопленной информации используется специальный приборный интерфейс обмена сигналами между БОД и АЦИТ-У-01 по 1-разрядной шине ВМ [9]. Этот интерфейс включает в себя передачу от БОД к АЦИТ-У-01 двух команд «Запрос» и «Стирание». Каждая из команд кодируется число-импульсным кодом: «Запрос» образован четырьмя импульсами, следующими с частотой 32768 Гц, а «Стирание» — шестнадцатью.

Передача данных от АЦИТа-У-01 в БОД по шине ВМ выполняется двоичным последовательным кодом с тактовой частотой 8192 Гц сигналами уровня напряжения 5 В каждый раз после выполнения прибором очередного цикла осреднения скорости или по команде «Запрос». В каждом такте длительностью 0,122 мс, равном периоду этой частоты, передается информация об одном двоичном разряде. Перед информационной посылкой следует синхронный импульс длительностью три такта этой частоты. Передний фронт

этого импульса синхронизирован с частотой передачи. Потом осуществляется выдача кодовой последовательности, несущей информацию о номере N измерения, затем широтной $V_{\text{ш}}$ и меридиональной $V_{\text{м}}$ составляющих измеренного вектора скорости. Передача данных о каждом из этих параметров выполняется в 12 тактов. При этом четные значения кодов $V_{\text{ш}}$ и $V_{\text{м}}$ соответствуют восточному и северному направлению течения, а нечетные — западному и северному.

Таким образом, информация, записанная в одну из ячеек памяти, пересылается в БОД для представления ее оператору или передачи в ЭВМ. Длительность всей информационной посылки равна 4,758 мс. В АЦИТе-У-01 также предусмотрено восстановление номера последнего занятого адреса памяти после частичного считывания накопленного массива данных и возвращение прибора в режим измерения.

Функционирование АЦИТа-У-01, согласно его назначению и в соответствии с приведенными техническими возможностями, обеспечивается внутренней структурой прибора (см. рис. 4.4), включающей в себя следующие основные блоки: герконный преобразователь ГкПр; блок векторного осреднения $\sum V_{\text{ш}}$, $\sum V_{\text{м}}$; блок памяти ОЗУ статического типа; формирователь выборок $F_{\text{сб}}$; формирователь выходного кода $F_{\text{вых}}$; коммутатор внешней магистрали КВМ; декодер команд ДК; формирователь адреса памяти и номера цикла F_N ; таймер T , гидроакустический передатчик F_a с пьезоизлучателем.

В рассматриваемом приборе реализован метод векторного измерения скорости течения с помощью двухкомпонентного пропеллерного датчика D_v , положение которого определяется магнитным компасом гониометрического типа с емкостным преобразователем азимутального угла $\beta_{\text{кб}}$ в цифровой код (см. п. 2.5). Для этого при вращении пропеллеров под действием набегающего водного потока поворот каждого из этих пропеллеров на угол $\xi_0 = 180^\circ$ фиксируется герконным преобразователем, который запускает в работу компас. Сигналы с компаса и герконного преобразователя далее обрабатываются в блоке векторного осреднения по алгоритму, заданному уравнениями (3.43) и основанному на алгебраическом суммировании меридиональных и широтных проекций единичных отрезков пути, проходимых потоком воды в направлении осей вращения пропеллеров, за выбранный интервал осреднения (см. 3.5). Фиксирование половины полного оборота каждого пропеллера выполняется преобразователем, описанным в п. 3.3, в процессе взаимодействия магнитов из магнитотвердого сплава ЮНД35ТАА, установленных на осях вращения пропеллеров, и двух пар герконов типа КМ-26.

Данный измеритель течения имеет два режима функционирования: режим измерения и режим хранения и считывания информации из памяти. Указанные режимы задаются состоянием геркона, установленного внутри корпуса и переключаемого подносимым снаружи магнитом-выключателем M_B .

В режиме измерения в момент окончания каждого очередного цикла осреднения скорости из таймера, построенного на кварцевом генераторе 32 768 Гц, выдается через открытый ключ & команда «Пуск», поступающая на запуск в работу формирователей F_{CS} и F_N , а также гидроакустического передатчика F_a . По этой команде результаты измерения в виде значений широтной и меридиональной составляющих среднего вектора скорости течения записываются в блок памяти ОЗУ. Каждая из составляющих кодируется числом с девятью двоичными разрядами, а направление задается четностью — нечетностью этого числа. В результате за каждый интервал осреднения t_0 в память заносится 18 бит информации. Запись этой информации осуществляется в 18 ячеек памяти по одному адресу. Изменение номера адреса ячеек производится каждый раз по команде «Пуск». После окончания занесения в блок памяти ОЗУ измеренных значений $V_{ш}$ и $V_{м}$ формирователем $F_{вых}$ производится их считывание из памяти и передача этой информации, дополненной номером N цикла из формирователя F_N , в гидроакустический передатчик F_a и через коммутатор $ВМ$ — на разъем $ГР$.

По гидроакустическому каналу связи передача данных выполняется на частоте 32 768 Гц 16-позиционным унитарным кодом с время-импульсной системой кодирования. Это обеспечивает защиту гидроакустического канала связи от помех, вызванных реверберацией и наличием отражений от границы вода—воздух [4].

Передача данных по гидроакустическому каналу связи осуществляется только в режиме измерения. В каждый цикл записи результатов измерения в блок памяти по гидроакустическому каналу передается информация о номере измерения, широтной и меридиональной составляющих скорости. Перед началом информационной посылки передается синхроимпульс $СИ$ также длительностью 2 мс, а затем через 0,125 с может передаваться первый информационный импульс. Длительность шага время-импульсного кодирования составляет 7,8 мс. Передача информации об одном значении параметра, закодированного 12 двоичными разрядами, выполняется 3 информационными импульсами, несущими информацию в 16-позиционном унитарном коде, и занимает время не более 0,75 с. Передача всей информации осуществляется одним синхроимпульсом и девятью информационными импульсами за время 2,25 с.

Для посылки указанных синхро- и информационных акустических импульсов на пьезоизлучатель ПЭ из гидроакустического передатчика поступают сигналы требуемой длительности 2 мс, модулированные несущей частотой передачи, равной 32 768 Гц. Амплитуда этих сигналов составляет 230—250 В. Перед началом передачи данных по гидроакустическому каналу связи передатчик формирует, а пьезоэлемент подает звуковые сигналы на частоте 8 192 Гц, свидетельствующие о срабатывании АЦИТ-У-01 в очередной цикл измерения. Число звуковых сигналов гудков

определяется декодером команд ДК, в котором хранится информация об установленной цикличности измерений.

Перевод измерителя в режим хранения и считывания накопленной в памяти информации производится установкой снаружи корпуса магнита-выключателя и замыкания геркона. В результате ключ & закрывается и выдача команд «Пуск» от таймера блокируется, а блок памяти переводится в режим считывания данных. Одновременно формирователь F_N выставляет на адресных входах A_0, A_1, \dots, A_{11} памяти нулевой адрес. Считывание каждого цикла данных производится после подачи от БОД команды «Запрос», которая поступает через коммутатор КВМ в декодер команд, где она дешифрируется и через элемент «ИЛИ» запускает в работу формирователи F_{CS} и $F_{вых}$. Тогда информация, записанная в память по нулевому адресу вместе с номером этого адреса, передается через коммутатор КВМ и герметичный разъем в БОД. При подаче очередной команды выполняется опрос уже следующего адреса памяти и так до тех пор, пока вся записанная в ОЗУ информация не будет считана. Далее выдача данных не производится. Если процесс по инициативе оператора БОД будет прерван, то в момент перевода данного измерителя обратно в режим измерения, номер последнего занятого адреса автоматически восстанавливается формирователем адреса-номера F_N , что обеспечивается устройством данного узла АЦИТа-У-01 [11].

Начальная установка измерителя АЦИТ-У-01 и задание цикличности его работы также производится подачей команд по внешней магистрали от БОД при разомкнутом герконе. Начальная установка происходит при поступлении команды «Стирание», которая дешифрируется декодером и далее по R-входу обнуляет счетчик формирователя F_N , что эквивалентно стиранию всей информации, ранее хранимой в ОЗУ. Задание цикличности производится путем подачи серии команд «Запрос» в проемутке между командами «Стирание». При наличии в серии двух команд «Запрос» измеритель АЦИТ-У-01 устанавливается в 60-минутный режим измерения, одной — в 30-минутный, а при их отсутствии между двумя последовательными командами «Стирание» измерителю задается 10-минутный режим работы. Количество поступивших команд «Запрос» подсчитывается декодером, который в зависимости от их числа устанавливает в таймере различный коэффициент деления кварцовой частоты. Тем самым обеспечивается выдача команды «Пуск» с требуемой периодичностью. Синхронизация таймера производится герконом в момент его замыкания.

Корпус измерителя представляет собой цилиндр, к нижней торцевой части которого крепится двухкомпонентный датчик скорости течения D_v (рис. 4.5). Для обеспечения круговой диаграммы его направленности каждый из пропеллеров установлен соосно внутри цилиндрического обтекателя длиной 132 мм (см. п. 2.4). На этой же крышке располагается герметичный разъем ГР для подключения шины внешней магистрали измерителя, а также закреплен пьезокерамический элемент типа ЭПЧК-17-3, выполнен-

ный из материала ЦТС-19 и представляющий собой излучатель гидроакустического передатчика. Через нижнюю крышку прибора выполнен ввод латунных трубок, в которых размещены герконы,

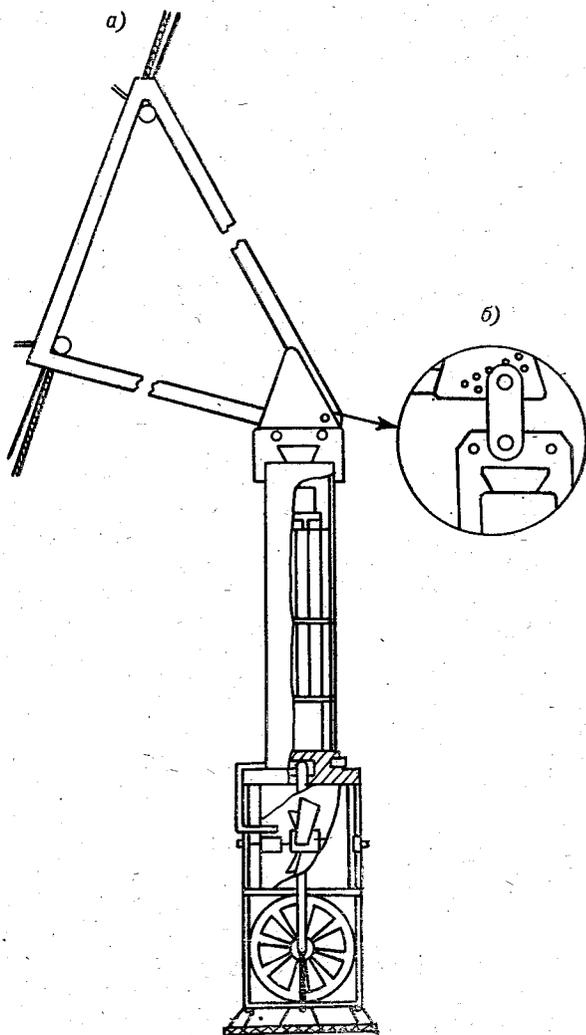


Рис. 4.5. АЦИТ-У-01 (а) и система крепления его к буйрепу на свободной подвеске (б).

преобразующие вращение пропеллеров с помощью $ГкПр$ в последовательность электрических сигналов (см. рис. 4.5). В верхней торцевой части корпуса находятся элементы крепления гидрологического кронштейна. С помощью этого кронштейна, имеющего треугольную форму, осуществляется подвеска прибора на трос. При-

бор имеет две системы крепления — жесткую и свободную (см. п. 4.5 а). Первая система крепления предполагает наличие априорной информации об угле отклонения троса в месте крепления прибора, а вторая — обеспечивает стабилизацию вертикальности его положения под действием собственной массы прибора. Жесткую систему крепления предполагается использовать при наблюдениях в слоях океана с относительно стабильными водными потоками, а свободная — может применяться при малых (менее $0,2 \text{ мс}^{-1}$) скоростях турбулизированного течения и нестабильных положениях троса буйковой станции. Корпуса приборов изготавливаются из титанового сплава ВТ-3В или из композиционного материала. Это предотвращает коррозию и не оказывает влияния на показания магнитного компаса. Кронштейн крепления изготавливается из магнитомягкой стали марки Ст. 3. Система крепления прибора к кронштейну обеспечивает удаленность последнего на 15—18 мм от магнитного компаса, что внесет в его показания погрешности не более $\pm 3^\circ$. В зависимости от расчетной глубины эксплуатации приборов (6000, 2500 или 1000 м) корпуса измерителей имеют различную толщину стенок и соответственно массу 25, 15 и 10 кг. Высота измерителя АЦИТ-У-01 не превосходит 1 м.

Внутри герметичного корпуса расположены магнитный компас, батарейный источник питания и все электронные узлы и блоки прибора. Последние размещаются на 10 печатных платах двух размеров, расположенных вертикально в корпусе двумя рядами по 5 плат в каждом. Батарейный источник питания выполнен в едином сменном блоке и состоит из 12 сухих элементов типа 343А. Все эти элементы объединены в три группы по 4 штуки в каждой и обеспечивают выдачу напряжения 6 В.

Электронная часть прибора практически целиком построена на цифровых высокоэкономичных микросхемах средней степени интеграции серии К561, а его полупроводниковая память ОЗУ выполнена на 18 элементах 537РУЗ. В результате потребление любого образца АЦИТ-У-01 в режиме хранения информации не превышает 0,5 мА, а в режиме измерения и накопления — в среднем 1 мА.

Широкие технические возможности АЦИТ-У-01 создают дополнительные удобства при его эксплуатации. Данный измеритель может применяться при океанографических исследованиях и стандартных наблюдениях в составе аппаратуры автономной буйковой станции или как отдельный прибор с борта дрейфующих судов любого водоизмещения, а также с различных неподвижных или медленно дрейфующих платформ, пирсов, эстакад, льдов и т. п. в океанах, морях, озерах, водохранилищах и устьевых взморьях. Измерения могут производиться в слоях воды с различной пространственно-временной изменчивостью, в том числе поверхностных и придонных слоев океана. БОД АЦИТа-У может эксплуатироваться в стационарных, судовых и полевых условиях как отдельный прибор и как элемент автоматизированной судовой системы сбора и обработки гидрометеорологической информации.

Данный комплекс предполагает возможность непосредственного подключения измерителей АЦИТ-У-01 к средствам вычислительной техники, например к ЭВМ «Искра-1256» [63]. Связь между измерителями и ЭВМ осуществляется в приборном интерфейсе через специальный интерфейсный блок (БИФ) АЦИТа-У, устанавливаемый в ЭВМ. Тогда АЦИТы-У-01, измеряющие *in situ* вектор скорости V течения и связанные с ЭВМ по гидроакустическому каналу связи, образуют совместно с ней автономную информационно-измерительную систему течения, работающую в реальном масштабе времени.

4.5. *STD*-измеритель АЦИТ-У-02

STD-измеритель АЦИТ-У-02 (см. табл. 1.3) является вторым измерительным устройством, входящим в состав комплекса АЦИТ-У, и предназначен для работы на глубинах до 6 км. Измерения выполняются автоматически с временной дискретностью 6 с; 10; 30 или 60 мин в зависимости от программы, установленной в приборе. Полученные результаты записываются во внутреннюю полупроводниковую память и передаются по гидроакустическому каналу связи.

Для считывания данных и приема их по гидроакустическому каналу связи может служить БИФ или БОД, который используется для работы с измерителем АЦИТ-У-01. Дополнительно в АЦИТе-У-02 предусмотрена индикация режима цикличности и данных, записанных в память, на цифровом жидкокристаллическом табло. Визуальное считывание информации с этого табло производится через прозрачный иллюминатор в корпусе АЦИТа-У-02. Подключение БИФ и БОД к АЦИТу-У-02 производится по однопроводной внешней магистрали *ВМ* через одноштырьковый герметичный разъем *ГР* (рис. 4.6). Для управления измерителем АЦИТ-У-02 по командам с БОД и БИФ, а также считывания накопленной в память информации используется тот же приборный интерфейс, что и для АЦИТа-У-01, только в один цикл передается не 30, а 48 бит. Для этого имеется геркон-выключатель *ГкВ* и дополнительный геркон-кнопка *ГкКн*, переключаемые магнитами, расположенными снаружи корпуса прибора. Первый управляется магнитом-выключателем, завинчивающимся в верхнюю крышку прибора, а второй — другим подпружиненным магнитом *МК* с клавишей. По сигналу с геркона *ГкКн* производится вызов из памяти на цифровое табло АЦИТа-У-02 результатов измерений, а геркон *ГкВ* выполняет перевод прибора из режима измерения в режим считывания. Таким образом, в процессе эксплуатации разгерметизацию корпуса АЦИТа-У-02 необходимо осуществлять только для замены батарей питания.

В состав измерителя АЦИТа-У-02 входят следующие основные узлы: датчики D_T, D_R, D_P ; преобразователи напряжения — частота $ПНЧ_T, ПНЧ_R, ПНЧ_P$; блок автокалибровки; ключи $K_{Л_T}, K_{Л_R}, K_{Л_P}$ коммутатора входа датчиков; коммутатор внешней

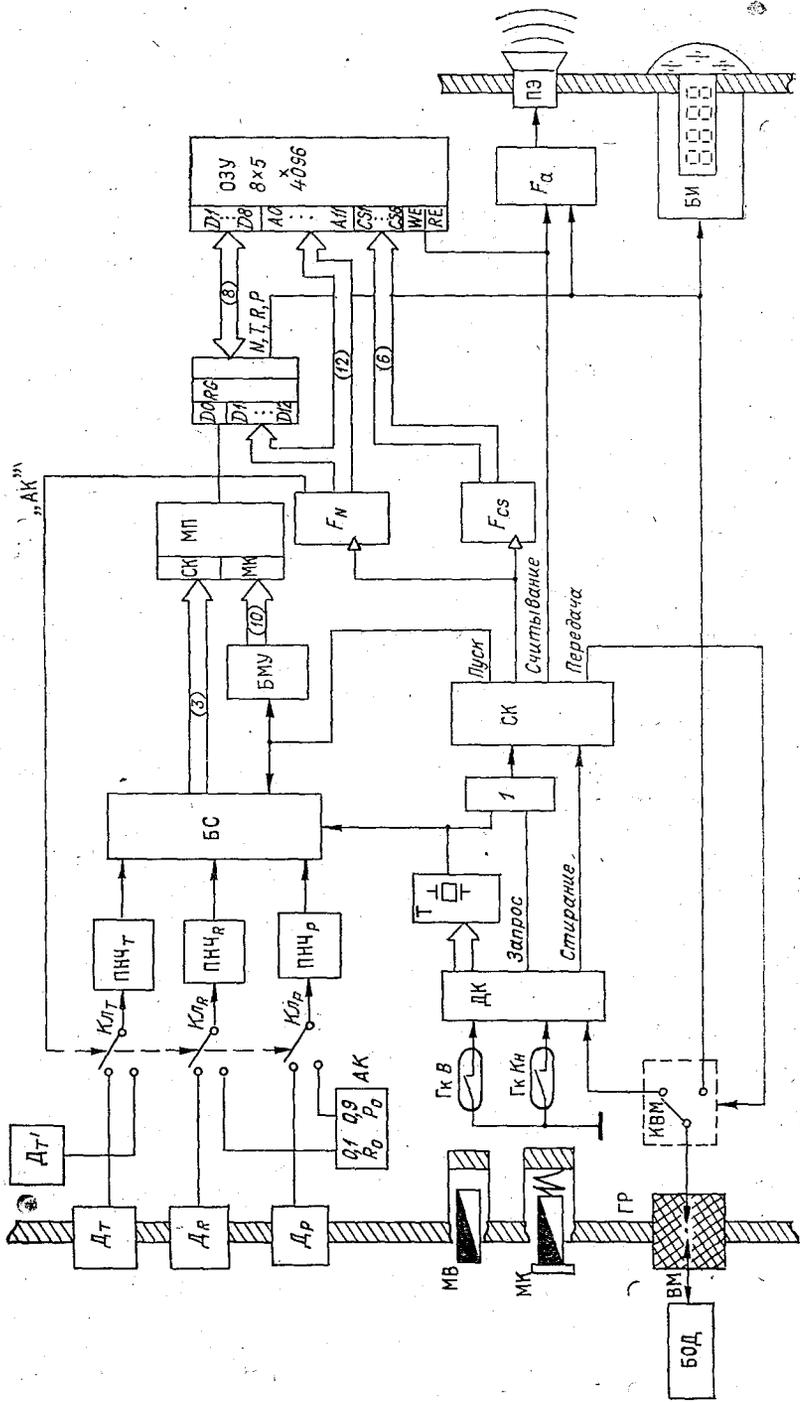


Рис. 4.6. Структурная схема STD-измерителя АЦИТ-У-02.

магистралаи КВМ; блок синхронизации *БС*, блок микропрограммного управления *БМУ*, микропроцессор *МП*, образованный тремя арифметическими устройствами *АУ типа К588ВС2*; блок памяти, оперативное запоминающее устройство *ОЗУ*; универсальный регистр *RG*; формирователь адреса памяти и номера цикла F_N ; таймер *T*; декодер команд *ДК*; гидроакустический передатчик F_a с пьезоизлучателем *ПЭ*; формирователь выборок памяти F_{CS} ; блок индикации *БИ*; системный контроллер *СК*.

В качестве чувствительного элемента датчика температуры использован платиновый 100-омный терморезистор ТСП 365-01 (см. п. 2.1), электрической проводимости — 3-электродная ячейка (см. п. 2.2), давления — полупроводниковый тензопреобразователь Д-100 (см. п. 2.3). Для согласования 0,5-секундной постоянной времени терморезистора ТСП 365-01 с временем обмена воды в ячейке электрической проводимости на последней установлен специальный гидродинамический обтекатель. Мостовые измерительные цепи D_T и D_R выполнены на высокостабильных резисторах *С5-25В* класса 0,2 и работают на постоянном токе. Временной уход номиналов этих резисторов за год в полном диапазоне изменения температуры окружающей среды не превышает 0,01—0,02 %. На этих же типах резисторов собран блок автокалибровки *АК* формирующий напряжения уставок, в состав которого входит 100-омный медный терморезистор для измерения температуры внутри корпуса прибора. Информация о внутренней температуре позволяет не использовать в этом измерителе активного термостата для стабилизации температурного режима входящих в него элементов. Для преобразования аналоговых сигналов D_T , D_R и D_P в частотно-модулированные служат соответственно преобразователи напряжение — частота $ПНЧ_T$, $ПНЧ_R$ и $ПНЧ_P$. Они построены по схеме двухстадийного АЦП с кварцевой стабилизацией выходного сигнала (см. п. 3.2). Диапазон его полного изменения соответствует полному диапазону измерения океанографических величин и составляет 0—4 кГц.

В *СТД*-измерителе АЦИТа-У-02, так же как и в АЦИТе-У-01, различают два режима функционирования: измерение и хранение информации. При наличии ввернутого магнита-выключателя *МВ* в гнездо на верхней крышке прибора геркон *ГкВ* замкнут и АЦИТ-У-02 находится в режиме автоматического измерения *СТД*-параметров. При этом по сигналам, поступающим от таймера, представляющего собой генератор кварцовой частоты 32768 Гц с делителем, запускается в работу системный контроллер, а вслед за ним по сигналу «Пуск» блок синхронизации и блок *БМУ*. В результате блок *БС* практически одновременно формирует три измерительных интервала длительностью 1 с, в течение которых на *СК*-входы квантирования трех *АУ* микропроцессора поступают сигналы с преобразователей $ПНЧ_T$, $ПНЧ_R$, $ПНЧ_P$. Начало этих временных интервалов синхронизировано с фронтами импульсных сигналов указанных преобразователей. Для выполнения микропроцессором операции измерения частоты сигналов с *ПНЧ* блок

БМУ формирует на его командных входах микрокоманду, вызывающую увеличение содержимого аккумуляторов АУ на единицу по каждому сигналу на их СК-входах. В результате к концу этих измерительных интервалов в аккумуляторах МП оказываются получены в виде двоичного 12-разрядного кода значения измеряемых *in situ* температуры T , электрической проводимости R и гидростатического давления P .

По окончании измерительных интервалов БМУ выдает команду для последовательного перенесения кодов, накопленных в аккумуляторах МП, в универсальный регистр RG , а системный контроллер для их по-байтной записи в ОЗУ. Запись результатов одного цикла измерения осуществляется формирователем F_{CS} по одному адресу в 36 ячеек блока памяти. Этот блок полупроводниковой памяти статического типа имеет объем 4096 циклов измерения и построен на 10 микросхемах 537РУ10. Одновременно с записью в память эта информация, дополненная номером N цикла измерения, из регистра RG передается в блок индикации на гидроакустический передатчик F_a и через коммутатор BM — на герметичный разъем. Для этого во время передачи системный контроллер подключает выход универсального регистра RG непосредственно к шине BM .

По окончании этой операции на выходе системного контроллера устанавливается сигнал «Считывание», по которому память переводится в режим хранения информации, а гидроакустический передатчик начинает передавать поступившие данные по гидроакустическому каналу связи. В блоке индикации выполняется масштабирование и преобразование двоичного кода в двоично-десятичный, представляющий на табло индикатора результаты измерения непосредственно в единицах измеряемых физических величин. Точно по такому же алгоритму осуществляется работа АЦИТ-У-02 при подаче команды «Запрос» из внешней магистрали или при нажатии кнопки $G_{КН}$. При этом декодер команд DK дешифрирует поступающую команду и через элемент «ИЛИ» запускает в работу системный контроллер.

Во время выполнения каждого очередного 129-го цикла измерения формирователь F_N формирует команду «Автокалибровка» AK , по которой на входы преобразователей $ПНЧ_T$, $ПНЧ_R$ и $ПНЧ_P$ вместо датчиков подключается блок автокалибровки. Тогда на входы указанных преобразователей взамен сигнала с датчика D_T поступает сигнал с датчика D_T' внутренней температуры, а вместо сигналов с D_R и D_P — образцовые напряжения уставок, равные соответственно $0,1U_R$ и $0,9U_{пит}$, где $U_{пит}$ — напряжение питания датчиков; U_R — сигнал с датчика D_R . Полученные в этом 129-м автокалибровочном цикле измерения результаты записываются в память ОЗУ, откуда они могут быть извлечены после окончания наблюдений и использованы для корректировки измерительной информации.

При отсутствии в гнезде крышки магнита-выключателя $MВ$ и, следовательно, при разомкнутом состоянии геркона $G_{КВ}$ могут

производиться операции стирания памяти и установки режима цикличности измерения. Так же как и в АЦИТе-У-01, декодер в зависимости от числа поступивших команд «Запрос», задает таймеру коэффициент деления кварцовой частоты 32768 Гц и, следовательно, цикличность выдачи таймером сигналов на запуск системного контроллера. В режим хранения и считывания информации из памяти измеритель АЦИТ-У-02 переводится путем вворачивания магнита-выключателя *МВ* в гнездо на верхней крышке прибора, при котором геркон-выключатель *ГкВ* замыкается. При этом блокируется работа таймера на запуск системного контроллера, а также установка на адресных входах *А0*, *А1*,, *А11* блока памяти *ОЗУ* нулевого адреса.

Считывание записанной в память информации производится по сигналам, поступающим по шине *ВМ* либо при нажатии клавиши, вызывающим срабатывание геркона *ГкКн*. В результате по командам с декодера системный контроллер запускает в работу только формирователи адреса и выборки F_N и F_{CS} , которые опрашивают *ОЗУ*. При этом измерительная информация из блока памяти переносится в универсальный регистр, где она дополняется номером *N* цикла измерения, и далее последовательно продвигается через коммутатор *КВМ*

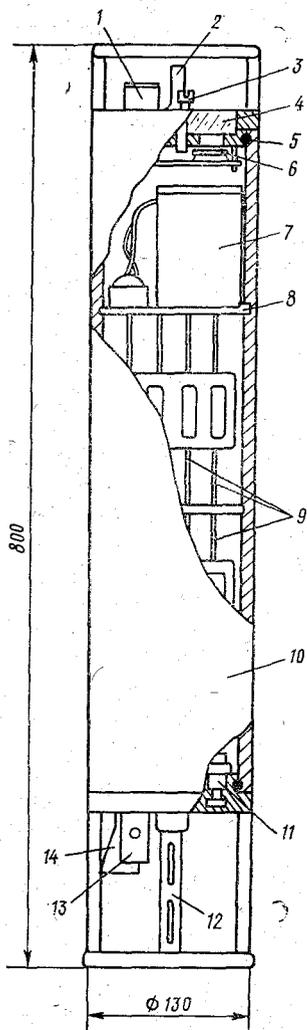


Рис. 4.7. *СТД*-измеритель АЦИТ-У-02.

1 — пьезоэлемент; 2 — рым; 3 — герконный выключатель; 4 — иллиуминатор; 5 — резиновое кольцо; 6 — ИЖЦ; 7 — блок питания; 8 — перегородка; 9 — платы электроники; 10 — корпус; 11, 12, 13 — датчики давления, температуры, электрической проводимости соответственно; 14 — отражатель.

на шину *ВМ*. Одновременно эта информация заносится в блок индикации. Путем нажатия клавиши возможно индицировать на жидкокристаллическом табло прибора результаты измерения каждого из параметров.

Общий вид измерителя АЦИТ-У-02 показан на рис. 4.7. Конструктивно внешний герметичный корпус измерителя выполнен в виде цилиндра высотой 1 м и диаметром 0,11 м, торцевые части

которого загерметизированы двумя съемными крышками: верхней и нижней. Уплотнение крышек — поршневое с помощью резиновых колец 5. На нижней крышке располагаются СТД-датчики: кондуктометрическая ячейка электрической проводимости 13 с гидродинамическим отражателем 14, полупроводниковый тензопреобразователь давления 11, платиновый терморезистор ТСП-365-01 12, защищенные от механических повреждений специальным ограждением. На верхней крышке установлен прочный прозрачный стеклянный иллюминатор 4 для визуального считывания показаний с расположенного внутри корпуса 10 жидкокристаллического цифрового индикатора ИЖЦ 6, клавишный герконный коммутатор 3, герметичный разъем внешней магистрали и рым 2 крепления измерителя к тросу. Корпус измерителя изготавливается из титанового сплава ВТ-3В и рассчитан на глубины до 6000 м. Масса прибора 20 кг.

Внутри герметичного корпуса располагаются на 10 печатных платах 9 все электронные узлы и блоки прибора, его батарея питания 7 и гидроакустический излучатель 1. Батарея питания собрана на 12 сухих химических элементах типа 343А и отделена от остальной части корпуса герметизирующей перегородкой 8. Смена батареи может осуществляться без нарушения герметичности отсека, где располагается электронный измерительно-регистрирующий блок. Элементы батареи объединены в три параллельные группы по 4 штуки в каждой с напряжением 6 В. Гидроакустический излучатель 1 представляет собой стержневой полуволновый вибратор, выполненный на кольцевом пьезокерамическом элементе ПЭ типа ЭПЧК-17-3.

Элементы цифровой автоматики данного измерителя выполнены на микросхемах средней степени интеграции серии К561, а в преобразователях напряжение — частота использованы операционные усилители К140УД12. Общее потребление АЦИТа-У-02 в режиме хранения удалось свести к 2 мА, в режиме измерения за 1 с ток от батарейного источника не превышает в среднем 10 мА, а при работе гидроакустического передатчика — 200 мА.

Автономный измеритель АЦИТ-У-02, так же как и АЦИТ-У-01, может использоваться при наблюдениях в комплексе аппаратуры буйковых океанографических станций и как отдельный прибор. Кроме того, данное средство измерения при 6-секундной временной дискретности может применяться для зондирования океана с борта дрейфующих судов, льдин, а также неподвижных платформ и эстакад.

4.6. Телеизмерительные океанографические станции на базе АЦИТа

Для автоматизации прибрежных морских наблюдений за океанографическими величинами нашли применение два типа телеизмерительных станций, созданных на основе приборов типа АЦИТ (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Метрологические характеристики телеизмерительных океанографических станций на базе АЦИТА

Измеряемый параметр	Диапазон измерения		Основная погрешность	
	„Прилив“	ДУ-МГ	„Прилив“	ДУ-МГ
Температура воды, °С	-2... 38	-2... 38	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$
Электрическая проводимость по отношению к нормальной воде, усл. ед.	0,1—0,9	0,1—1,3	$\mp 0,002$	$\pm 0,001 \pm 0,001R$
Скорость V течения, м/с	0,03—2	0,02—2	$\pm 0,02 \pm 0,1V$	$\pm 0,02 \pm 0,05V$
Направление течения, °	0—360	0—360	± 15	± 10
Уровень воды, м	1—10	1—20	$+4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot \pm 10^{-2}$
Высота H волны, м	—	1—20	—	$\pm 0,1 \pm 0,1H$
Период T волны, с	—	1—10	—	$\pm 0,2 \pm 0,05T$

Одна из таких станций «Прилив» была построена на основе комплекса АЦИТ [77] и предназначалась для дистанционных измерений течения, уровня моря, температуры и электрической проводимости воды с регистрацией на берегу полученных результатов измерений. В комплект данной станции входят: подводный измерительный модуль на базе доработанного изделия АЦИТ-А; соединительная кабельная линия; береговой приемный блок на базе УОД, укомплектованный регистрирующим устройством типа телетайп Т-51.

Подводный измерительный модуль станции «Прилив» был установлен на акватории порта на расстоянии 0,5 км от берега на глубине 8 м. Для установки станции использовалась платформа (рис. 4.8). Основанием платформы служила железобетонная плита размером 2×3 м, массой около 2,5 т с металлической мачтой высотой до 5 м. На мачте были закреплены АЦИТ, использованный в качестве подводного измерительного модуля станции, и самописец ЭСТ, являющийся контрольным прибором.

Связь подводного модуля с береговым блоком осуществлялась кабель-тросом диаметром 9 мм, проложенным по дну моря, а далее от уреза воды — по двухпроводной телефонной линии. Результаты измерений регистрировались на береговом приемном пункте в условных единицах цифрового кода с помощью телетайпа Т-51 и записывались в УОД на магнитофонную кассету МК-60. Измерения и регистрация параметров производились автоматически с периодом 1 раз в 1 ч. Была предусмотрена возможность принудительного включения станции в режим измерения по запросу оператора и визуальный контроль поступающей информации на цифровом табло УОД. Перевод в физические величины значений измеряемых параметров выполнялся вручную по таблицам и программам.

Конструкция, массогабаритные и остальные технические характеристики подводного модуля и берегового блока станции эквивалентны соответственно изделиям АЦИТ-А и УОД.

С целью реализации задач, решаемых с помощью такой станции, базовое изделие АЦИТ-А было дополнено узлом сопряжения с кабельной линией, доработаны датчики измерения гидроста-

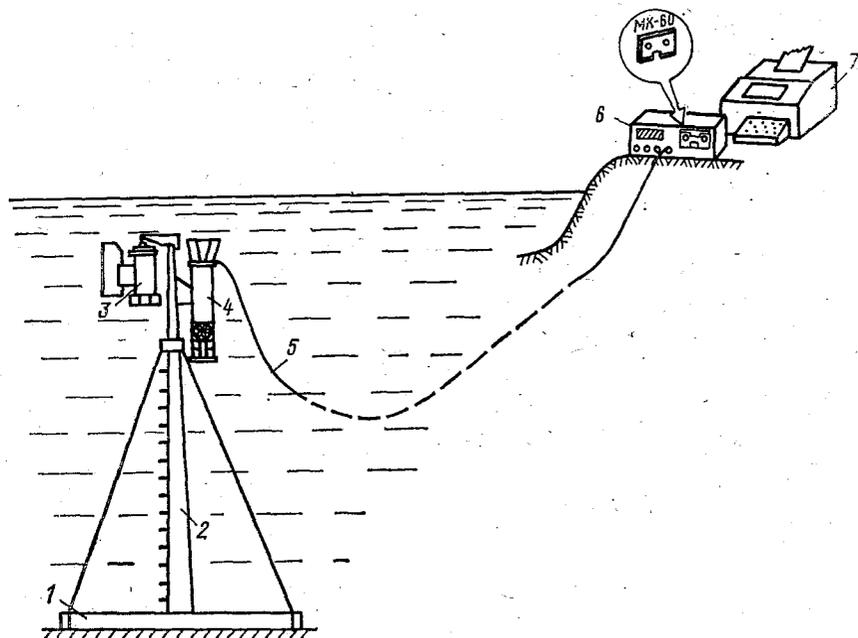


Рис. 4.8. Телеизмерительная станция «Прилив».

1 — платформа; 2 — мачта; 3 — контрольный прибор; 4 — измерительный модуль; 5 — кабель-трос; 6 — УОД; 7 — телегайт.

тического давления и скорости течения. Магнитный компас и датчик угла наклона из конструкции измерительного блока были исключены, ввиду известной жесткой ориентации корпуса подводного модуля в пространстве.

Отличие подводного модуля станции от базового изделия АЦИТ-А в части датчика гидростатического давления заключалось в том, что в нем в качестве вторичного преобразователя был применен индуктивный преобразователь дифференциального типа без магнитных сердечников (см. п. 2.5). Это позволило исключить температурную зависимость и обеспечить линейную характеристику преобразования при некотором снижении чувствительности.

В конструкции датчика давления предусмотрен гидравлический демпфер, исключающий влияние ветрового волнения на показания датчика. Демпфер устанавливался снаружи корпуса подводного блока на входе датчика и представляет собой комбина-

цию из тонкого капилляра и буферной емкости, заполненной воздухом. Принцип действия демпфера аналогичен действию сглаживающего электрического RC-фильтра, где роль сопротивления выполняет капилляр, а роль конденсатора — буферная емкость. Полость демпфера была заполнена очищенным маслом с целью предотвращения засорения капилляра, что обеспечило его постоянную работу около 1—2 мин.

В канале скорости течения вместо потенциометрического блока скорости течения базового изделия АЦИТ-А в подводном модуле станции «Прилив» была установлена электронная счетная схема и герконные преобразователи (см. п. 3.3). При вращении пропеллеров датчика скорости указанные преобразователи формируют электрические сигналы, подсчитываемые реверсивными счетчиками электронной схемы.

Направление течения оценивается по соотношению меридиональной и широтной составляющих с учетом их знака путем построения результирующего вектора скорости.

Передача информации от подводного измерительного модуля на берег осуществлялась двоичным последовательным кодом в асинхронном режиме на частоте 20 кГц. Синхронизация берегового приемного блока выполнялась путем подачи синхроимпульса в начале кодовой последовательности из 108 бит информации. Единицы кодовой последовательности передаются импульсными посылками длительностью 5 мс, заполненными несущей частотой 20 кГц, а нули — отсутствием посылок в очередном такте передачи.

Кабельная линия подключается к телеметрическому передатчику подводного блока через согласующий понижающий трансформатор. Схема этого передатчика аналогична схеме гидроакустического передатчика в изделии АЦИТ. Выходная обмотка трансформатора, имеющая 1 виток, включена последовательно в центральную жилу кабеля. Амплитуда входного сигнала на кабель составляет 200 мВ. Кроме информационного сигнала, по кабельной линии поступает буферное питание на автономный источник внутри измерительного блока, тока — 3 мА. По этой же линии передается сигнал отрицательной полярности для принудительного включения станции на измерение от берегового приемного блока по команде оператора. Соединительная линия может быть образована из отрезков кабеля различного типа применительно к местным условиям. Суммарное сопротивление линии не должно превышать 1000 Ом при общем затухании сигнала до 40 дБ (в 100 раз по напряжению).

Опыт эксплуатации станции «Прилив» показал довольно низкую надежность кабельной линии связи, особенно на акваториях портов с относительной высокой интенсивностью судоходства.

В ААНИИ завершена разработка телеизмерительной океанографической станции нового поколения типа ДУ-МГ (дистанционное устройство морское, гидрологическое). Она предназначена для автоматического измерения температуры и электрической проводимости.

мости воды, скорости и направления течения, элементов поверхностного волнения и уровня по гидростатическому давлению в прибрежной морской зоне на глубинах до 20 м. Измерения выполняются в автоматическом режиме с цикличностью 60 или 20 мин, а полученные результаты передаются на берег. Данная станция по сравнению со станцией «Прилив» обладает более высокими

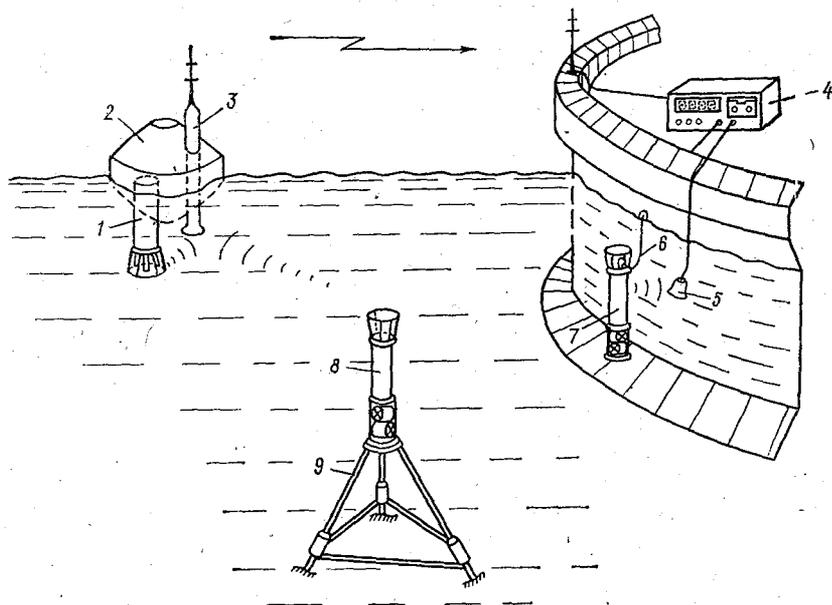


Рис. 4.9. Телеизмерительная станция ДУ-МГ.

1 — CTD-измеритель ДУ-МГ; 2 — буй; 3 — ретранслятор; 4 — береговой приемный блок; 5 — гидрофон; 6 — проводная линия связи; 7, 8 — донный измеритель ДУ-МГ; 9 — тренога.

метрологическими и техническими характеристиками (см. табл. 4.1). В ней предусмотрено для передачи телеизмерительной информации использование не только 2-проводной 2-километровой линии связи, но и гидроакустического и радиоканалов связи соответственно с дальностью 100 м и 5 км.

В комплекс технических средств ДУ-МГ входят подводные измерительные модули в двух модификациях: донный измеритель ДУ-МГ и приповерхностный CTD-измеритель ДУ-МГ, береговой приемный блок или тестер, гидроакустический радиоретранслятор и поверхностный буй (рис. 4.9). Донный измеритель ДУ-МГ производит измерение *in situ* полного перечня указанных океанографических параметров, а CTD-измеритель ДУ-МГ — только температуры, электрической проводимости, давления и элементов волнения. Обе модификации подводных модулей наряду с передачей результатов измерения по гидроакустическому и проводному каналам связи, накапливают получаемую информацию во внутрен-

ней полупроводниковой памяти емкостью 2048 циклов измерения. Ретранслятор служит для приема данных от измерителей ДУ-МГ по гидроакустическому и передачи их по радиоканалу связи. Вся информация, поступающая от измерителей ДУ-МГ по всем видам каналов связи, принимается береговым блоком. Здесь результаты измерений отображаются на цифровом табло, могут записываться на магнитофонную кассету МК-60, передаваться по радиотелеграфным или релейным линиям связи в пункты сбора и обработки информации с сети океанографических прибрежных морских станциях.

Измерители ДУ-МГ выполнены на конструктивной базе изделия АЦИТ-А при полной замене электронной части этих приборов, которая теперь располагается на 22 печатных платах, установленных в корпусах измерителей ДУ-МГ горизонтально. В соответствии с этим массогабаритные характеристики этих измерителей эквивалентны АЦИТ-А. В состав ДУ-МГ (рис. 4.10) входят: датчики температуры, электрической проводимости и давления соответственно D_T , D_R и D_P ; двухкомпонентный пропеллерный датчик скорости D_V с герконным преобразователем $G_{КПр}$ и блоком коррекции характеристик пропеллеров; магнитный компас МК с емкостным преобразователем азимутального угла и цифровым фазовым детектором; счетчики температуры, электрической проводимости, азимутального угла и двух компонент скорости соответственно $СТ_T$, $СТ_R$, $СТ_В$, $СТ_{V_1}$, $СТ_{V_2}$, блок полупроводниковой памяти ОЗУ статического типа; системный контроллер СК; формирователь адреса ОЗУ и номера N цикла F_N ; формирователь выбор F_{CS} ; универсальный регистр сдвига RG ; таймер T с генератором кварцевой частоты 32768 Гц; селектор команд СКом; блок уставок автокалибровки АК; гидроакустический передатчик F_a с пьезоизлучателем ПЭ; блок волнения и уровня; преобразователи напряжение—частота ПНЧ_T, ПНЧ_R двухстандийные с кварцевой стабилизацией выходной частоты; светодиодный индикатор.

В СТД-измерителе ДУ-МГ отсутствуют датчик скорости D_V и магнитный компас МК.

В качестве чувствительного элемента датчика температуры применен медный 500-омный терморезистор, датчика электрической проводимости — кондуктометрическая трехэлектродная ячейка, датчика давления — вакуумированный вибростержневой преобразователь ПДВ-10Б, рассчитанный на давление 1 МПа и помещенный в пассивный пенопластовый термостат. Эти датчики размещены на верхней крышке корпуса прибора. На ней же располагаются герметичный разъем ГР для подключения измерителя к линии связи, гидроакустический пьезоизлучатель ПЭ, геркон-выключатель питания и гнездо для установки магнита-выключателя МВ. Гидроакустический излучатель представляет собой полуволновый стержневой вибратор типа ЭПЧК-17-3. К нижней торцевой части корпуса крепится датчик скорости аналогичный тому, который применен в АЦИТе-А. Вращение от пропеллеров передается

внутри корпуса с помощью магнитных муфт, вызывающих срабатывание герконного преобразователя. На один полный оборот

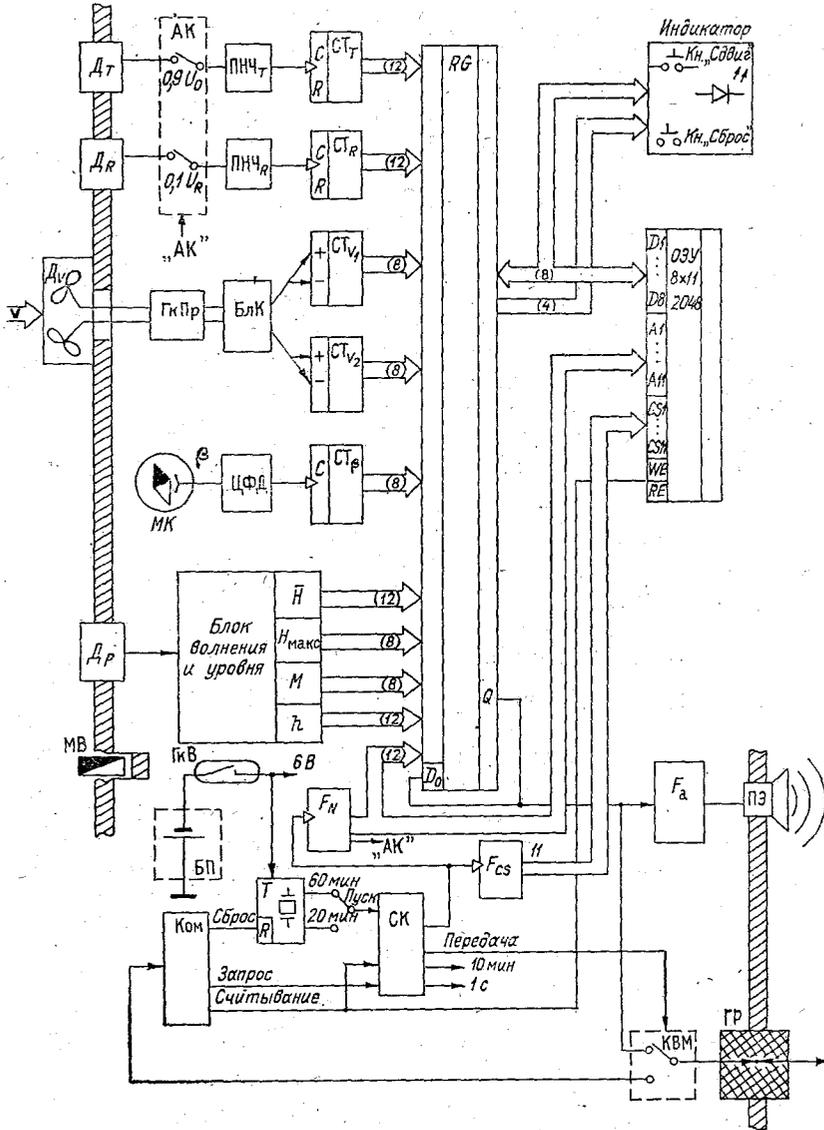


Рис. 4.10. Структурная схема измерителя ДУ-МГ.

муфты герконный преобразователь, состоящий из трех герконов КМ-26, вырабатывает 6 электрических импульсов.

Для управления измерителями ДУ-МГ по проводной линии применен тот же приборный интерфейс одноразрядной шины, что

и для АЦИТа-У-01 и АЦИТа-У-02, но дополненный еще одной командой «Считывание». Данная команда служит для перевода измерителей ДУ-МГ из режима измерения и записи результатов в ОЗУ в режим считывания информации по команде «Запрос». В измерителях ДУ-МГ в отличие от АЦИТа-У-01 и АЦИТа-У-02 при поступлении 16 импульсов частоты 32768 Гц выполняется команда «Сброс», а не «Стирание». По команде «Сброс» производится только синхронизация таймера, но не стирание информации в ОЗУ. Дешифрация указанных команд выполняется селектором команд. Для управления измерителями ДУ-МГ также служит магнит-выключатель, при установке которого в гнездо геркон I_{KB} замыкается. В результате блокируется выдача команды «Пуск» от таймера и подача напряжения от батарейного источника питания на схему измерителя ДУ-МГ. Батарейный источник образован 12 сухими элементами «373». Питание ДУ-МГ осуществляется стабилизированным напряжением +6 В, формируемым стабилизатором, работающим от батарей от 9 до 7,5 В.

Измерения выполняются автоматически по сигналу «Пуск», поступающему от таймера. В зависимости от положения переключателя ПК сигнал «Пуск» выдается с периодичностью 60 или 20 мин.

По этому сигналу запускается в работу системный контроллер, который формирует 10-минутный измерительный интервал на блок волнения и уровня, счетчики CT_{V_1} и CT_{V_2} . В течение этих 10 мин реверсивные счетчики CT_{V_1} и CT_{V_2} осуществляют подсчет количества оборотов пропеллеров датчика D_V и коррекцию нелинейности их пространственных характеристик, вызванной нарушением компонентных свойств этих пропеллеров. Одновременно в блоке волнения и уровня производится обработка сигналов с датчика давления D_P с целью получения информации о средней и максимальной высоте поверхностного волнения, числе зафиксированных волн и уровне, согласно алгоритму, описанному в п. 3.6. Данный измерительный канал ДУ-МГ соответствует устройству, показанному на рис. 3.19. В конце 10-минутного измерительного интервала системный контроллер выдает 1-секундный измерительный интервал, поступающий на счетчики CT_T , CT_R , CT_B . В результате в выходных регистрах указанного блока и счетчиках CT_T , CT_R , CT_B , CT_{V_1} и CT_{V_2} будут получены коды, характеризующие собой значения искомым океанографических параметров (см. рис. 4.10).

После окончания обоих измерительных интервалов системный контроллер выдает команду на параллельную перезапись полученной информации сначала в универсальный регистр RG , а затем — синхросерию из 124 импульсов для последовательного побайтного занесения результатов измерений в ОЗУ. Одновременно в регистр RG разрядностью 120 двоичных разрядов записывается из регистра формирователя F_N номер N очередного цикла измерения. Для организации перенесения из регистра RG в блок памяти

ОЗУ только значащих разрядов кодов со счетчиков формирователь F_{CS} выдает сигналы выборки на CS -входы памяти либо через 8 импульсов синхросерии, либо через 12. При этом выход регистра RG через коммутатор BM и герметичный разъем GP сигналом «Передача» с системного контроллера подключен к кабельной линии связи данного измерителя ДУ-МГ с береговым приемным блоком. В результате информация о номере N цикла измерения, температуре T , электрической проводимости R , двух компонентах скорости течения V_1 и V_2 , азимутальном угле β ориентации корпуса измерителя, средней \bar{H} и максимальной H_{\max} высоте поверхностного волнения, числе M зафиксированных волн и уровне h , полученная в данный срок наблюдения в виде двоичного позиционного кода в указанной последовательности поступает в линию связи. Тактовая частота передачи 4096 Гц, общее число тактов передачи 120, которым предшествует 3 такта синхроимпульса.

По мере передачи результатов измерений ДУ-МГ по проводной линии связи информация из регистра RG заносится в гидроакустический передатчик F_a , который в своем темпе начинает формировать позиционный время-импульсный код, также несущий информацию о значениях измеряемых океанографических величин. Сформированные импульсы излучаются пьезоизлучателем $ПЭ$. Принятая в ДУ-МГ система кодирования данных в гидроакустическом канале связи аналогична той, которая применяется в АЦИТе-У-01 (см. 4.4).

В зависимости от заданного режима вышеописанный цикл работы измерителя ДУ-МГ повторяется каждые 60 или 20 мин.

Периодически 1 раз в сутки или после каждого 24-го цикла измерения выполняется автокалибровка измерительных каналов температуры и электрической проводимости. Для этого по сигналу «АК» на входы $ПНЧ_T$ и $ПНЧ_R$ вместо сигналов с датчиков D_T и D_R подключаются сигналы уставок, равные соответственно $0,9U_0$ и $0,1U_R$, где U_0 и U_R — напряжение питания датчиков D_T и D_R . Результаты измерений по каналам температуры и электрической проводимости, полученные в автокалибровочный цикл измерения, так же как и в обычный, записываются в память ОЗУ и передаются по каналам связи. Тем самым в процессе эксплуатации данной станции появляется возможность контролировать сохранность характеристик измерительных каналов. Автокалибровка производится в промежутке между сроками наблюдений, т. е. последующий 26-й цикл будет выполнен ровно через 1 ч после 24-го, поэтому в каждый срок производится обязательное выполнение океанографических наблюдений.

При необходимости считывания содержимого ОЗУ в селектор команд подается команда «Считывание». Тогда системный контроллер «обнуляет» содержимое счетчиков адреса и номера измерения формирователя F_N . В результате по каждой команде «Запрос» из ОЗУ, начиная с нулевого адреса, производится после-

довательное считывание информации, полученной во всех предшествующих циклах измерения.

Все цифровые узлы и блоки ДУ-МГ выполнены на микросхемах 561-й серии, а блок полупроводниковой памяти — на 11 микросхемах 537РУ10. Остальные узлы и блоки заимствованы у приборов АЦИТ-У-01 и АЦИТ-У-02. К таким узлам относятся магнитный компас, кондуктометрическая ячейка, преобразователи напряжение — частота. Светодиодный индикатор с кнопками управления «Сдвиг» и «Сброс» служит для контроля исправности данного образца ДУ-МГ перед началом его эксплуатации. Аналогичный комплект датчиков и структура построения реализованы в ДКРТ «Вектор».

Входящий в состав описываемой станции ретранслятор представляет собой металлический герметичный цилиндр длиной 1,2 м, диаметром 100 мм, массой 5 кг (см. рис. 4.10). На верхней торцевой крышке этого цилиндра располагается передающая антенна КВ-передатчика, а на нижней — вибростержневой пьезоизлучатель — приемный гидрофон гидроакустического приемника. Внутри этого цилиндра на четырех печатных платах размещены КВ-передатчик (28 МГц; 7,5 Вт), гидроакустический приемник, таймер и блок питания на четырех элементах «373». Для обеспечения экономичного режима работы по питанию автономного ретранслятора ДУ-МГ гидроакустический приемник и радиопередатчик по сигналам от внутреннего таймера включаются на 15 с в моменты времени, предшествующие ожидаемому сроку срабатывания измерителей ДУ-МГ, а затем автоматически выключаются. В этой активной 15-секундной рабочей фазе ретранслятор способен осуществлять прием гидроакустических импульсных сигналов, излучаемых измерителями ДУ-МГ. Эти принятые сигналы в ретрансляторе преобразуются в электромагнитное излучение КВ-передатчика. При этом длительность и интервал времени между радиопосылками ретранслятора точно соответствуют временным соотношениям гидроакустических импульсов.

Береговой приемный блок станции выполнен на базе БОД АЦИТа-У. В отличие от ранее описанного БОДа АЦИТа-У в береговом блоке предусмотрена установка КВ-приемника вместо гидроакустического усилителя и оборудование приемной радиоантенной. Для оперативной проверки измерителей ДУ-МГ перед их установкой служит переносной тестер с батарейным питанием. Тестер позволяет принимать информацию по 2-проводной линии от измерителя ДУ-МГ и передавать к нему команды «Сброс», «Запрос» и «Считывание». Поступающая информация отображается на встроенном 4-разрядном жидкокристаллическом индикаторе.

Подводные модули и береговой блок с помощью ретранслятора или проводной линии связи, как правило, комплексуются в автоматизированную информационно-измерительную систему, работающую в реальном масштабе времени. Эта система предназначена для автоматизации наблюдений на сети прибрежных морских станций Госкомгидромета СССР. Кроме того, измерители

ДУ-МГ могут использоваться как отдельные автономные океанографические средства измерения при их установке на буйковые заякоренные станции на глубины до 100 м.

В зависимости от конкретных условий в прибрежных районах методика применения комплекса ДУ-МГ предполагает различные варианты установки измерителей и их связи с береговым приемным блоком.

Один из возможных вариантов размещения комплекса этой аппаратуры в районах приглубого берега вблизи гидротехнических сооружений показан на рис. 4.9. Приглубый берег характеризуется глубинами 5—7 м уже на расстоянии 10—20 м от береговой черты. В таком случае донный измеритель с полным комплектом датчиков устанавливается на неподвижной платформе, а второй STD-измеритель размещается вместе с ретранслятором на заякорном буе вблизи первого. В качестве платформы может использоваться конструкция, примененная в станции «Прилив» или тренога (см. рис. 4.9). Система крепления STD-измерителя на буй обеспечивает расположение его датчиков на 0,5-метровом расстоянии от поверхности воды, что делает возможным выполнение автоматических измерений океанографических величин в поверхностном слое воды, согласно действующим методическим рекомендациям о проведении морских наблюдений в прибрежной зоне [77]. Информация от подводных измерительных модулей передается по гидроакустическому каналу к ретранслятору и далее по радио — на берег.

В непосредственной близости от гидротехнического сооружения может быть установлен измеритель ДУ-МГ любой модификации. Такая установка дает возможность подключать измеритель 2-проводной линией связи к береговому блоку, что повышает оперативность работы с прибором.

В тех прибрежных районах, в которых возможно однозначно интерполировать данные о температуре и электрической проводимости воды у дна для поверхностного слоя воды, STD-измеритель на буе не нужен. Наоборот, в случае мелководной прибрежной зоны в замерзающих морях при существенных приливах придется отказаться от применения донных измерителей ДУ-МГ, так как информация о течении при таких условиях не может считаться репрезентативной. Подобная картина является характерной для побережья арктических морей, где глубины не более 2 м сохраняются на расстоянии десятков километров от берега. В этом случае ретранслятор следует вмораживать прямо в лед без несущего буя, а измеритель ДУ-МГ жестко крепить на якорю у самого дна.

Описанный комплекс телеизмерительной станции ДУ-МГ, дополненный гидрохимическими датчиками вполне успешно может использоваться для экологического мониторинга прибрежных морских зон.

4.7. Самописец уровня открытого моря «Цунами»

«Цунами» представляет собой автономный океанографический прибор, предназначенный для измерения по колебаниям гидростатического давления уровня открытого моря на глубинах до 1000 м с записью полученных результатов во внутреннюю полупроводниковую память и с передачей их по гидроакустическому каналу связи [24]. Для ведения наблюдений за уровнем данный прибор осуществляет измерения абсолютных значений гидростатического давления на дне моря; отклонения которых от среднего значения, соответствующего глубине его установки, характеризуют собой колебания уровня моря. Диапазон фиксируемых колебаний уровня составляет $\pm 2,5$ м. Самописец также осуществляет измерения температуры окружающей морской воды для введения температурной поправки в показания датчика гидростатического давления. Цикличность измерений составляет 1, 10, 30 или 60 мин. Срок автономной работы 1 год. Общая масса не превышает 30 кг.

Для приема данных по гидроакустическому каналу связи и считывания данных из внутренней полупроводниковой памяти служит блок интерфейсной связи БИФ «Цунами» с ЭВМ «Искра-1256».

Структурная схема «Цунами» (рис. 4.11) включает: датчики давления и температуры D_P и D_T ; счетчики-формирователи измерительных интервалов CT_1 и CT_2 ; счетчики-измерители значений давления и температуры CT_P и CT_T ; коммутатор K в виде набора логических элементов «И»—«ИЛИ»; блок полупроводниковой памяти ОЗУ статистического типа; генератор G кварцеванной частоты 32768 Гц; таймер T ; системный контроллер $СК$; формирователь выборок F_{CS} ; счетчик адреса CT_A ; регистры информации и адреса RG и RG_N ; гидроакустический передатчик F_a с пьезоизлучателем ПЭ; коммутатор внешней магистрали KBM .

В «Цунами» в качестве датчика давления используется вибростержневой вакуумированный преобразователь частотного типа ПДВ-100 Б на диапазон давления до 10 мПа, помещенный в пассивный пенопластовый термостат. Статистическая градуировочная характеристика такого датчика при ее задании интерполяционным полиномом Лагранжа третьей степени обеспечивает предельное значение систематической погрешности по давлению не более $\pm 2,5$ кПа, что эквивалентно $\pm 2,5$ см уровня. Случайная составляющая погрешности измерения давления при внесении поправок каждые $0,02^\circ\text{C}$ измерений температуры не превышает $\pm 1,5$ кПа, что соответствует $\pm 1,5$ см уровня (см. п. 2.3).

В качестве чувствительного элемента датчика температуры самописца «Цунами» используется полупроводниковый терморезистор типа ММТ-4Е-22, включенный в цепь положительной обратной связи автогенератора, собранной на мосте Винна. Такой чувствительный элемент, как известно, может обеспечить измерение температуры с требуемой разрешающей способностью в $\pm 0,02^\circ\text{C}$

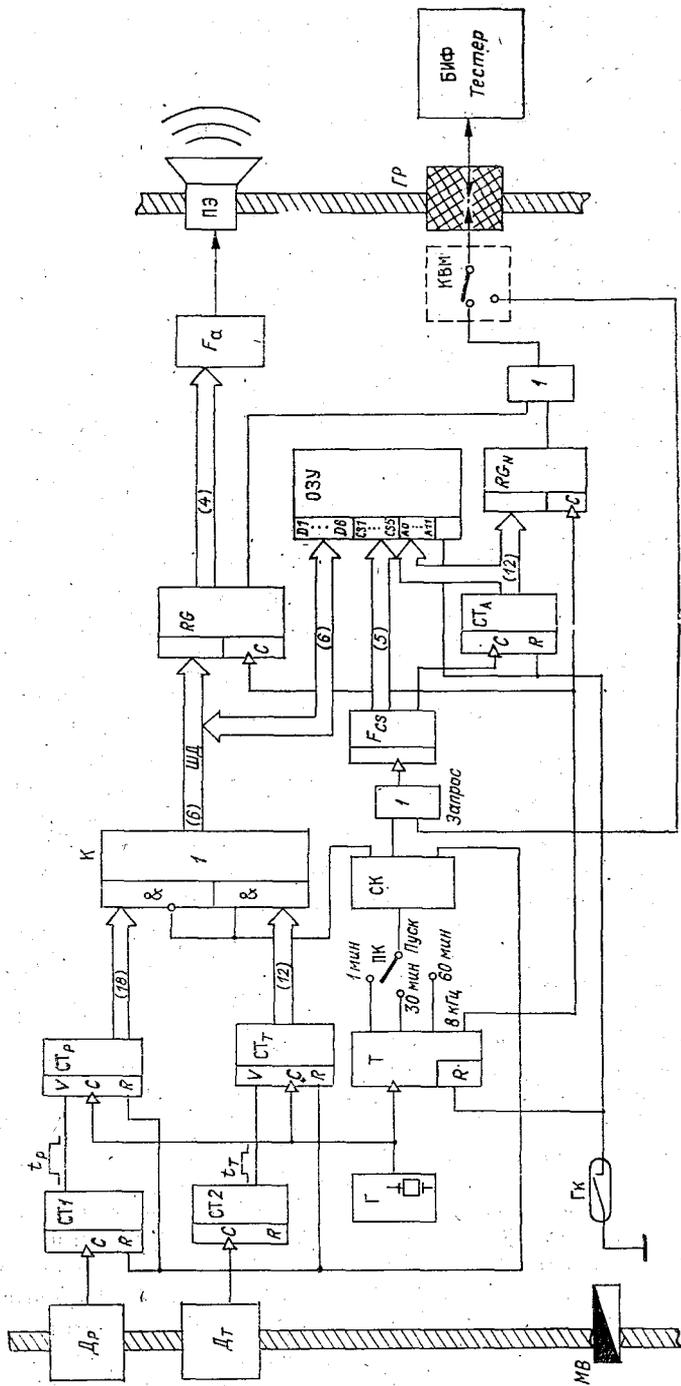


Рис. 4.11. Структурная схема самописца уровня моря «Цунами».

и получить данные для внесения поправок в показания канала давления с необходимой точностью.

Конструктивно «Цунами» оформлен в виде тонкостенного герметичного цилиндра высотой 0,65 м и диаметром около 0,17 м, выполненного из стали. На его верхней крышке расположены датчики D_P , D_T и пьезоизлучатель ПЭ гидроакустических сигналов. Внутри корпуса на 4 печатных платах располагаются электронные схемы самописца и блок питания на 12 сухих элементах типа 165У, что делает возможным проводить наблюдения с дискретностью 1 мин в течение года. Подключение БИФ и тестера к самописцу производится без разгерметизации его корпуса через одноштырьковый герметичный разъем (ГР) аналогично тому, как это делается в приборах АЦИТ-У-01, -02, измерителях ДУ-МГ. Для перевода самописца из режима «Измерения» в режим «Считывание» здесь также служит геркон Гк типа КМ-26, управляемый с помощью магнита МВ снаружи корпуса самописца.

В режиме «Измерение» при отсутствии внешнего магнита разомкнутый геркон Гк выдает на блок памяти сигнал логической «1», устанавливающий ячейки памяти в состояние записи информации, присутствующей на их информационных входах D_1, D_2, \dots, D_6 . Одновременно по сигналу «Пуск» с таймера производится запуск в работу системного контроллера и снимается блокировка с R -входов измерителей CT_T и CT_P . В результате подсчета счетчиками-формирователями импульсных сигналов с датчиков D_P и D_T на R -входах соответствующих счетчиков-измерителей оказываются сформированы временные интервалы t_P и t_T , которые будут пропорциональны измеряемым значениям гидростатического давления и температуры. При этом для обеспечения требуемой разрешающей способности по давлению и температуре при заданной частоте (32768 кГц) заполнения этих временных интервалов емкости счетчиков-формирователей выбраны соответственно равными 2^{16} и 2^{10} двоичных разрядов, а счетчики-измерители работают в режиме двойного переполнения. Таким образом, в последних накапливаются коды K_P и K_T , первый из которых характеризует собой измеряемое значение гидростатического давления в месте установки самописца, а второй — значение температуры окружающей морской воды. Разрядность результата измерения давления в двоичных разрядах равна 18, а температуры — 12. Затем полученные значения кодов K_P и K_T по 6 двоичных разрядов заносятся через коммутатор в блок полупроводниковой памяти ОЗУ и в регистр RG гидроакустического канала связи. После передачи из счетчиков через коммутатор на шину данных (ШД) и далее на входы D_1, D_2, \dots, D_6 блока памяти очередных 6 двоичных разрядов формирователь выборок F_{CS} вырабатывает очередной импульсный сигнал, по которому производится запись информации, закодированной в этих разрядах, в полупроводниковую память самописца. Полупроводниковая память самописца собрана на 15 микросхемах 537РУ8 (РУ10), объединенных по 5 ячеек в 3 листа памяти общей емкостью $7,2 \cdot 10^3$ бит, обеспечи-

вающих запись в общей сложности 6144 циклов измерения. Один цикл измерения, закодированный 30 двоичными разрядами (18 — гидростатическое давление и 12 — температура), занимает 5 ячеек памяти одного адреса. Таким образом, при записи этого цикла формирователь сигналов выборки на входы CS_1 , CS_2 , ..., CS_5 памяти ОЗУ последовательно выдает 5 импульсных сигналов. После заполнения очередного листа памяти выдача сигналов от формирователя F_{CS} производится к ячейкам памяти других листов. После подачи каждые 5 сигналов на выходе формирователя F_{CS} вырабатываются сигналы переполнения, подсчитываемые счетчиком адреса CT_A . Этот счетчик производит переключение листов в блоке памяти, а также хранит информацию о номере N проведенного цикла измерения.

Одновременно с записью информации о результатах измерения самописца в его внутреннюю полупроводниковую память эта информация передается по гидроакустическому каналу связи. Для этого кодовая комбинация, появляющаяся в регистре RG , по 4 двоичных разряда переносится в формирователь гидроакустических сигналов. Там этот двоичный код преобразуется в 16-ричный позиционный код, который в виде временных интервалов передается на гидроакустический излучатель.

Для перевода самописца «Цунами» в режим считывания данных из памяти снаружи к его корпусу подносится внешний магнит МВ. В результате блокируется работа таймера, «обнуляется» счетчик адреса CT_A , а ОЗУ переводится в режим считывания информации. Считывание данных производится по циклам измерения. Для считывания этого одного цикла от тестера или БИФ АЦИТа-У выдается импульсный сигнал «Запрос» — этот сигнал, проходя через герметичный внешний разъем и коммутатор внешней магистрали, запускает в работу формирователь F_{CS} . Он вырабатывает последовательность сигналов, поступающих на соответствующие входы CS_1 , CS_2 , ..., CS_5 памяти ОЗУ. В результате информация из памяти ОЗУ вызывается на шину данных ШД и далее она заносится в регистр RG . По импульсному сигналу, поступившему на R -вход таймера, последний выдает синхросерию из 51 импульса частоты 8192 Гц, действующую по C -входам регистров RG_N и RG . В итоге на выходе RG появляется последовательность видеоимпульсов, несущая в двоичном коде информацию о номере цикла измерения, температуре, среднем значении гидростатического давления и колебаниях уровня. Информация о среднем значении гидростатического давления и уровне формируется из одного результата измерения гидростатического давления, закодированного 18 двоичными разрядами. В этом результате первые 12 разрядов несут информацию о среднем давлении, а последние 12 — о колебании уровня. Таким образом производится кодировка выходных данных самописца «Цунами». Затем эти данные передаются через КВМ к внешним устройствам, в качестве которых могут выступать тестер или БИФ.

Методика применения таких самописцев предполагает их установку на неподвижные платформы на дно моря в месте проведения наблюдений за уровнем. В качестве таких платформ могут использоваться донные самовсплывающие станции с акустическими размыкателями троса типа «ГРОТ» и несущими буйами из синтактики. Первоначально «Цунами» был создан в АНИИ для гидрофизических буйковых станций для системы предупреждений населения приморских районов о приближении морских волн цунами, а также для исследования явлений апвеллинга в открытых районах Мирового океана [24].

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ АВТОНОМНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

5.1. Бортовая аппаратура приема информации с измерителей

Бортовая аппаратура приема и обработки данных, поступающих от подводных средств измерения, служит для представления измерительной информации в форме удобной для восприятия и анализа. Такая аппаратура прежде всего необходима при работе с автономными измерителями, устанавливаемыми на буйковых станциях. Это обусловлено тем, что функциональные возможности этих измерительных приборов ограничены жесткими требованиями к их массогабаритным и энергетическим характеристикам. Подводным измерительным модулям приходится работать от ограниченных по емкости и мощности батарейных источников питания, их размещают в герметичных контейнерах малого объема, способных выдержать высокое внешнее давление до 60 МПа. Масса автономных измерителей должна быть минимальна, чтобы уменьшить нагрузку на несущую систему станции, а число элементов ограничено, чтобы повысить надежность их безотказной работы при длительных сроках эксплуатации. В соответствии с этим непосредственно в самих подводных модулях удается разместить очень ограниченную часть средства измерения, а все остальные устройства, связанные с обработкой и представлением получаемой океанографической информации, вынести в бортовую аппаратуру.

Для реализации сервисных услуг по представлению потребителю измерительной информации АЦИТа предназначено специализированное устройство обработки данных (УОД) (рис. 5.1). Магнитофонная кассета (МК) с записью результатов измерений извлекается из измерителя, считывается на встроенном в УОД кассетном магнитофоне и полученная информация индуцируется на цифровом табло. Эта информация в зависимости от режима, установленного в УОДе, может в коде МТК-2 передаваться в условных восьмиричных кодах и регистрироваться с помощью телеграфных аппаратов Т-50, Т-51, Т-63 и РТА-80 или в зависимости от исполнения УОД вводится в различные типы ЭВМ: «Минск-32», «Искра-125», «Искра-1256», ЕС-1022 или СМ-4, СМ-1300.

Аналогичным образом индицируются и обрабатываются данные, поступающие от измерителей АЦИТ по гидроакустическому каналу связи к гидрофону УОД.

С помощью УОД возможно производить контроль качества магнитофонных лент кассет МК-60 перед их установкой в АЦИТ для записи результатов измерений. При работе с магнитофоном

УОДа в нем предусмотрена обратная перематка ленты. Время обратной перематки полной кассеты МК-60 не более 1 мин.

Работа УОД раскрывается через его структурную схему (рис. 5.2). В состав рассматриваемого устройства входят следующие основные узлы: блок управления, блок памяти (ОЗУ), блок магнитофона, блок обмена ЭВМ, усилитель гидроакустический

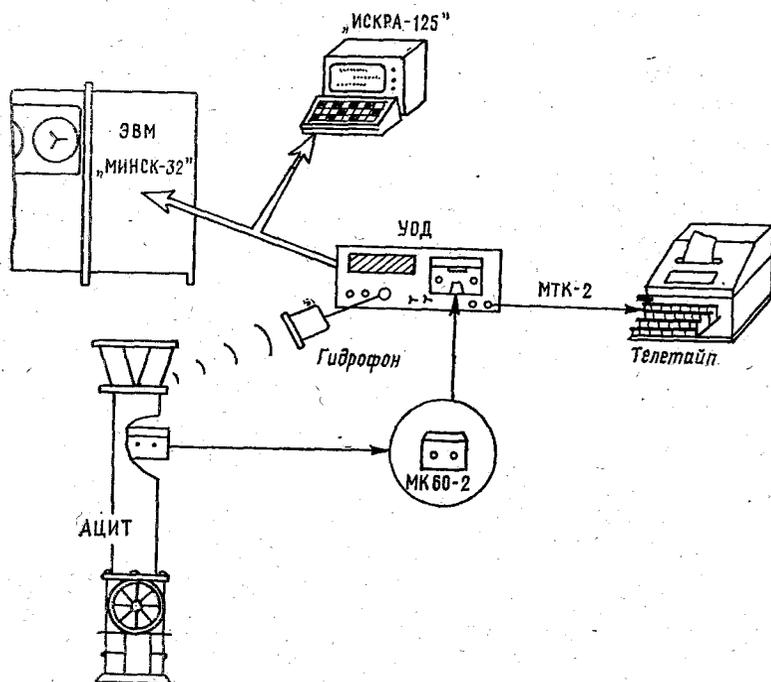


Рис. 5.1. Схема подключения АЦИТа через УОД к телетайпу и ЭВМ.

$У_a$, усилитель воспроизведения магнитной записи $У_b$, кассетный магнитофон, входной коммутатор $K_{вх}$, блок телетайпа, блок индикации, гидрофон со встроенным пьезоэлементом ($ПЭ$) и предварительным усилителем. Данное устройство имеет четыре режима ввода информации от АЦИТа и четыре режима ее вывода на внешние устройства. Режимы независимо задаются положением переключателей «Ввод» и «Вывод», расположенных на лицевой панели блока. В соответствии с режимом работы измерителя АЦИТ ввод данных осуществляется в двух различных форматах «Автоном» или «Зонд», задаваемых положением тумблера УОД одноименного названия, который выведен на лицевую панель прибора.

В указанных режимах УОД независимо от формата входной информации функционирует следующим образом:

Ввод «Акустика». УОД принимает информацию от АЦИТа, поступающую по кабельному или гидроакустическому каналу

связи. Командой на начало приема данных является появление в каналах связи импульсного сигнала длительностью не менее 30 мс. По его заднему фронту происходит синхронизация стробирующих импульсов УОД, следующих с частотой, равной тактовой в 50 Гц (см. рис. 5.2). УОД выдает 108(48) стробирующих импульсов, по которым происходит занесение информации, присутствующей на его входе, в блока памяти.

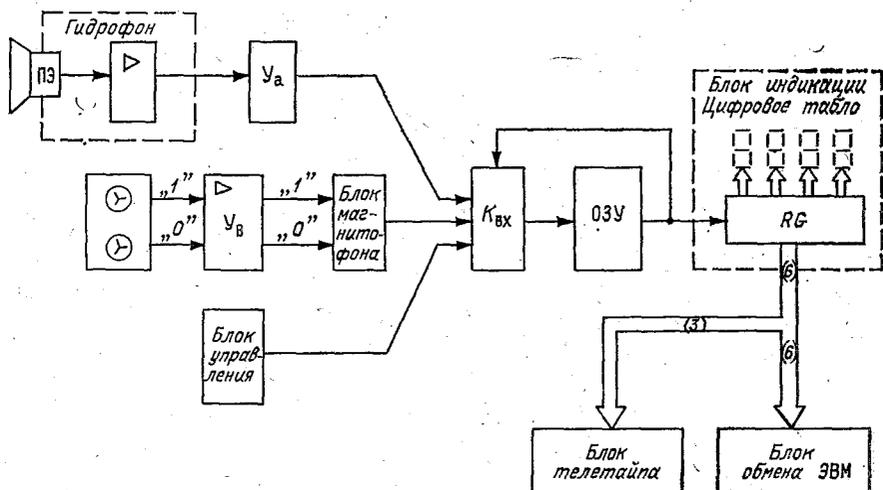


Рис. 5.2. Структурная схема устройства обработки данных АЦИТ.

Ввод «Магнитофон». УОД считывает данные, записанные в АЦИТ на магнитофонную ленту кассеты. Команду на начало воспроизведения этой записи подают кнопкой «Пуск». После этого приходит в движение лентопротяжный механизм, и сигналы «1» и «0», кодирующие результаты измерений АЦИТ, считываются с магнитной ленты. После прохождения усилителя воспроизведения эти сигналы в виде измерительной информации поступают на вход блока памяти. При этом синхроимпульсы для занесения информации в память формируются на схеме «ИЛИ» блока магнитофона из сигналов «1» и «0», считываемых с обеих дорожек магнитной записи. После поступления 108(48) синхроимпульсов УОД автоматически переводится в режим вывода информации и магнитофон останавливается. При разрывах в зоне записи более 8 мкс лентопротяжный механизм магнитофона воспроизведения также автоматически останавливается по команде с блока магнитофона. При этом УОД воспринимает данную команду, так же как нормальное окончание зоны записи, и переходит в режим вывода информации.

При номинальной скорости протяжки ленты, равной в начале кассеты МК-60-2 100 мм/с, а в конце — 50 мм/с, в процессе воспроизведения участок ленты без записи может длиться максимум

0,8 мс и минимум 0,4 мс. Поэтому данная ситуация возможна, если на ленте отсутствуют минимум два и максимум восемь импульсов записи, что соответствует минимальной и максимальной плотности записи, выполненной в АЦИТе.

Ввод «Контроль». УОД заносит в блок памяти тестовую информацию, формируемую непосредственно в блоке управления и представляющую собой сигнал с частотой 100 Гц в виде меандра. В результате при исправном УОДе в его память заносится кодовая посылка, которая при отображении в восьмеричном коде представляет собой последовательность чисел «5252», «2525»; «5252» и т. д. В результате при выводе этой тестовой информации существует возможность проверить все разрядные шины выходных блоков: обмена с ЭВМ, телетайпа и индикации.

Ввод «Повторный вызов». УОД постоянно находится в режиме вывода информации из блока памяти, который замкнут в кольцо. Информация, ранее хранимая в памяти, повторно вызывается из нее для передачи на индикатор, телетайп или ЭВМ.

Вывод «Индикация». Информация из блока памяти по командам оператора в последовательном виде по 12 двоичных разрядов переносится в регистр обмена (RG), входящего в состав блока индикации. Там эта информация по-октадно отображается на четырех 7-сегментных индикаторах в виде восьмеричного кода. Сначала представляется значение первого, контрольного параметра, а затем в указанной в п. 4.1 последовательности вся остальная информация о данном цикле измерения. После вызова из блока памяти всей информации обращение к памяти УОДа блокируется.

Вывод «Телетайп». Информация из блока памяти по 3 двоичных разряда автоматически переносится в последовательном виде в регистр обмена. Из него в параллельном виде значения этих двоичных разрядов передаются в блок телетайпа. В данном блоке происходит преобразование принятой УОДом информации в код МТК-2. Затем в собственном цикле работы блока телетайпа выполняется печать на телетайпной ленте одной цифры измеренного параметра. Таким образом осуществляется регистрация всех данных об одном цикле измерения, ранее записанных в блок памяти.

Вывод «ЭВМ». Информация из блока памяти по шесть двоичных разрядов автоматически переносится в последовательном виде в регистр обмена. Из него значения этих двоичных разрядов в параллельном виде передаются в блок обмена с ЭВМ. В данном блоке происходит преобразование поступающего двоичного кода в байты обмена УОД и ЭВМ и формируется требуемый интерфейс. При этом в организуемых байтах обмена только в шести разрядах присутствует информация о результатах измерения. После передачи в канал ввода ЭВМ одного такого байта из блока памяти вызываются последующие шесть двоичных разрядов. Таким образом осуществляется ввод в ЭВМ результатов измерения всего цикла измерения.

В зависимости от типа используемой для обработки данных АЦИТа ЭВМ в УОДе устанавливаются различные по схеме блоки

обмена с ЭВМ. Они имеют общий вышеописанный алгоритм работы с блоком памяти УОДа, но различную, зависящую от типа ЭВМ, последовательность сигналов (интерфейс), передаваемых в канал связи с ЭВМ (см. п. 5.2).

Вывод «Тест». При данном режиме выполняется контроль качества ленты магнитофонной кассеты. Для этого в режим ввода «Контроль» на обе дорожки проверяемой ленты одновременно записываются импульсные сигналы, следующие с частотой порядка 800 Гц. Затем при режиме ввода «Магнитофон» производится воспроизведение тестовой записи. При этом блок магнитофона УОДа контролирует на обеих дорожках наличие данной тестовой записи. В случае пропадания записи на время 8 мс по любой дорожке происходит автоматическая остановка лентопротяжного механизма магнитофона воспроизведения. Таким образом проверяется наличие непрерывной магнитофонной записи с точностью до 8—12 тестовых импульсов.

Конструктивно УОД представляет собой прямоугольный приборный контейнер с габаритными размерами 135×300×100, массой не более 15 кг. В него установлены печатные платы, на которых располагаются электронные узлы и блоки. Цифровая часть этих узлов выполнена на микросхемах 134-й серии, а аналоговая — 140-й серии [88].

На лицевой панели корпуса УОД располагаются ручки управления, разъемы для подключения линий связи с АЦИТОм, гидрофоном, телетайпом и разъемы сетевого питания от напряжения 220 В, 50 Гц или питания от источника постоянного тока напряжения 12 В. Кассетный магнитофон и цифровое табло располагаются на лицевой панели прибора.

Более широкие функциональные возможности по представлению измерительной информации потребителю имеются у блока обработки данных (БОД) автономного измерителя течения АЦИТ-У-01. Данное устройство предназначено для работы как с приборами АЦИТ-У-01, так и с приборами АЦИТ. Информация, поступающая от обоих типов измерителей, может индицироваться на встроенном жидкокристаллическом цифровом табло, регистрироваться на телетайпных аппаратах Т-50, Т-51, Т-63, РТА-80, а также записываться на магнитофонные кассеты МК-60-2 и передаваться в интерфейсе RS-232 в ЭВМ. Магнитофонная запись БОДа воспроизводится в старт-стопном режиме на том же кассетном магнитофоне, на котором она была сделана. Средняя скорость протяжки магнитной ленты при записи/воспроизведении 10 см/с. Индикация и печать на телетайпе результатов измерений АЦИТа-У-01 производится непосредственно в единицах измерения скорости: см/с, с указанием знаком «—» западного и южного направлений измеренных составляющих вектора течения.

Конструктивно БОД, так же как УОД, представляет собой приборный контейнер тех же массогабаритных характеристик. На его лицевую панель выведены ручки управления, кнопки «Пуск», «Сброс», «Стирание», а на заднюю панель — разъемы для подклю-

чения гидрофона и линий связи с измерителями АЦИТ-У-01 и АЦИТ, ЭВМ и телетайпом. Здесь же располагается магнитофон записи/воспроизведения и цифровое табло. Внутри данного контейнера размещены 10 печатных плат, обеспечивающих функционирование БОД согласно его назначению. Цифровая часть схемы БОД построена на микросхемах средней степени интеграции К561-й серии, а усилители — на К140УД12. Блок питания БОДа выполнен в виде отдельного конструктивного модуля, располагаемого внутри приборного контейнера. В БОДе предусмотрено два вида питания: от промышленной сети напряжения 220 В, 50 Гц и от батарейного источника постоянного тока.

Работа БОДа раскрывается через его структурную схему (рис. 5.3). В состав данного устройства входят следующие основные узлы: гидрофон со встроенным предварительным усилителем, гидроакустический усилитель, блок синхронизации, кассетный магнитофон с лентопротяжным механизмом без тон-вала, усилитель воспроизведения $У_{в}$, блок магнитофона, входной коммутатор $K_{вх}$, блок управления, блок памяти (ОЗУ), буферный регистр информации RG , блок обмена $C2/RS-232$, блок масштабирования и преобразования кодов ($2^{12} \rightarrow 10_2$), блок индикации с цифровым табло, блок телетайпа.

БОД предусматривает четыре режима ввода информации: «Акустика», «Память», «Контроль», «Магнитофон» и пять режимов ее вывода: «Индикация», «Телетайп ручной», «Телетайп автомат», «Магнитофон», «ЭВМ». Указанные режимы задаются положением двух переключателей «Ввод»—«Вывод», расположенных на лицевой панели блока. Работа блока по приему данных и их передаче на внешние устройства осуществляется циклически путем обработки и перекодировки массива информации одного цикла измерения АЦИТа-У-01. При этом входная информация сначала заносится во внутреннее ОЗУ, а затем после ее преобразования в требуемом темпе выдается на внешние устройства: цифровое табло, телетайп, магнитофон, ЭВМ. В зависимости от установленных режимов «Ввод—Вывод» БОД функционирует следующим образом.

Ввод «Акустика». Принятый с помощью гидрофона и усиленный в гидроакустическом усилителе сигнал поступает в блок синхронизации. В этом блоке осуществляется преобразование позиционного унитарного время-импульсного кода в последовательный двоичный, который с тактовой частотой 32 Гц заносится в ОЗУ.

Преобразование начинается по переднему фронту синхроимпульса, предшествующего информационной посылке. Одновременно с целью снижения вероятности сбоя при приеме данных выполняется стробирование входа гидроакустического усилителя на время реверберационной помехи, выделение ложных акустических сигналов, коррекция синхронизации.

Ввод «Память». Прием данных от АЦИТа-У-01 начинается по переднему фронту синхроимпульса, посылаемого измерителем в шину «Внешняя магистраль» (ВМ), которой он связан с БОД.

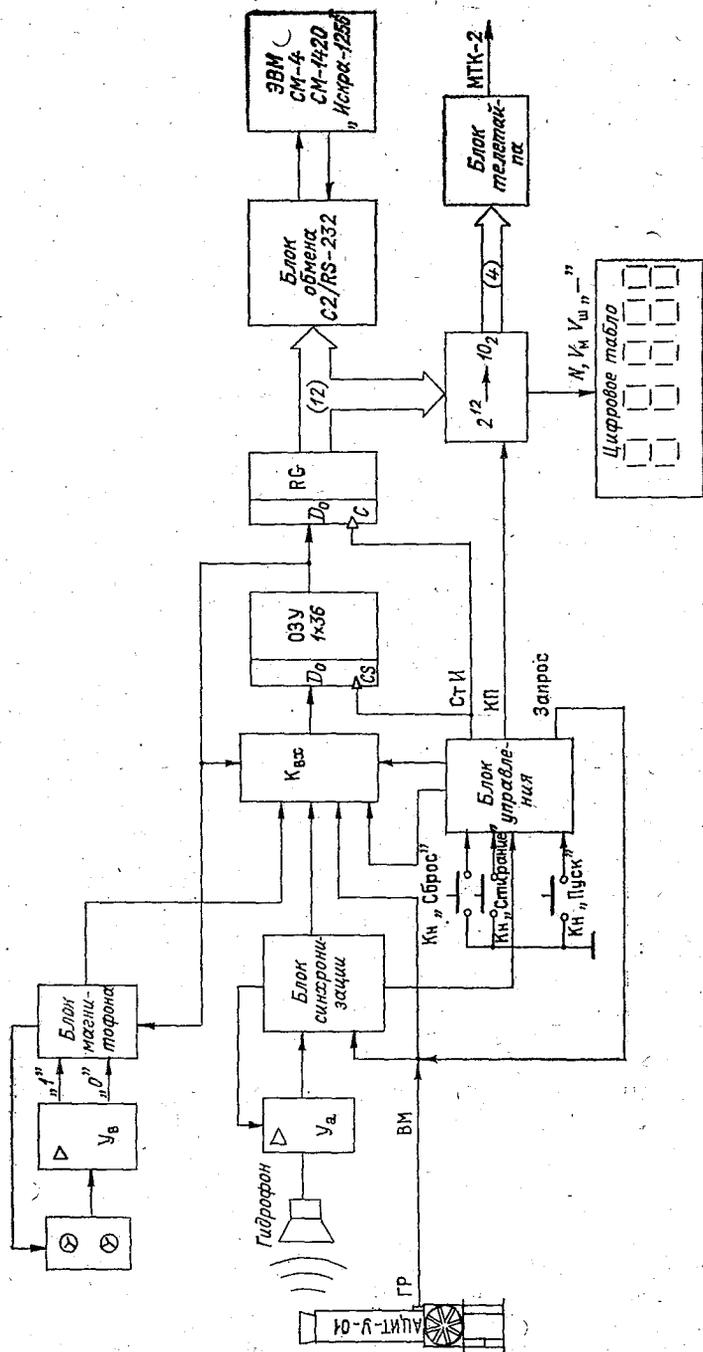


Рис. 5.3. Структурная схема блока обработки данных АЦИТа-У.

В результате блок синхронизации через интервал времени, равный длительности синхроимпульса (366 мкс), выдает на блок памяти последовательность из 36 стробирующих импульсов, следующих с тактовой частотой передачи 8192 Гц. В результате в ОЗУ БОДа будет занесена информация об очередном цикле измерения, выполненном АЦИТом-У-01 или считанным из его полупроводниковой памяти. Кроме того, БОД обеспечивает посылку в кабельный канал связи команды «Запрос», инициирующей АЦИТ-У-01 к передаче в канал результатов последующего цикла измерения. Команда «Запрос» формируется в блоке управления кнопкой «Пуск», а также автоматически по завершении печати строки телетайпом, завершении передачи цикла данных в канал связи с ЭВМ, или окончании записи цикла данных на магнитофонную кассету.

Ввод «Магнитофон». В этом режиме воспроизводится магнитофонная запись, ранее полученная при считывании информации из памяти АЦИТа-У-01. Режим воспроизведения стартовый по зонам записи. Объем одной зоны записи соответствует объему информации в одном цикле измерения АЦИТа-У-01, т. е. 36 двоичным разрядам. Командой на начало считывания магнитофонной записи является нажатие кнопки «Пуск». При этом лентопротяжный механизм приходит в движение и информация, считанная с магнитной ленты заносится в ОЗУ. Одновременно с целью повышения надежности воспроизведения данных блок магнитофона производит непрерывный анализ временных соотношений сигналов, поступающих с магнитной ленты, и при необходимости восстановление отсутствующих импульсов согласно алгоритму, предложенному в работе [8].

Ввод «Контроль». Режим предназначен для контроля работоспособности БОДа. В блоке памяти по нажатию кнопки «Пуск» заносится тестовая информация, формируемая в блоке управления и представляющая собой импульсы частотой 16 384 Гц с периодической (через 6 импульсов) сменой фазы сигнала. Стробирование информации выполняется сигналом с частотой 32 768 Гц. В результате при исправном БОДе в его память заносится кодовая посылка, которая при выводе на табло индикации отображается последовательностью чисел «0683», — «683», «1365», «—683».

Вывод «Индикация». В этом режиме БОД обеспечивает поочередное (с каждым нажатием кнопки «Пуск») считывание из блока памяти и отображение на индикаторном табло значений параметров очередного цикла измерения.

При этом при очередном замыкании кнопки «Пуск» из блока памяти считываются и заносятся в буферный регистр RG 12 двоичных разрядов, соответствующих значению одного параметра. По завершению этой операции в блоке управления формируется управляющий сигнал «Конец считывания параметра» (КП), вызывающий преобразование двоичного кода (2^{12}) регистра RG сначала в число-импульсный, а затем в двоично-десятичный (10_2). Одновременно с кодовым преобразованием в блоке масштабиро-

вания выполняется деление исходной кодовой комбинации, несущей информацию о составляющих вектора скорости, на 2 и формирование знака «—» при нечетных значениях этого кода. В результате показания АЦИТа-У-01 отображаются на цифровом 4-разрядном десятичном табло БОДа в единицах скорости (см/с) со знаковым признаком направления этих составляющих. Последующий прием очередного цикла измерения может быть осуществлен после замыкания кнопки «Сброс».

Вывод «Телетайп автомат». Устанавливается одновременно с выводом «Память». Тогда БОД в автоматическом режиме производит считывание информации из памяти подключенного к нему измерителя и построчную печать результатов одного цикла измерений. Преобразование и масштабирование поступающей информации выполняется аналогично режиму «Индикация». Полученный таким образом двоично-десятичный код далее в блоке телетайпа поочередно по каждой десятичной цифре преобразуется в МТК-2 [12]. После окончания печати последнего значения параметра, вызванного из АЦИТа-У-01 цикла измерения, БОД автоматически формирует на шине ВМ команду «Запрос». После считывания всего объема памяти АЦИТа-У-01 работа телетайпа прекращается.

Вывод «Телетайп ручной». Отличается от режима «Телетайп автомат» лишь отсутствием команды «Запрос». Печать данных производится лишь в моменты срабатывания АЦИТа-У-01 по программе от таймера или при его запуске от внешних устройств.

Вывод «ЭВМ». В этом режиме производится посимвольная передача данных из ОЗУ в ЭВМ в формате, удовлетворяющем требованиям интерфейса RS-232.

При этом считывание информации из ОЗУ и занесение ее в регистр *RG* выполняется группами по 6 двоичных разрядов. Затем 6-разрядный двоичный код из этого регистра *RG* передается в блок обмена *C2/RS-232*, где он преобразуется в два символа обмена в формате КОИ8_i (п. 5.2). Символы поочередно пересылаются в канал связи с ЭВМ с соблюдением требований интерфейса RS-232. После завершения передачи в ЭВМ второго символа из ОЗУ считывается, а в буферный регистр заносится информация о следующих 6 двоичных разрядах.

Вывод «Магнитофон». Устанавливается одновременно с режимом ввода «Память», тогда данные, поступающие от измерителя АЦИТ-У-01 по шине ВМ в БОД, записываются на магнитофонную кассету в формате АЦИТа-А.

С целью сокращения времени записи данных на кассету осуществляется непрерывное протягивание магнитофонной ленты на скорости воспроизведения без использования старт-стопного режима работы лентопротяжного механизма. При этом считывание данных из ОЗУ и их запись на магнитную ленту осуществляется с частотой стробирующих импульсов, равной 1 кГц, что обеспечивает требуемую плотность записи 5—10 бит/мм. При этом момент вызова информации из ОЗУ сдвинут от начала движения ленто-

протяжного механизма на 150 мс для формирования на магнитофонной ленте межзонного промежутка, свободного от записи. Каждое включение этого механизма в работу сопровождается выдачей в шину связи с АЦИТа-У-01 команды «Запрос».

Работа БОД в режиме вывода «Магнитофон» прекращается с нажатием кнопки «Сброс» или автоматически при отсутствии информации со стороны АЦИТа-У-01 в ответ на очередную команду «Запрос».

Кроме перечисленных режимов обработки данных БОД используется для задания программы-цикличности работы измерителя АЦИТ-У-01. Для этого во внешнюю магистраль к АЦИТу-У-01 от БОДа по каждому нажатию кнопки «Пуск» выдается команда «Запрос», представляющая собой 4 импульса, следующих на частоте 32 768 Гц. При одновременном нажатии кнопок «Пуск» и «Стирание» во внешнюю магистраль поступает 8 таких импульсов, соответствующих команде «Стирание», а одновременное нажатие кнопок «Пуск» и «Сброс» формирует 16 импульсов команды «Считывание», используемой при работе с измерителями ДУ-МГ.

Блок обработки данных такой конструкции на практике после незначительных доработок используется для работы с СТД-измерителем АЦИТ-У-02 и в качестве берегового приемного блока телеизмерительной океанографической станции ДУ-МГ.

5.2. Аппаратные средства сопряжения измерителей с ЭВМ

Высокая производительность современных океанографических средств измерения и масштабы проводимых с их участием натуральных экспериментов [60, 90, 96, 97, 98] настоятельно требуют автоматизации процесса обработки материалов инструментальных наблюдений. По отношению автономных океанографических приборов выдвинутое требование является наиболее актуальным, поскольку многие из них представляют результаты измерений в условных единицах и кодах. В итоге необходимый объем обработки существенно дополняется операциями, связанными с получением материалов наблюдений в общепринятых единицах измерения. Например, при проведении в океане натуральных экспериментов с привлечением трех—четырёх буйковых станций с АЦИТами, устанавливаемых на пяти—шести горизонтах, объем получаемой исходной информации достигает 5—10 Мбит [59]. Это делает ее ручную обработку крайне не оперативной, а получение достоверных научных результатов становится проблематичным.

Следует признать, что наилучшее решение задачи автоматизации сбора и обработки океанографических данных достигается при прямом вводе информации с подводных измерительных модулей в ЭВМ, без участия любого вида промежуточных технических носителей [65, 116]. Однако в силу целого ряда указанных технических причин в большинстве автономных океанографических приборов передача накопленного массива в средства вычислительной техники осуществляется с использованием магнитных лент,

магнитофонных кассет, перфолент и т. п., а также с привлечением различного вида специализированных устройств сопряжения. Например, в измерителях фирмы «Стьюбер» для этого служит бортовой блок SLS-02, сопряжение АЦИТа с ЭВМ выполняется через УОД, а измерителей АЦИТ-У-01, АЦИТ-У-02 и ДУ-МГ — через БОД АЦИТа-У.

В настоящее время при автоматизированной обработке данных АЦИТа наиболее часто используются ЭВМ СМ-4, СМ-1300, «Минск-32», а иногда ЕС-1022 и «Искра-1256». Во всех этих случаях связующим звеном между измерителем и ЭВМ выступает магнитофонная кассета с записью результатов измерений и УОД (см. рис. 5.1).

С этой целью в состав стандартного изделия УОД включен блок обмена с ЭВМ «Минск-32», выполненный в виде отдельной печатной платы М-32, а сам УОД подключается к стойке фотоввода УВВЛ-23 ЭВМ вместо фотосчитывающего устройства FS-1501.

Тогда в режиме ввод «Магнитофон» — вывод «ЭВМ» УОД обеспечивает считывание и передачу данных, записанных АЦИТом на магнитофонной кассете, в ОЗУ ЭВМ, используя ее симплексный канал чтения перфоленты. Блок обмена формирует на входе стойки УВВЛ-23 электрические сигналы, имитирующие чтение информации с перфоленты (рис. 5.4). В его состав входят ключи &1—&7, элемент «ИЛИ», формирователи F1, F2, обеспечивающие требуемый интерфейс обмена сигналами между УОДом и ЭВМ, а также преобразователи уровня FS, СИ, Г, «1», «2», «4», «8», «А», «Б», «М». Последние обеспечивают согласование уровней сигналов на выходе в УОДе и шинах ЭВМ. Конструктивно указанные элементы автоматики выполнены с помощью микросхем 134-й серии. Преобразователи уровня СИ, Г, «1», «2», «4», «8», «А», «Б», «М» собраны на транзисторах КТ363Л, а преобразователь FS — на транзисторе КТ315Б.

Командой к началу обмена информацией между УОДом и ЭВМ «Минск-32» является выдача ЭВМ сигнала «Пуск FS», по которому в рассматриваемой плате вырабатывается сигнал «Пуск ЭВМ». В результате блок управления УОДа включает лентопротяжный механизм магнитофона воспроизведения и данные с магнитофонной кассеты АЦИТ начинают считываться и поступать в УОД. Они накапливаются в регистре обмена (RG) блока индикации и далее по 6 двоичных разрядов через соответствующие преобразователи уровня «1», «2», «4», «8», «А», «Б», расположенные в плате М-32, передаются на информационные шины 1, 2, 4, 8, А, Б ЭВМ. Командой на занесение данных об этих разрядах в ОЗУ ЭВМ является сигнал «Конец формирования символа обмена» (КФСО). По его заднему фронту на выходе преобразователя СИ возникает синхро-импульс отрицательной полярности — 10 В. В результате за 1 байт обмена передается информация о 6 двоичных разрядах результата измерения первого параметра АЦИТа. Через некоторую временную задержку, задаваемую эле-

ментом $D1$, плата обмена выдает сигнал «Конец обмена» (КО), по которому в регистре RG подготавливается информация о последующих 6 двоичных разрядах первого параметра. Аналогич-

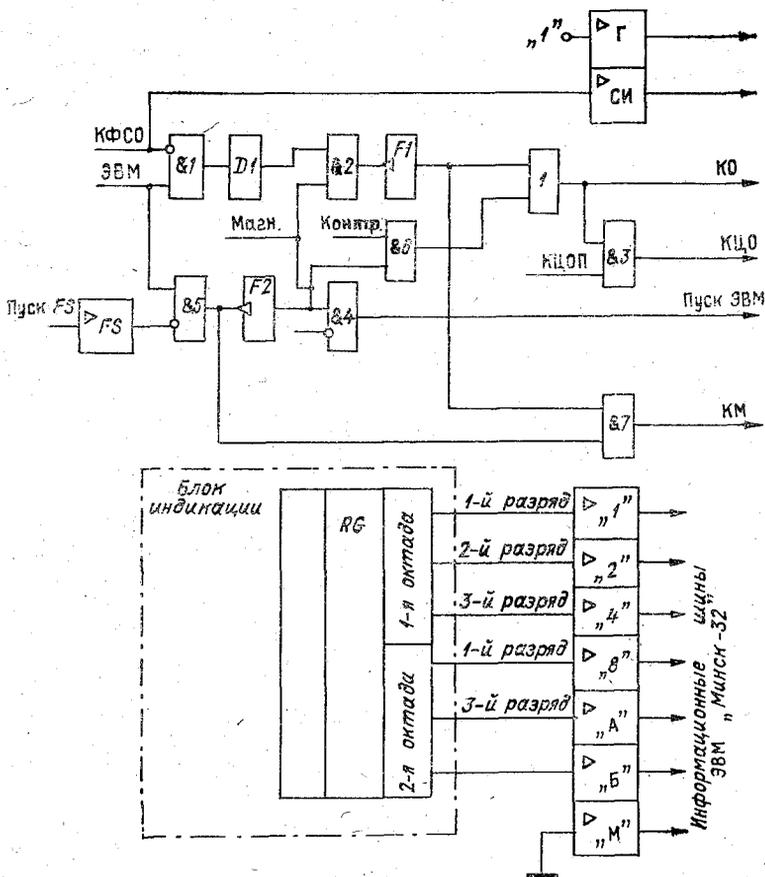


Рис. 5.4. Функциональная схема блока обмена ЭВМ «Минск-32».

ным образом в ОЗУ ЭВМ «Минск-32» вводятся данные об остальных параметрах. Информация об одном параметре пересылается за 2 байта обмена, а о всем цикле измерения за 18 или 8 байтов в зависимости от его режима работы «Автоном» или «Зонд». В момент окончания передачи в ОЗУ последнего в цикле 18-го или 8-го байта обмена рассматриваемая плата УОДа выдает команду «Конец цикла обмена» (КЦО). По этой команде в его блок памяти заносятся данные о новом цикле измерения.

После окончания ввода в ЭВМ всего заранее запланированного объема информации, заданного программным путем в виде числа циклов измерения, ЭВМ снимает команду «Пуск FS». По ее заднему фронту формируется сигнал «Конец массива» (КМ),

ведущий к окончанию связи УОДа и ЭВМ «Минск-32». Повторный ввод данных АЦИТа в данную ЭВМ возможен только после новой загрузки программы обработки данных.

Время ввода в ЭВМ информации с полной магнитофонной кассеты МК-60-2 с 3000—4000 циклов записи не превышает 15—20 мин.

Аппаратурная реализация симплексных каналов связи УОДа с ЕС-1022 выполнена аналогичным образом. Для этого имеются две модификации печатных плат блока обмена ЕС-6022 и ЕС-7903 (М), которые устанавливаются в УОД вместо платы М-32.

В зависимости от типа устройства фотоввода первая из этих плат позволяет организовать требуемый канал связи, подключая УОД вместо фотосчитывающего устройства FS-1501 к блоку управления фотовводом ЕС-6022, а вторая к устройству комбинированному ленточному УКЛ-1500-1 типа ЕС-7903 (М). Их некоторое отличие в алгоритме работы от платы М-32 связано с тем, что передача данных в ЕС-6022 осуществляется по положительному перепаду уровней на ее информационных шинах. Поэтому передача нулевого байта обмена невозможна и с целью исключения возможности возникновения такой ситуации на шине, связанной со 2-м разрядом 2-й октады регистра всегда присутствует сигнал логической «1», а на шине 3-го разряда этой октады — логического «0». Во время обмена разделительным байтом уровень логических сигналов на указанных шинах меняется на обратный. Это позволяет программным путем на ЭВМ легко отделять служебные байты обмена от информационных, а при отсутствии синхроимпульса — не реагировать блоку ЕС-6022 на задержку в передаче данных длительностью более 60—120 мс на конец перфоленты. Указанная задержка обусловлена протяжкой магнитофоном УОДа межзонного участка ленты АЦИТа и может достигать при воспроизведении конца зоны записи длительности до 260 мс. Однако такая продолжительность паузы во вводе данных намного меньше 400—800 мс, что исключает формирование в блоке ЕС-6022 сигнала «Сбой оборуд», свидетельствующего в штатном режиме работы ЭВМ об остановке перфоленты.

Отличие алгоритма работы блока обмена ЕС-7903 от ЕС-6022 заключается в том, что в течение паузы во вводе информации АЦИТа в ЭВМ передается не один, а несколько служебных разделительных байтов $2^7 = «1»$, которые одновременно сопровождаются сигналами по синхродорожке СИ и следуют с частотой 50 Гц. Это отличие обусловлено тем, что в блоках ЕС-7903 (М) прием информации и одновременно анализ длительности паузы перерыва выполняется по задним фронтам сигналов, поступающих по синхродорожке.

Однако такой путь аппаратного сопряжения автономных измерителей с ЭВМ не может считаться приемлемым. Это связано с тем, что при его организации приходится нарушать комплектность штатного оборудования ЭВМ. Кроме того, не достигается необходимая степень унификации бортовой океанографической

аппаратуры в связи с определенными различиями в симплексных каналах ввода перфоленты практически во всех типах ЭВМ. В целом ряде современных микроЭВМ и персональных компьютеров подобного рода канал ввода информации вообще отсутствует [50, 71, 74, 92].

Поэтому сопряжение океанографических измерителей нового поколения, а также УОДа АЦИТа с новыми видами ЭВМ (СМ-4, -1400, СМ-1300, «Искра-1256», «Электроника-85», ИВМ) выполняется по последовательному каналу связи в интерфейсе С2 (ГОСТ 18145-72), соответствующему международному стандарту RS-232. В частности, сопряжение ДКРТ «Вектор» с ЭВМ «Электроника-85», ИВМ и УОДа с ЭВМ СМ-4 (-1400), -1300 и «Искра-1256» выполнено с использованием полудуплексного канала связи этих ЭВМ в указанном интерфейсе с периферийными устройствами [72]. Это обусловлено наличием в этих устройствах только одного регистра, предназначенного как для передачи информации в ЭВМ, так и для формирования последующего байта передачи данных. Аппаратно в УОДе такой канал связи организуется путем установки вместо стандартной платы М-32 платы обмена С2/RS-232. Сами ЭВМ должны быть укомплектованы техническими средствами обмена информации в последовательном интерфейсе, которыми являются: для СМ-4 (1400) — устройство S-70 или мультиплексоры СМ8501, СМ8514, а для «Искры-1256» — блок интерфейсный ИРПС/С2. Скорость обмена по такому каналу может составлять до 9600 бод. Как правило, в судовых условиях ограничиваются скоростью 4800 бод, что обеспечивает приемлемую для судна дальность линий связи с ЭВМ в 20 м.

Сигналы в линиях связи формируются в блоке обмена УОДа в виде 2-полярных токовых посылок нормированной длительности. При этом каждый байт массива данных пересылается в формате, содержащем 11 позиций, располагаемых в следующей последовательности: 1-я позиция — стартовая посылка; 2—9-я позиции — информационные посылки; 10—11-я позиции — стоповые.

Расположение информационных посылок в байте обмена соответствует *LSB* и обеспечивает передачу информации, начиная с младших разрядов в байте. Стартовой посылке соответствует уровень логического «0» на линии связи, а стоповой — «1». Физическая реализация сигнала на линии: логическая «1» = 0,3 В, логический «0» = В. Для связи с ЭВМ используются четыре вида сообщений, закодированных следующим образом:

- разрешение передачи данных — 1100 0011 1111;
- конец цикла передачи данных (возврат каретки) CR — 1100 0011 0101;
- конец передачи данных — 1100 1110 0001;
- передача данных в коде КОИ8 1100 110X XX01.

В последнем виде сообщений позиции, обозначенные знаками XXX, означают разряды передаваемого числа из результата измерения АЦИТа. Применение для кодировки информации кода КОИ-8 позволяет сократить программу расшифровки результатов

измерений и повысить быстродействие этого канала связи. Такой набор служебных сообщений позволяет организовать требуемый полудуплексный канал связи УОДа и ЭВМ [72].

В этом случае обмен информацией между УОДом и ЭВМ выглядит следующим образом: контроллер ЭВМ по инициативе программы пересылает в УОД кодовую комбинацию, свидетельствующую

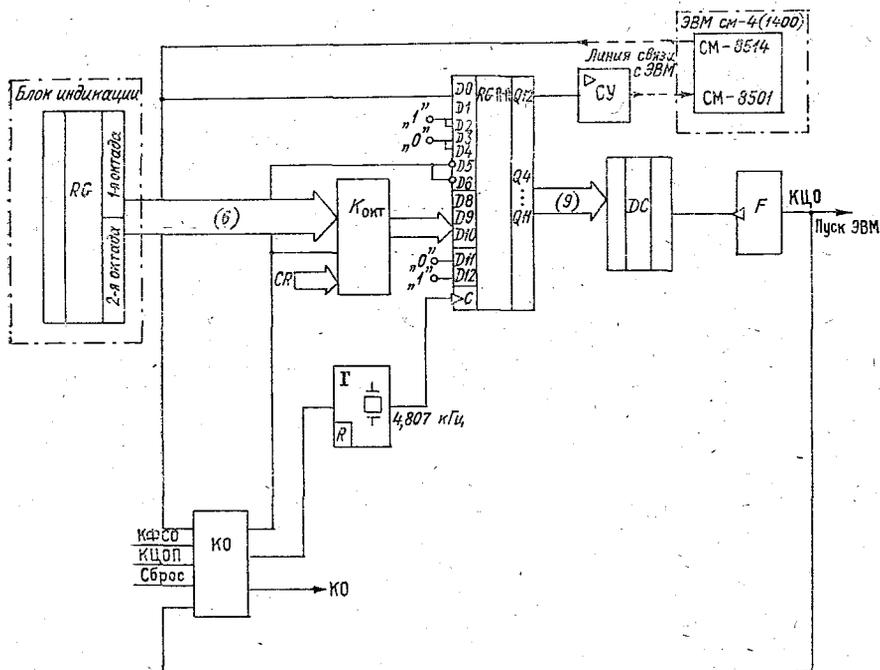


Рис. 5.5. Структурная схема блока обмена C2/RS-232.

щую о готовности ЭВМ принять от УОДа массив данных и разместить его в памяти ЭВМ. Приняв это сообщение, УОД готовит и передает в канал массив данных, в конце которого присутствует условная кодовая комбинация. Передача следующего массива состоится лишь после получения из канала очередного символа разрешения. Таким образом, реализуется асинхронный режим ввода данных АЦИТа в ЭВМ. Структурная схема блока C2/RS-232, аппаратно реализующего в УОДе вышеописанный алгоритм обмена с ЭВМ, показана на рис. 5.5. В состав блока C2/RS-232 входят следующие основные элементы:

— универсальный регистр приемо-передачи *RG П-П*, предназначенный для приема информации из регистра обмена блока индикации и ее последовательного вывода в символьном виде в линию связи с ЭВМ, а также приема от нее сообщения о разрешении передачи данных;

— коммутатор октад ($K_{\text{окт}}$), осуществляющий поочередное подключение к регистру сначала 2-й (старшей), а затем 1-й (младшей) октады регистра обмена RG блока индикации, а также служебных сообщений;

— контроллер обмена KO ;

— генератор с формирователем кварцовой частоты 4,807 Гц (Γ);

— дешифратор сообщения «Разрешение передачи данных» $ДС$;

— формирователь сигналов $KЦО$ и «Пуск ЭВМ»;

— согласующий каскад $СУ$ сигналов цифровой части схемы с требуемым уровнем этих сигналов в линии связи с ЭВМ.

Работа рассматриваемой платы начинается после выдачи ЭВМ в канал связи с УОДом символа «Разрешение передачи данных», который запускает в работу контроллер обмена и заносится в регистр приема-передачи $RG П-П$. При этом сигналы тактовой частоты 4,807 с генератора Γ поступают на тактовый C -вход этого регистра $RG П-П$.

В момент окончания записи полученного сообщения оно идентифицируется дешифратором $ДС$. В результате срабатывает формирователь $F2$ и с платы $C2/RS-232$ выдается команда «Пуск ЭВМ», по которой включается магнитофон УОДа, информация с магнитофонной кассеты заносится в регистр обмена блока индикаций. Далее плата организует передачу данных из регистра обмена RG в интерфейсе $RS-232$ в линию связи с ЭВМ.

После считывания с магнитной ленты первой зоны записи информация о первых шести разрядах результата измерения заносится во 2-ю и 1-ю октады регистра обмена блока индикации УОД. Оттуда эта информация в параллельном виде, по три разряда переносится в регистр сдвига $RG П-П$. Во время подачи сигнала $KFCO$, осуществляется перезапись числа из 2-й октады, а затем после прохождения 12 тактовых импульсов — из 1-й. Это обеспечивается соответствующим переключением триггера-счетчика тактов TgT , управляющего работой коммутатора октад $K_{\text{окт}}$. После передачи в линию связи двух сообщений вида 1100 110X XX01, несущих вместе информацию о 6 двоичных разрядах результата измерения, контроллер обмена формирует сигнал «Конец обмена» (KO). По этому сигналу из блока памяти УОДа в его регистр обмена вызываются последующие 6 бит информации и цикл их передачи в канал связи с ЭВМ повторяется.

При завершении передачи одного считанного с магнитофонной ленты цикла измерения УОД формирует команду ($KЦОП$) «Конец цикла обмена памяти». По этой команде контроллер организует занесение в регистр $RG П-П$ кодовой комбинации CR и передачу символа CR в линию связи с ЭВМ. В ответ на это сообщение ЭВМ вновь выдает в линию символ «Разрешение передачи данных», после приема которого плата $C2/RS-232$ формирует команду «Пуск ЭВМ» и включает двигатель магнитофона воспроизведения. Результаты нового цикла измерения АЦИТа, хранимые

в следующей зоне магнитной записи заносятся в память УОД. Далее повторяется последовательная выборка данных из памяти и пересылка в символьном виде.

Таким образом, вышеописанный процесс передачи данных АЦИТа об одном цикле измерения в канал связи повторяется каждый раз в ответ на символ «Разрешение передачи данных», поступающий от ЭВМ. Отсутствие указанного символа приводит к остановке процесса ввода данных АЦИТа и может быть вызвано либо действиями оператора ЭВМ, либо запросом на остановку, исходящим от УОДа. Запрос на прекращение передачи формируется в УОДе при нажатии кнопки «Сброс», а также автоматически после считывания последней зоны записи на ленте и выражается в передаче на ЭВМ последовательностью двух символов: «Конец передачи данных» и *CR*. Формирование этих символов осуществляется контроллером по сигналу «Сброс», поступающему от соответствующего блока или при нажатии одноименной кнопки. На этом процесс передачи данных в линию связи прекращается до появления в ней сообщения «Разрешение передачи данных».

Аналогичным образом функционирует плата интерфейсной связи блока обработки данных АЦИТа-У и ЭВМ СМ-4, СМ-1420, СМ-1300, связанных по последовательному интерфейсу *RS-232*.

Описанная структура каналов связи АЦИТа с ЭВМ СМ-4 (-1420), СМ-1300 успешно используется также при организации сопряжения других океанографических измерительных комплексов с различного типа ЭВМ. Такая непосредственная связь ЭВМ и измерительных гидрофизических комплексов позволяет вести обработку информации, поступающей от них по гидроакустическим каналам связи в реальном масштабе времени.

В целом последовательный канал связи подводных измерительных модулей с судовой автоматизированной ИИС в интерфейсе *RS-232* представляется в настоящее время наиболее универсальным и вполне перспективным. Все вновь создаваемые ЭВМ, микроЭВМ, персональные компьютеры зарубежные и отечественные: IBM, «Искра-1030», ЕС-1840, СМ-1800 предполагают для связи с внешними устройствами использование интерфейсной карты *RS-232* [74].

5.3. Алгоритмы и программы обработки данных АЦИТ

Как уже указывалось (см. п. 4.1, 5.2), исходные результаты измерений АЦИТа получают в условных единицах восьмеричного кода. Для представления материала таких наблюдений пользователю необходимо перевести условные коды АЦИТа в общепринятые единицы измерений гидрофизических величин. В настоящее время такая операция повсеместно выполняется на ЭВМ. Одновременно при первичной обработке производится технический и критический контроль исходной информации, который может осуществляться автоматизированно, программным путем. Ввод дан-

ных АЦИТа в ЭВМ может выполняться как с использованием промежуточного технического носителя в виде перфоленты, так и через УОД непосредственно с магнитофонной кассеты с записью результатов измерений *in situ*.

При работе с перфолентой (ПФЛ) исходные данные предварительно кодируются с помощью перфоратора, работающего синхронно с любым из телетайпов Т51, Т63, осуществляющими распечатку информации с АЦИТа.

Первичная обработка информации АЦИТ выполняется на различных типах ЭВМ с помощью разных программ. На ЭВМ «Минск-32» обработка ведется по программе «Счет 3», на ЭВМ ЕС-1022 — по программе АСИТ-5, на ЭВМ СМ-4 (-1400, -1300) — по программе АСИТ СМ, на «Искре-1256» — по программе «Шапка». В последнее время наибольшее распространение получили ЭВМ типа СМ, на которых производится обработка подавляющего объема массива данных. Поэтому комплекс программ АСИТ СМ, (автор В. Б. Буйлов), является наиболее разработанным [33]. Этот комплекс программ решает следующие основные задачи:

- ввод в память ЭВМ показаний датчиков прибора с перфоленты (ПФЛ) или через УОД с магнитофонной кассеты (МК), причем длина записи на МК или на ПФЛ может быть неограниченной;

- обработка показаний датчиков прибора с выводом обработанных значений на печать ЭВМ в виде таблиц, хранение обработанных данных на магнитных дисках или лентах и возможность считывания этих данных для получения таблиц, причем эти данные могут подвергаться (или не подвергаться) критическому контролю;

- получение приведенных к паспортному виду стандартных справочных данных, рассчитанных по результатам градуировок и необходимых для обработки показаний прибора;

- хранение справочных данных на магнитных дисках для непосредственного использования при обработке показаний датчиков;

- обработка показаний датчиков прибора в двух режимах: режиме зондирования (параметра в цикле) и в режиме автономной (9 параметров в цикле);

- технический и критический контроль вводимой информации с целью отбраковки данных, а также замена отбракованных данных на интерполированные (экстраполированные) с помещением их в специальную таблицу ошибок и отметка символом «**» забракованных по контрольному коду цикла измерения;

- обработка показаний приборов первой (АЦИТ) и второй (АЦИТ-2М) модификаций.

Комплекс программ (КП) АСИТ СМ имеет простую структуру и требует для работы одновременно 30 кбайтов оперативной памяти. Он состоит из 6 программ и 11 программных модулей, подключаемых оператором CALL (табл. П.5.1, рис. 5.6).

Таблица 5.1

Описание функциональных программных модулей и программ КП АСИТ

Программный модуль	Выполняемые функции
1. ВАС1Д2 (АВ2) ВАС1Д3 (АВ3)	Раскодировка символов, технический контроль введенной информации, перевод кодов из восьмеричной системы вычисления в десятичную
2. ВАС1Д5 (АВ5) ВАС1Д6 (АВ6) ВАС1Д12 (АВ12) ВАС1Д4 (АВ4)	Критический контроль введенной информации
3. ВАС111 (АВ11)	Распечатка на АЦПУ табл. «Ошибочных данных» и сводной таблицы с обработанными показаниями датчиков прибора
4. ВАС1Д9 (АВ9)	Расчет солености
5. ВАС110 (АВ10)	Запись на МД таблиц с обработкой данных
6. KORRA, KORRC	Корректировка справочной информации
7. АВ	Программа обработки наблюдений прибором АЦИТ
8. АS	Программа работы со справочной информацией
9. АD	Программа работы с банком
10. АТ	Программа обработки градуировок
11. АМ	Программа записи на МЛ
12. WWOD	Программа ввода информации с УОД

Модули КП АСИТ SM написаны на языке программирования Фортран-IV. Программы работают под управлением ОСРВ. Используется стандартное оборудование ЭВМ СМ-4 (-1400, -1300), обеспечивающее работу ОСРВ, а также внешние устройства: устройство ввода информации с перфоленты; накопители на магнитных дисках, работающие на данной ЭВМ.

Время счета зависит от количества вводимой информации. Обработка наблюдений из 100 циклов с четырьмя параметрами в цикле занимает около 60—65 с. Обработка двух градуировок по 3—5 точкам в каждой занимает около 20 с.

Длина записи на магнитофонной кассете или ПФЛ не ограничена. Справочные данные хранятся на рабочем пакете магнитных дисков не более, чем для 16 приборов. Количество градуировочных точек при обработке градуировок не более 50 в одном шаге задания. Количество записываемых на магнитные диски листов таблиц с обработанными данными не более 176. Ниже приводятся используемые в комплексе программ АСИТ SM алгоритмы перехода от условных кодов АЦИТ к измеряемым гидрофизическим величинам.

Перевод показаний АЦИТа, полученных в виде условных кодов $K(8)_i$ в восьмеричной системе счисления, к кодам $K(10)_i$, заданных в десятичной системе, выполняются по следующей схеме:

$$\begin{aligned} K(8)_i &= A_i B_i C_i D_i; \\ K(10)_i &= 512A_i + 64B_i + 8C_i + D_i, \end{aligned} \quad (5.1)$$

где A_i , B_i , C_i и D_i — соответственно первая, вторая, третья, четвертая цифры восьмеричного кода, характеризующего значение данного параметра, измеренного АЦИТом.

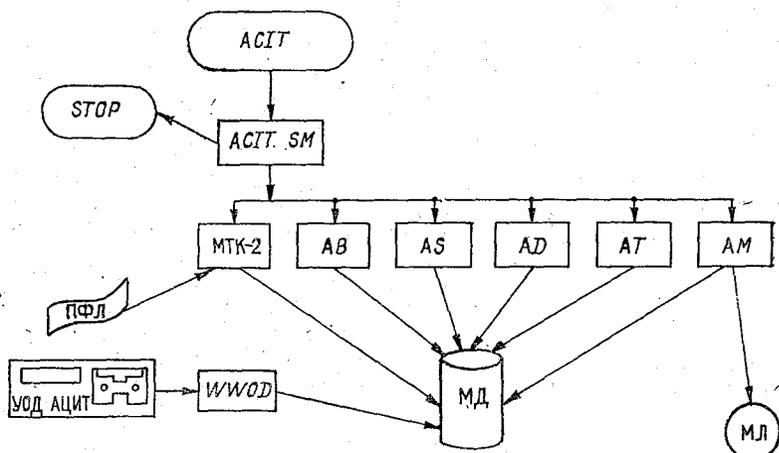


Рис. 5.6. Структура комплекса программ обработки данных АЦИТа на ЭВМ СМ-4 (-1400, -1300).

Вычисление температуры воды в градусах Цельсия должно выполняться по значению кода K_2 второго параметра по следующей формуле [94]:

$$\begin{aligned} T &= T_1 \frac{[K_2 - K_{2(2)}] [K_2 - K_{2(3)}]}{[K_{2(1)} - K_{2(2)}] [K_{2(1)} - K_{2(3)}]} + \\ &+ T_2 \frac{[K_2 - K_{2(1)}] [K_2 - K_{2(3)}]}{[K_{2(2)} - K_{2(1)}] [K_{2(2)} - K_{2(3)}]} + \\ &+ T_3 \frac{[K_2 - K_{2(1)}] [K_2 - K_{2(2)}]}{[K_{2(3)} - K_{2(1)}] [K_{2(3)} - K_{2(2)}]}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где T_1 , T_2 , T_3 — значения температуры по контрольному термометру, соответствующие 1, 2, 3-й поверочной точкам и приведенные в табл. 1 формуляра данного АЦИТа, °С; $K_{2(1)}$, $K_{2(2)}$, $K_{2(3)}$ — значения кодов второго параметра АЦИТа, соответствующие 1, 2, 3-й поверочной точкам и приведенные в табл. 1 формуляра данного АЦИТа; K_2 — значение кода второго параметра АЦИТа, соответствующее измеренной температуре.

Вычисление глубины H погружения АЦИТа выполняется по следующей формуле [94]:

$$H = 9,275P - 2,04 \cdot 10^{-4}P^2, \quad (5.3)$$

где P — измеренное АЦИТОм гидростатическое давление.

Давление P определяется по значению кода K_9 девятого параметра табличным путем и линейной интерполяцией данных градуировки этого измерительного канала АЦИТ, которые приведены в градуировочной таблице канала давления, приведенной в формуляре данного АЦИТа.

Вычисление практической солености морской воды должно выполняться по результатам измерений АЦИТа относительной электрической проводимости, температуры и гидростатического давления морской воды, согласно алгоритму Шкалы практической солености, 1978 (ШПС-78) [82]. Для этого по значению K_3 третьего параметра с учетом диапазона измерения проводится вычисление относительной электрической проводимости морской воды R по следующей формуле:

$$R = R_1 \frac{[K_3 - K_{3(2)}][K_3 - K_{3(3)}]}{[K_{3(1)} - K_{3(2)}][K_{3(1)} - K_{3(3)}} + \\ + R_2 \frac{[K_3 - K_{3(1)}][K_3 - K_{3(2)}]}{[K_{3(2)} - K_{3(1)}][K_{3(2)} - K_{3(3)}]}, \quad (5.4)$$

где R_1, R_2 — значения относительной электрической проводимости образцовых растворов воды в 1-й и 2-й поверочных ваннах, в которых выполняется градуировка АЦИТов при выпуске из производства. $K_{3(1)}, K_{3(2)}, K_{3(3)}$ — значения кодов третьего параметра АЦИТа, соответствующие градуировке в 1-й и 2-й поверочных ваннах и на воздухе.

Вычисление относительной электрической проводимости морской воды при температуре T , измеренной АЦИТОм *in situ*, одновременно измеренном R_T данного значения R , производится по следующей формуле:

$$R_T = R/(R_p r_T), \quad (5.5)$$

где r_T — зависимость относительной электрической проводимости растворов нормальной воды от температуры, которая описывается следующим выражением:

$$r_T = 6,766097 \cdot 10^{-1} + 2,00564 \cdot 10^{-2}T + 1,104259 \cdot 10^{-4}T^2 - \\ - 6,9698 \cdot 10^{-7}T^3 + 1,0031 \cdot 10^{-9}T^4; \quad (5.6)$$

R_p — зависимость относительной электрической проводимости морской воды, измеренной *in situ*, от избыточного давления P , которая описывается следующим выражением:

$$R_p = 1 + \frac{P(2,070 \cdot 10^{-3} + 6,370 \cdot 10^{-6}P + 3,989 \cdot 10^{-9}P^2)}{1 + 3,426 \cdot 10^{-2}T + 4,464 \cdot 10^{-4}T^2 + 4,215 \cdot 10^{-1}R - 3,107 \cdot 10^{-3}RT}. \quad (5.7)$$

Исходные данные по температуре T , давлению P , относительной электрической проводимости R для расчетов по формулам (5.5) и (5.6) берутся из результатов измерения АЦИТа, вычислен-

ных по соотношениям (5.1)—(5.3). Вычисление значений практической солености S производится по следующей формуле:

$$S = 0,0080 - 0,1692R_T^{1/2} + 25,385R_T + 14,0941R_T^{3/2} - \\ - 7,0261R_T^2 + 2,0781R_T^{5/2} + \frac{T - 15}{0,0162(T - 15)} (0,0005 - \\ - 0,0056R_T^{1/2} - 0,0066R_T - 0,0375R_T^{3/2} + 0,0636R_T^2 - 0,0144R_T^{5/2}). \quad (5.8)$$

Программа предусматривает наряду с алгоритмом расчета по ШПС-78 использовать метод расчета солености по Забурдаеву—Калашникову [49], а вычисление относительной электрической проводимости R выполняется по показаниям кода K_3 третьего параметра с учетом диапазонов измерения по следующим формулам:

для первого диапазона

$$R = C_{\kappa 1} K_3 \alpha_1 / (4,2902 \cdot 4095) = C_{\kappa 1} 0,0154 K_3 / 4095;$$

для второго диапазона

$$R = C_{\kappa 2} (K_3 \alpha_1 / 4095 + A_{\kappa}) / 4,2902 = C_{\kappa 2} (0,0154 K_3 / 4095 + 0,01155), \quad (5.9)$$

где $C_{\kappa 1}$, $C_{\kappa 2}$ — геометрические «константы» датчика электрической проводимости; α_1 , α_2 , A_{κ} — коэффициенты преобразования по каналу электрической проводимости.

Кроме того, в зависимости от желания оператора в программе предусмотрен расчет значений электрической проводимости R с определением характеристик этого измерительного канала АЦИТа с использованием тройного «сухого» витка. Такой виток создается проводом, пропущенным через центральное отверстие тороидальных сердечников индуктивного датчика электрической проводимости. Концы этого провода подключаются к магазину сопротивления, имитирующему различную проводимость воды. При наличии результатов таких испытаний АЦИТа вычисление значений R выполняется по следующим формулам:

для первого диапазона

$$R = \frac{\kappa_{\text{ГР}} [K_3 - K_3(0)]}{4,2902 [K_{\text{ГР}} - K_3(0)]};$$

для второго диапазона

$$R = \frac{\kappa_{\text{ГР}} [R_1^{-1} (K_3 + K_{3(2)}) - R_2^{-1} (K_3 + K_{3(1)})]}{4,2902 [R_1^{-1} (K_3(1) + K_{\text{ГР}}) + R_2^{-1} (K_3(2) + K_{\text{ГР}})]}, \quad (5.10)$$

где $\kappa_{\text{ГР}}$, $K_{\text{ГР}}$ — градуировочные значения электрической проводимости и кода по третьему параметру; R_1 , R_2 — сопротивление, установленное на магазине сопротивления; $K_{3(0)}$, $K_{3(1)}$, $K_{3(2)}$ — значения кода испытуемого АЦИТа по третьему параметру.

Вычисление угла ψ отклонения корпуса прибора от вертикали проводится по значению кода K_6 шестого параметра по следующей формуле:

$$\psi = 30 (K_6 - K_0) / (K_{\pm 30} - K_0), \quad (5.11)$$

где K_0 — значение кода шестого параметра при вертикальном расположении корпуса прибора, приведенное в табл. 6 формуляра данного АЦИТА; $K_{\mp 30}$ — значения кода шестого параметра при отклонениях корпуса прибора на 30° в положительном или отрицательном направлениях, совпадающих с осью вращения нижнего лопастного винта датчика скорости течения. Значения K_{-30} и K_{+30} приведены в табл. 6 формуляра на данный АЦИТ.

При обработке по значению кода K_6 предварительно определяют, в какую сторону — положительную или отрицательную — отклоняется корпус прибора, и в зависимости от этого в формулу (5.11) подставляют значения K_{-30} или K_{+30} .

Определение азимутального угла β разворота оси вращения нижней вертушки производится в процессе обработки полученных значений кодов K_7 и K_8 седьмого и восьмого параметров.

Для этого по градуировочной таблице угла ориентации измерителя, приведенной в его формуляре, находят для значений каждого кода K_7 и K_8 две пары углов β_{17} , β_{27} и β_{18} , β_{28} . Определяются углы, имеющие минимальную разницу. Для этого находится максимальное значение косинуса следующих пар углов: $\beta_{17} - \beta_{18}$; $\beta_{17} - \beta_{28}$; $\beta_{27} - \beta_{18}$; $\beta_{27} - \beta_{28}$. Используя метод единичного вектора, вычисляют среднее значение искомого азимутального угла β в паре по следующей формуле:

$$\beta = \arctg [(\sin \beta_{j7}^{(8)} + \sin \beta_{j8}^{(7)}) / (\cos \beta_{j7}^{(8)} + \cos \beta_{j8}^{(7)})], \quad (5.12)$$

где $\beta_{j7(8)}$ — значения углов из выбранной пары, а j может принимать значения $j = 1, 2$.

Вычисляются компоненты скорости течения V_1 и V_2 , измеренные соответственно нижним и верхним лопастным винтом датчика скорости, по следующей формуле:

$$V_1 = \frac{k_{V_1} m_V}{t_0} (K_{4_{i-1}} - K_{4_i}); \quad V_2 = \frac{k_{V_2} m_V}{t_0} (K_{5_{i-1}} - K_{5_i}), \quad (5.13)$$

где K_{4_i} , K_{5_i} — значения кодов соответственно четвертого и пятого параметров в данном, i -м цикле измерения; $K_{4_{i-1}}$, $K_{5_{i-1}}$ — значения кодов соответственно четвертого и пятого параметров в предыдущем, $(i-1)$ -м цикле измерения; m_V — число оборотов лопастного винта, вызывающее изменение кода K_4 или K_5 на единицу; t_0 — интервал времени между двумя циклами измерения, с; k_{V_1} , k_{V_2} — значения гидрометрических шагов нижнего и верхнего лопастного винта, которые рассчитываются по результатам градуировки датчика скорости, указанным в формуляре на данный АЦИТ.

Для АЦИТов с электронным блоком скорости вычисление V_1 и V_2 выполняется по следующим формулам:

$$V_1 = k_{V_1} m_V K_{4_i} / t_0; \quad V_2 = k_{V_2} m_V K_{5_i} / t_0, \quad (5.14)$$

где четность (нечетность) кодов K_{4_i} , K_{5_i} характеризует знак компонента. При нечетном значении кода соответствующий ком-

понент имеет отрицательный знак, а при четном — положительный. Расчет выполняется с учетом измеряемых компонентов скорости V_1 и V_2 по следующим формулам:

$$k_{V_1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{1i}/f_{H_i}); \quad k_{V_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{2i}/f_{B_i}), \quad (5.15)$$

где V_{1i} , V_{2i} — значения скорости потока воды, соответствующие градуировочным точкам на графике характеристики нижнего и верхнего лопастного винта, приведенном в формуляре на данный АЦИТ; f_{H_i} , f_{B_i} — значения частот вращения соответственно нижнего и верхнего лопастного винта при градуировочных значениях скоростей V_{1i} и V_{2i} .

Допускается при обработке скоростей больше 0,1 м/с использовать величины k_{V_1} и k_{V_2} , приведенные в табл. 9 формуляра данного АЦИТа. Для стандартных АЦИТов $m_V = 7,35$ об./ед. кода. Для АЦИТов с блоком потенциометров, в котором исключен 30-градусный нерабочий участок $m_V = 8,02$ об./ед. кода. Для АЦИТов с электронным блоком скорости $m_V = 12,7$ об./ед. кода.

Вычисление параметров течения производится по следующим формулам:

$|\bar{V}|$ — скорость (модуль среднего вектора) течения

$$|\bar{V}| = \sqrt{V_1^2/\cos^2\psi + V_2^2(1 + \delta_V)}, \quad (5.16)$$

где δ_V — поправка, связанная с типовыми нарушениями компонентных свойств лопастных винтов датчика скорости АЦИТ. Относительное значение δ_V этой поправки однозначно определяется через отношение составляющих V_1 и V_2 и одинаково для всего типа датчиков скорости АЦИТ (табл. 5.2).

α — направление (аргумент вектора скорости) течения

$$\alpha = \begin{cases} \beta + \arctg(V_2V_1^{-1})\cos\psi + \gamma + 180^\circ & \text{при } V_1 < 0; \\ \beta + \arctg(V_2V_1^{-1})\cos\psi + \gamma & \text{при } V_1 > 0, \end{cases} \quad (5.17)$$

где γ — магнитное отклонение, °;

V_M , V_m — меридиональная и широтная составляющие скорости течения

$$V_M = |\bar{V}| \cos\alpha; \quad V_m = |\bar{V}| \sin\alpha. \quad (5.18)$$

В программах АСИТ SM и АСИТ-5 предусмотрена автоматизация технического контроля исходной информации. При этом про-

Таблица 5.2

Относительные поправки δ_V от нарушения компонентных свойств лопастных винтов

$V_1V_2^{-1}$	0	0,2	0,35	0,4	0,5	0,75	1
δ_V %	0	-2	0	+4	+7	+11	+12

вероятно: отсутствие на техническом носителе исходных данных недопустимых символов; число символов в параметре и число параметров в цикле измерения; синхронность ряда наблюдений.

Синхронность ряда проверяется подсчетом числа циклов измерений между метками «0000» в значении контрольного параметра. Если число циклов отличается от 20 или 10 (в зависимости от режима основного или дополнительного), необходимо восстановить синхронность ряда, исключив циклы, следующие на 20-м или 10-м, или добавив новый цикл с интерполированными значениями параметра.

При автоматизированной обработке данных АЦИТА на ЭВМ СМ и ЕС выполняется также критический контроль исходной информации: контроль качества магнитной записи и физической допустимости значений измеренных параметров.

Качество магнитной записи контролируется по контрольному коду, который не может отличаться от заданного больше чем на ± 64 единиц.

Если отклонения контрольного кода от заданного превышают это значение, данные от этого цикла не обрабатываются, а параметрам присваиваются значения, полученные при интерполяции соседних с ним циклов.

Обработанные данные по температуре и солёности следует проверять на физическую допустимость: пределы температуры от -2 до 36 °С, а солёность от 2 до 42 ‰.

Обработанные данные по скорости и направлению следует проверять на физическую допустимость по следующим критериям. При модуле скорости течения меньше 0,05 м/с изменения скорости не должны превышать 0,1 м/с, при скорости больше 0,05 м/с эти изменения не должны превышать удвоенной измеряемой скорости, а направление течения всегда должно лежать в пределах от 0 до 360°.

Технология работы на ЭВМ СМ предполагает также выполнение критического контроля исходных данных АЦИТА путем визуального просмотра массива первичных кодов на экране дисплея. В процессе такой операции оператор имеет возможность анализировать и корректировать исходные данные при наличии сбоев магнитной записи и восстанавливать путем интерполяции потери информации о скорости и направлении течения, обусловленные разрывами шкалы потенциометров блока скорости. Вся другая работа оператора с комплексом программ АЦИТ СМ также выполняется в диалоговом режиме с ЭВМ. В этом же режиме производится ввод призначной информации о номере прибора, рейсе, сроках постановки буйковых станций и ввод справочной информации о данном образце АЦИТА, его градуировочных характеристиках и виде исполнения.

В результате работы комплекса программ АЦИТ СМ на АЦПУ ЭВМ распечатываются таблицы обработанных показаний прибора, вместе со справочным массивом они записываются на магнитный диск (табл. 5.3). Аналогичные по виду таблицы выводятся при

обработке информации АЦИТа на ЭВМ ЕС и «Минск-32». Главное отличие программ первичной обработки на этих ЭВМ от описанной выше является не совсем строгое соблюдение алгоритмов расчетов океанографических величин по условным кодам и ограниченность их сервисных услуг.

Первичная обработка данных автономных измерителей АЦИТ-У-01 и АЦИТ-У-02 нового поколения имеет существенно меньший объем вычислительных операций, поскольку эти средства измерения выдают результаты в основном в единицах измеряемых гидрофизических величин. Обработка данных от этих приборов на ЭВМ в основном сводится к внесению необходимых поправок. Такими поправками для измерителя течения АЦИТ-У-01 является магнитное склонение в месте проведения наблюдений, а для STD-измерителя АЦИТ-У-01 корректировка показаний по результатам измерений внутренней температуры и значений установок, полученных во время автокалибровочных циклов измерений. Кроме того, ввод информации с АЦИТа-У-01 и АЦИТ-У-02 в ЭВМ позволяет организовать архивы материалов наблюдений на технических носителях (типа магнитные диски и ленты), пригодных для безбумажной технологии сбора и обработки океанографической информации для целей научного анализа. С этой целью созданы соответствующие программы для ЭВМ СМ-4 (1400), позволяющие переписывать через БОД данные с АЦИТа-У-01 и АЦИТа-У-02 в ОЗУ этих ЭВМ.

Таблица 5.3

Океанографические наблюдения с помощью АЦИТа

Океан, море (шифр): 32

Судно: Профессор Зубов. Номер рейса: 38

Станция: 67. Координаты: 69°12'; 3°28'. Глубина места: 3270 м

Дата: 11.06.85. Часовой пояс: 0. Дискретность наблюдений: 3600 с. Номер АЦИТа: 154.

Горизонт наблюдения: 1000 м. Время 1-го наблюдения: 14 ч 05 мин.

Метод расчета солености: по В. И. Забурдаеву

Номер поддиапазона измерения электрической проводимости: 2

№ п. п	Дата	Время		Глубина, м	Температура, °С	Соленость, ‰/‰	Электрическая проводимость, См/м	Течение		Составляющие скорости		Угол наклона при бора, °
		ч	мин					скорость, см/с	направление, °	на параллель	на меридиан	
49	11.06	14	05	917	-0,32	34,45	2,877	6	228	-4,2	-3,8	27
50	11.06	15	05	917	-0,33	34,45	2,876	4	212	-2,2	-3,5	27
51	11.06	16	05	917	-0,33	34,45	2,876	4	211	-2,3	-3,8	27
52	11.06	17	05	916	0,32	34,45	2,877	5	216	-3,1	-4,1	27
53	11.06	18	05	917	-0,37	34,47	2,873	6	233	-4,6	-3,1	27

Глава 6

МИКРОПРОЦЕССОРЫ И МИКРОЭВМ В АВТОНОМНЫХ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

6.1. Общие сведения и задачи микропроцессорной техники

Развитие микроэлектронной и микропроцессорной элементной базы сделало возможным перенесение значительного объема операций по обработке результатов измерений непосредственно в автономные подводные модули. Наиболее актуальным в этом отношении является организация непосредственно в самих подводных измерителях выполнения операций по корректировке характеристик первичных преобразователей, организация адаптивного режима измерения и накопления данных, проведение расчетов, связанных со сжатием исходной информации при получении векторных и статистических характеристик наблюдаемых гидрофизических полей океана, прямое сопряжение измерителей с бортовыми средствами вычислительной техники (см. п. 3.5—3.7).

Аппаратурная организация такого функционирования автономных океанографических средств измерения требует включения в их состав БИС микропроцессорных комплектов, одноплатных и однокристалльных микроЭВМ, изменение структуры и действующих принципов построения данного класса измерительной техники. Очень важен рациональный выбор микропроцессорной элементной базы, способной по своим техническим характеристикам функционировать в рассматриваемых устройствах с ограниченными размерами корпуса, а также мощностью и емкостью батарейных источников питания. На сегодняшний день отечественной промышленностью освоено в производстве ограниченное число микропроцессорных элементов, пригодных удовлетворить требованиям построения автономных подводных измерительных модулей. К ним могут быть отнесены только микропроцессорные комплекты (МПК) серий К/КР-588 и К1806, выполненные на основе комбинированной МОП-технологии, обеспечивающей создание высокоэкономичных больших интегральных схем (БИС) с потребляемой мощностью несколько мВт на корпус БИС [27, 73, 74]. Микропроцессорный комплект серии К1806 включает в свой состав следующий набор элементов: 16-разрядный микропроцессор К1806ВМ2, контроллер устройств индикации К1806 ВПИ-092, контроллер клавиатуры и программируемый таймер К1806 ВПИ-093. Функциональные возможности данного МПК в целом эквивалентны БИС серии К1801, имеет ту же систему команд, соответствующую микроЭВМ «Электроника-60», «Электроника-85», а также архитектуру организации микроЭВМ и сопряжения с периферийными

внешними устройствами. Питание микросхем серии К1806 осуществляется от одного источника напряжения +5 в, а по уровню входных и выходных сигналов рассматриваемый МПК совместим с элементами средней степени интеграции серии 561, наиболее широко используемых в автономной океанографической аппаратуре. В то же время быстродействие БИС К1806 в отличие от МПК К1801 ограничено тактовой частотой в 500 кГц, что, однако, вполне приемлемо для использования в автономных средствах измерения относительно быстротекущих гидрофизических процессов в океане мелкомасштабной изменчивости. Периодичность развития даже таких процессов не превышает нескольких минут [76, 85].

Данный микропроцессорный комплект представляет собой законченное вычислительное устройство с замкнутой структурой и с довольно ограниченным составом средств связи с периферийной аппаратурой, поэтому МПК К1806 наилучшим образом подходит для применения в автономных океанографических средствах измерения в тех случаях, когда непосредственно *in situ* необходимо организовать выполнение значительного объема чисто вычислительных операций. Это характерно для акустических профилографов, где по результатам измерений доплеровского сдвига частоты между отраженным и зондирующим сигналами рассчитываются океанографические параметры нескольких слоев воды, а также для волнографов, в которых по колебаниям давления на глубине вычисляются по сложным алгоритмам высота и период поверхностного волнения (см. п. 3.6). Включение в состав автономных приборов такого МПК может оказаться полезно при непосредственном определении солености морской воды *in situ* по результатам измерений ее температуры, электрической проводимости и гидростатического давления с одновременным сжатием исходной информации (см. п. 3.7), а также для аппаратурной реализации коррекции характеристик различных типов датчиков.

В тех случаях когда объем вычислительных операций ограничен или может быть сведен к простейшим алгоритмам, более целесообразно для построения автономных СИ океанографических параметров использовать 16-разрядный микропроцессорный комплект серии К588. Этот МПК в наилучшей степени, чем предыдущий, приспособлен для создания систем управления периферийными устройствами, в качестве которых в СИ выступают датчики и ОЗУ. На его основе можно строить широкий набор различной измерительной аппаратуры полностью на микропроцессорной элементной базе при минимуме аппаратурных затрат. Это обусловлено широкой номенклатурой БИС К/КР 588-й серии, из которых для построения океанографических СИ в основном требуются следующие: арифметическое устройство (АУ) К588-ВС2, управляющая память (УП) К588ВУ2, магистральный приемопередатчик (МПП) К588ВА1, системный контроллер (СК) К588ВГ1, контроллер запоминающих устройств (КЗУ) К588ВГ2, двухканальный программируемый таймер (Т) К588ВИ1, контроллер прерываний (КПРВ) К588ВН1, селектор адреса (СА) К588 ВТ1, универсаль-

ный регистр (УР) К588ИР1, адаптер мультиплексного канала (АК) К588ВГ6, контроллер аналого-цифрового преобразователя (КАЦП) К588ВГ4. Все перечисленные БИС обладают хорошей помехозащищенностью, работают от одного источника питания напряжением +5 В, совместимы микросхемами КМДТ и ТТЛ структур, в том числе 176, 561, К564 и 134-й серии. Граничная частота элементов МПК серии К588 не ниже 500 кГц, а потребление в динамическом режиме на этой частоте не более 25 мВт, в статическом — 1 мВт [27, 74].

Совместно с данным МПК в качестве элементов оперативного запоминающего устройства ОЗУ целесообразно применять БИС 537РУ3 объемом памяти 4 Кбит и 537РУ17 объемом памяти 16 Кбит статического типа, а в качестве постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) системной части программы — микросхемы К1601РР3. Последние представляют собой электрически перепрограммируемые ПЗУ емкостью 16384 бит с организацией 2048×8, с отсутствием энергопотребления в режиме хранения информации и током потребления не более 35 мА при ее считывании [74].

6.2. Автономный микропроцессорный измеритель основных океанографических величин

Для создания позиционных автономных измерителей скорости и направления течения, температуры, электрической проводимости и гидростатического давления с использованием микропроцессорных БИС в полной мере подходит МПК 588-й серии. Типовая структура такого автономного океанографического СИ (рис. 6.1) включает в себя:

— центральный процессорный элемент, состоящий из АУ, СК и пяти микросхем УП;

— блок памяти результатов измерений, состоящий из ОЗУ (537РУ3), КЗУ₁, универсального регистра адреса УР₁ ОЗУ;

— блок памяти системной программы, состоящий из ПЗУ (К1601РР3), КЗУ₂ и универсального регистра адреса УР₂ ПЗУ;

— программируемый таймер Т₁ измерительного канала сигнала с частотного датчика Д₁;

— программируемый таймер Т₂ измерительного канала сигнала с время-импульсного датчика Д₂;

— измерительный канал сигнала U_д с аналогового датчика Д₃, состоящий из аналого-цифрового преобразователя АЦП, контроллера АЦП, контроллера прерываний КПРВ, селектора адреса СА;

— программное устройство, состоящее из программируемого таймера Т_{пр} и генератора Г кварцовой частоты;

— коммутатор внешней магистрали ВМ, состоящий из магистрального приемопередатчика МПП, адаптера мультиплексного

АК и трансформатора T_p для подключения через герметичный разъем ГР корпуса прибора к его внешним устройствам.

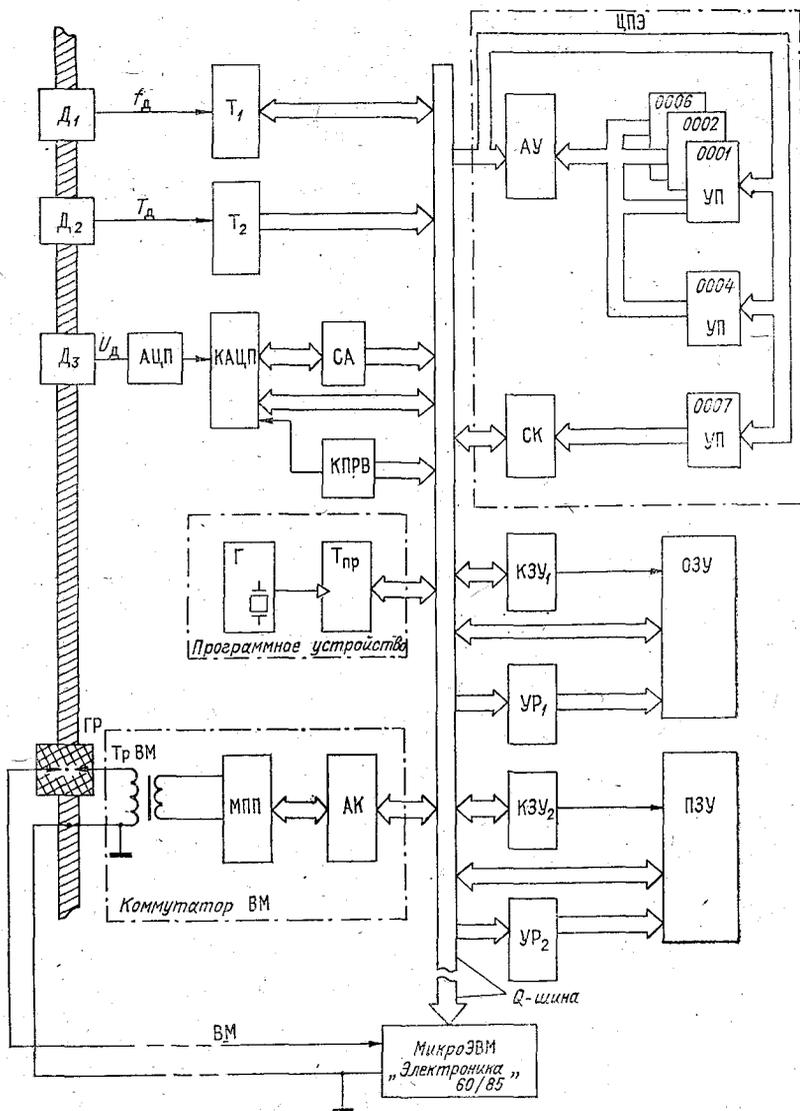


Рис. 6.1. Типовая структура микропроцессорного автономного океанографического средства измерения.

Функционирование микропроцессорного автономного измерителя, построенного на основе приведенной типовой схемы, осуществляется примерно в той же последовательности, что и

АЦИТа-У-01 и АЦИТа-У-02, выполненных на микросхемах средней степени интеграции (см. гл. 4). В таком приборе измерения осуществляются автоматически с заданной временной цикличностью, формируемой таймером $T_{\text{пр}}$ программного устройства. Цикличность устанавливается оператором по командам с бортовой аппаратуры и определяется кодом, занесенным в регистр таймера. В момент выполнения измерений таймер запускает в работу центральный процессорный элемент, который по системной программе, хранимой в ПЗУ, производит опрос датчиков D_1 , D_2 , D_3 . Полученные результаты измерений заносятся в ОЗУ, где хранятся до окончания наблюдений. В процессе функционирования данного микропроцессорного СИ связь между всеми его элементами, ПЗУ и ОЗУ осуществляется по центральной 16-разрядной Q-шине по командам с системного контроллера через соответствующие магистральные приемопередатчики, контроллеры ЗУ и универсальные регистры $УР_1$, $УР_2$ [64].

После окончания наблюдений на буйковой станции измеритель поднимается на борт судна и накопленная в его ОЗУ информация представляется потребителю.

Для управления микропроцессорным измерителем и считывания полученной информации целесообразно использовать в качестве бортовой аппаратуры персональные компьютеры и микроЭВМ, например «Электроника-60», «Электроника-85». Их подключение к внешней магистральной измерителя также может производиться через одноконтактный герметичный разъем (ГР) двухпроводной линией, представляющей собой мультиплексный канал связи измеритель — микроЭВМ. В таком канале организуется двунаправленный полудуплексный обмен в интерфейсе RS-232. Для перехода от Q-шины данного СИ к мультиплексному каналу связи с микроЭВМ с трансформаторной развязкой сигналов обмена служат адаптер АК, магистральный приемопередатчик и понижающий трансформатор T_p . При выполнении настройки описанного микропроцессорного измерительного устройства указанные типы микроЭВМ могут выступить в качестве отладочных комплексов и подключаться непосредственно к Q-шине таких устройств.

В рамках данной структуры в качестве ЦПЭ вполне может быть использован микропроцессор К1806 ВМ2, что заметно сократит аппаратные затраты на построение автономных измерителей. В этом отношении исключительно перспективным представляется применение в подводных аппаратах персональных микрокомпьютеров с жидкокристаллическим дисплеем. На нем можно отображать результаты измерений, контрольных тестов и самопроверок прибора, установленного режима, и другой справочной информации. При наличии прозрачного окна в корпусе измерителя выполнение всех перечисленных операций также можно организовать без необходимости вскрытия его герметичного корпуса путем подачи команд по шине ВМ от внешних устройств. В качестве такого компьютера можно, например, применить одноплатную мик-

роЭВМ «Электроника-МК-85 м», построенную на элементах 1806-й серии в бескорпусном исполнении [92].

Внедрение микропроцессоров в автономные океанографические средства измерения не только существенно улучшит качество получаемого материала наблюдений, но и позволит существенно, в 3—4 раза, уменьшить массогабаритные характеристики этой техники, что крайне важно, учитывая области ее применения.

6.3. Бортовая аппаратура на базе микроЭВМ

Наилучшим образом принципы системного подхода к проектированию океанографической измерительной техники реализуются при использовании в качестве бортовой аппаратуры автономных СИ персональных компьютеров, мини- и микроЭВМ, снабженные соответствующими специализированными интерфейсными блоками связи с периферийными устройствами. Таким образом, выполнено прямое сопряжение ДКРТ «Вектор» по каналу RS-232 с ЭВМ «Электроника-85» и измерителей АЦИТ-У-01, -02, а также самописца уровня моря «Цунами» — с микроЭВМ «Искра-1256» через БИФ [63]. Данный блок выполняет согласование приборного интерфейса этих измерителей с внутренним интерфейсом микроЭВМ «Искра-1256». В результате при подключении двухпроводной линией внешней магистрали вышеперечисленных измерителей через герметичный разъем к БИФ, установленную в микроЭВМ, накопленная информация из их полупроводниковой памяти может непосредственно вводиться в ОЗУ ЭВМ, а по командам с ее пульта — устанавливаться заданный режим цикличности работы этих приборов. БИФ также приспособлен для приема данных от указанных СИ по гидроакустическому каналу связи, что делает возможным организацию на базе «Искра-1256» обработки информации в реальном масштабе времени.

В состав универсального интерфейсного блока, устанавливаемого в микроЭВМ «Искра-1256» для связи с приборами АЦИТ-У-01, -02 и «Цунами» (рис. 6.2) входят: внутренний адаптер связи с шиной микроЭВМ ВА, декодер команд ДК, дешифратор физического адреса БИФ ДФАУ, гидрофон с предварительным усилителем; усилитель гидроакустического канала связи ($У_a$), усилитель кабельного канала связи с измерителями ($У_k$), регистры информации кабельного и гидроакустического каналов RG_k и RG_a , формирователь кода состояний $F_{\text{сост}}$, системный контроллер БИФ СК БИФ с внутренним тактовым генератором кварцеванной частоты, формирователи команд «Запрос» и «Стирание» F_z , $F_{\text{ст}}$.

Совместная работа данного устройства по прямой связи ЭВМ «Искра-1256» и измерителя АЦИТ-У-01 начинается при формировании в ЭВМ команды «Установить связь» с интерфейсным блоком, адрес которого совпадает с физическим адресом, установленным в рассматриваемом БИФе. Появление такой команды может инициироваться запросом оператора или при выполнении

ЭВМ «Искра-1256» какой-либо программы, в цикле работы которой встречается соответствующий набор операторов. По этой команде на магистрали информации ввода—вывода МИВВ ЭВМ выставляется код физического адреса устройства ФАУ, который одновременно появляется на внутреннем адаптере БИФ. По-

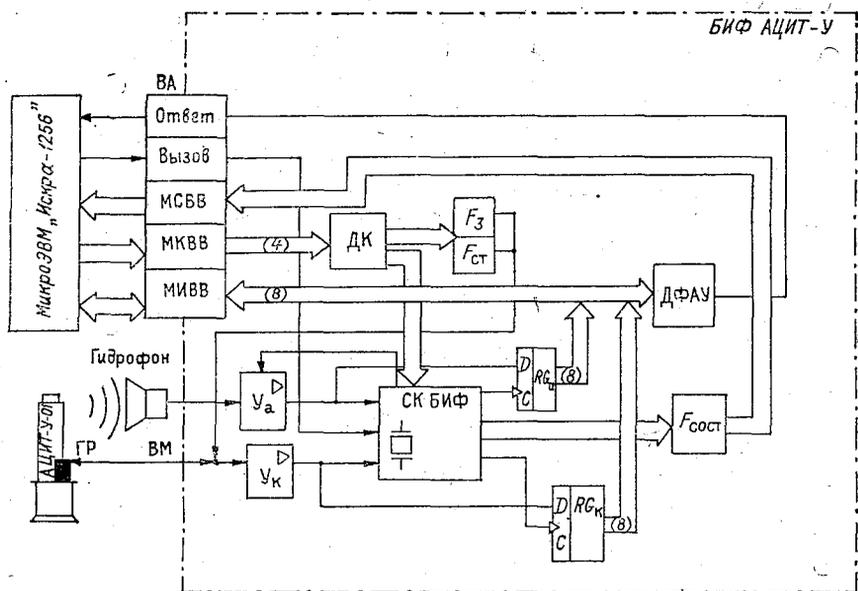


Рис. 6.2. Структурная схема блока интерфейсного микроЭВМ «Искра-1256».

скольку адаптер ВА находится в исходном положении в состоянии ввода информации с ЭВМ, то при совпадении выставленного кода ФАУ с кодом адреса БИФ срабатывает дешифратор ФАУ. В результате при появлении на этом адаптере очередной команды «Вызов» в ЭВМ выдается сигнал «Ответ». С этого момента БИФ АЦИТа-У находится в состоянии функциональной связи с ЭВМ и дальнейший обмен между ними осуществляется побайтно по типовой схеме «Вызов»—«Ответ». Тогда с помощью ЭВМ «Искра-1256» возможно организовать считывание данных из полупроводниковой памяти АЦИТа-У-01, прием их по гидроакустическому и кабельному каналам связи, выполнять переключение программы цикличности измерения и стирание памяти.

Работа БИФ в режиме считывания данных осуществляется по следующему алгоритму. На магистрали команд ввода—вывода МКВВ ЭВМ и, следовательно, внутреннем адаптере БИФ появляется кодовая комбинация, соответствующая команде «Начальная установка» НУ, которая дешифрируется на декодере команд ДК и устанавливает системный контроллер БИФ в исходное состояние. Затем аналогичным образом на выходе ДК формируется команда «Кабельный вход», разрешающая занесение информации

в регистр RG_k . Далее оператором из ЭВМ выдается команда «Запрос», которая через $MKBV$, ДК и формователи \bar{F}_3 и $\bar{F}_{ст}$ поступает в соответствующем формате через герметичный разъем (ГР) в измеритель АЦИТ-У-01.

В ответ из измерителя на шину «Внешняя магистраль» связи с БИФ ЭВМ «Искра-1256» выдается последовательный двоичный код частотой 8192 Гц, несущей информацию, записанную по одному из адресов полупроводниковой памяти АЦИТа-У-01. Этот код байтно заносится в регистр кабельного канала RG_k . После окончания этой операции системный контроллер БИФ выдает соответствующую команду на формователь состояний $F_{сост}$, который выставляет на внутреннем адаптере BA магистрали состояний ввода — вывода $MCBV$ ЭВМ код состояния, свидетельствующий о том, что в БИФ поступил байт информации.

ЭВМ анализирует этот код и выдает в БИФ команду «Принять байт», по которой регистр RG_k подключается через ВАК МИВВ. Затем по этой магистрали передается информация об этом одном байте результатов измерений.

После поступления из измерителя АЦИТ-У-01 последующего байта информации БИФ вновь выдает на $MCBV$ кодовую комбинацию, свидетельствующую о его готовности переслать подготовленный новый байт данных. Он также считывается в ЭВМ. Таким образом, ЭВМ опрашивает всю или часть памяти измерителя. Количество адресов памяти, подлежащих считыванию, в ЭВМ задается программно.

При необходимости работы с измерителем АЦИТ-У-01 в режиме измерения по команде оператора формируется последовательность команд в интерфейсе связи ЭВМ и БИФ, аналогичная ранее описанной. Только при этом программно задается не число адресов полупроводниковой памяти, подлежащих считыванию, а количество циклов измерений.

В случае выполнения измерений АЦИТ-У-01 *in situ* в реальном масштабе времени БИФ производит прием и расшифровку позиционного кода, поступающего от АЦИТ-У-01 по гидроакустическому каналу связи, с последующей передачей данных в ОЗУ ЭВМ «Искра-1256». При этом данное устройство осуществляет стробирование входа гидроакустического усилителя на время действия реверберационной помехи, выделение сбойных посылок, дополнительную синхронизацию приемо-передачи.

Перед началом приема от ЭВМ выдается последовательность команд «Установить связь», «Начальная установка», «Гидроакустический канал связи».

При поступлении сигналов позиционного кода из гидроакустического канала связи они принимаются гидрофоном, размещенным в воде, и усиливаются гидроакустическим усилителем до уровня логических сигналов «1» и «0». Первый поступивший синхроимпульс запускает системный контроллер БИФ, который выполняет расшифровку поступающей информации, занесение ее

в регистр RG_a и передачу через внутренний адаптер на магистраль $МВВ$ ЭВМ. Одновременно контроллер осуществляет выделение сбойных посылок и блокирование входа усилителя U_a на время действия реверберационной помехи. Формирователь $F_{сост}$ выдает на магистраль $МСВВ$ ЭВМ команду «НУ» и БИФ переходит в режим ожидания следующего гидроакустического сигнала.

При выполнении микроЭВМ соответствующих микропрограмм на внутреннем адаптере магистрали $МКВВ$ может быть установлена кодовая комбинация, по которой декодер команд вызывает срабатывание формирователей F_a и $F_{ст}$. Сигналы с этих формирователей в виде команд «Запрос» и «Стирание» подаются на шину $ВМ$ АЦИТа-У-01 и служат для его управления. При соблюдении требуемой последовательности формирований с пульта ЭВМ команд «Запрос» и «Стирание», манипулируя магнитом-выключателем, оператор может устанавливать заданный режим цикличности работы АЦИТа-У-01 или производить стирание информации в его памяти.

Конструктивно БИФ АЦИТа-У для связи с ЭВМ «Искра-1256» выполнен в виде двух печатных плат, закрепленных на общей раме размерами $320 \times 180 \times 20$, соответствующие размеру любого стандартного блока, связанного с магистралью ввод — вывод ЭВМ «Искра-1256». На одной печатной плате располагается логическая часть схемы БИФ, а на другой — гидроакустический усилитель. Логическая часть схемы выполнена на цифровых микросхемах 561-й и 155-й серий с использованием в качестве дешифратора ФАУ микросхемы КР580 ВА87, адаптера связи с внутренней магистралью ЭВМ — интегральных элементов К155ХЛ1.

С помощью подобных устройств может быть организовано сопряжение других типов автономных измерителей с микроЭВМ и персональными компьютерами. На сегодняшний день главным препятствием в этом направлении является применение практически в каждой отдельной модели океанографических СИ своего приборного интерфейса, не соответствующего действующими международным и государственным стандартам, на которые ориентированы средства вычислительной техники [63, 90, 97].

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Нормирование и контроль метрологических характеристик

Достоверность результатов измерений достигается только при известных метрологических характеристиках, используемых СИ. Значения этих характеристик задаются комплексом нормированных метрологических характеристик (КНМХ) данного СИ. В отечественных СИ указанное нормирование выполняется на основании ГОСТ 8.009-84 [80]. Данным ГОСТом в основном руководствуются при задании метрологических характеристик океанографической измерительной техники.

В рамках ГОСТа 8.009-84 для расчетов погрешности конечных результатов измерения любого экземпляра и типа СИ принята следующая модель инструментальной составляющей погрешности измерения:

$$\Delta_{instr} = \Delta_{MI} * \Delta_{int}, \quad (7.1)$$

где символом * обозначается объединение погрешности Δ_{MI} собственно средства измерения в реальных условиях применения и составляющей погрешности Δ_{int} , обусловленной взаимодействием самого средства измерения с объектом измерения. Под объединением понимают применение к указанным составляющим Δ_{MI} и Δ_{int} погрешностей правил суммирования (алгебраического или векторного) в зависимости от степени их взаимосвязанности (строго коррелированы или статистически независимы). При выборе способа нормирования погрешности Δ_{MI} автономных СИ океанографических параметров исходят из уровня значимости случайной составляющей $\sigma[\Delta]$ этой погрешности. Для тех приборов, у которых составляющая $\sigma[\Delta]$ не может считаться пренебрежимо малой, нормирование погрешности $\sigma[\Delta]$ данного СИ в реальных условиях выполняется согласно 1-му виду модели этой погрешности. В этом случае модель Δ_{MI} представляется в форме следующей символической записи, объединяющей все возможные составляющие погрешности океанографического СИ в реальных условиях применения:

$$\Delta_{MI} = \Delta_{OS} * \Delta_o * \Delta_{OH} * \sum_{i=1}^l \Delta_{C_i} * \Delta_{днн}, \quad (7.2)$$

где Δ_{OS} — систематическая составляющая основной погрешности; Δ_0 — случайная составляющая основной погрешности; Δ_{OH} — случайная составляющая основной погрешности, обусловленная гистерезисом; $\sum_{i=1}^l \Delta_{C_i}$ — объединение дополнительных погрешностей Δ_{C_i} , обусловленных действием влияющих факторов и не информативных параметров входного сигнала средства измерения (влияющих величин); l — число дополнительных погрешностей; $\Delta_{дин}$ — динамическая погрешность СИ.

Обычно модель 1-го вида используется при нормировании метрологических характеристик *CTD*-измерителей. Это обусловлено тем, что в измерениях температуры и электрической проводимости морской воды стремятся обеспечить максимальную точность конечного результата, достигаемую с помощью используемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В итоге номинальная цена единицы q младшего разряда выходного кода этого преобразователя оказывается соизмерима со случайной составляющей Δ_0 основной погрешности. Согласно рекомендациям ГОСТ 8.009—84, случайная составляющая может считаться пренебрежимо малой, если ее среднее квадратическое значение $\sigma[\Delta_0] < 0,1q$. В отношении канала измерения давления выбор модели 1-го вида для нормирования погрешности Δ_{MI} обусловлен наличием в большинстве случаев в датчиках давления погрешности Δ_{OH} , обусловленной гистерезисом. Значение этой погрешности Δ_{OH} , приведенное к концу диапазона, как правило, достигает $\pm (0,2 — 0,5) \%$, что значительно выше разрешающей способности применяемых АЦП. В то же время при наличии гистерезиса данный ГОСТ рекомендует не принимать во внимание указанный вид погрешности только при условии $\Delta_{OH} < 0,3q$, что обычно в *CTD*-измерителях не обеспечивается.

Другим обстоятельством, делающим предпочтительным использование в *CTD*-измерителях 1-й модели нормирования погрешностей является то, что в них используются не номинальные, а индивидуальные градуировочные характеристики каналов измерения температуры и электрической проводимости морской воды. Это позволяет существенно повысить точность измерения соответствующих океанографических параметров путем сведения к минимуму систематических составляющих основной погрешности Δ_{OS} . Тогда систематические погрешности Δ_{OS}^T и Δ_{OS}^R канала измерения температуры и электрической проводимости определяют не разброс градуировочных характеристик СИ от образца к образцу рассматриваемых приборов, а только задают границы их временной стабильности. Исходя из годовой длительности наблюдений, выполняемых автономными океанографическими СИ, дрейф этих

градуировочных характеристик за такой срок сможет достигнуть значений порядка $\pm (0,03 - 0,05)^\circ\text{C}$ по каналу температуры $\pm 0,01\%$ — по электрической проводимости. Такие значения вполне соизмеримы со случайными составляющими этих погрешностей, но при раздельном нормировании случайной и систематической составляющих погрешностей, последние при оценке точности конечных результатов краткосрочных измерений могут быть исключены. В итоге потребитель информации получает возможность более корректно ставить натуральный эксперимент и более правильно интерпретировать данные, получаемые при проведении исследований одним *СТД*-измерителем. В течение интервала времени существенно меньшим чем 1 год [65].

В цифровом измерителе параметров течения и волнения случайная составляющая погрешности напротив может считаться пренебрежимо малой. В этих средствах измерения не стремятся существенно повысить разрядность цифровых преобразователей, так как требуемые погрешности измерения параметров течения и волнения не превышают 5% уровня. Обычно значения случайных составляющих погрешностей $\sigma[\Delta]$ в таких СИ целиком зависят от конструкций датчиков и оказываются, как правило, меньше 10% цены наименьшего разряда q или дискретности результата измерения. Дальнейшее снижение цены младшего разряда путем повышения разрядности преобразователей не может считаться оправданным, поскольку ведет к дополнительным аппаратным затратам, крайне нежелательным при построении автономных приборов [109].

Таким образом, условие $\sigma[\Delta] < 0,1q$ в равной степени выполняется для пропеллерных и ультразвуковых датчиков скорости водного потока, магнитных компасов и вибростержневых датчиков давления, используемых для получения данных о параметрах волнения. В таких СИ погрешности Δ_{MI} , согласно рекомендациям ГОСТ 8.009.84, нормируются с использованием модели 2-го вида. Символическая запись, объединяющая составляющие занормированной таким образом погрешности Δ_{MI} , имеет следующий вид:

$$\Delta_{MI} = \Delta_0 * \sum_{i=1}^l \Delta_{C_i} * \Delta_{\text{дин}}. \quad (7.3)$$

Для решения вопроса о нормировании и установлении источников дополнительных и динамических составляющих погрешностей автономных океанографических измерителей обратимся к модели преобразования в этих СИ случайного векторного поля $x(t, r)$ океанографических величин $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ вида (1.3):

$$Y_i = F_i[x_i(t, r)] + \psi_i[x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n, t, r, \Pi].$$

Из рассмотрения модели (1.3) видно, что источником дополнительных погрешностей океанографических СИ является зависимость результата измерения параметра Y_i не только от инфор-

мативной величины $x_i(t, g_i)$, но и от остальных неинформативных компонентов $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$ поля X , а также от вектора g пространственных координат и комплекса технических характеристик Π данной модели СИ. Таким образом, в рассматриваемых СИ различают дополнительные погрешности от внешних факторов и пространственных характеристик применяемого СИ.

Согласно рекомендациям ГОСТ 8.009-84, при нормировании дополнительных погрешностей следует задавать функции влияния $\psi_i(\xi)$ от неинформативных параметров. Обычно в океанографических СИ это выполняется раздельно по каждой из неинформативных величин $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$ и отдельно по каждой из координат r_1, r_2, r_3 вектора g . В общем случае в океанографических СИ нормированию подлежит ряд функций влияний $\psi_1(x_1), \psi_2(x_2), \dots, \psi_n(x_n)$ по каждому из значащих компонентов и $\psi(r_1), \psi(r_2), \psi(r_3)$ по каждой из координат, а также функции влияния приборных технических характеристик $\{\psi(\Pi)\}$.

При этом под значащими компонентами понимают только такие, которые обеспечивают существенные значения дополнительной погрешности Δ_{c_i} . Согласно рекомендациям ГОСТ 8.009-84 незначительными погрешностями могут считаться такие, которые в раздельности или в сумме удовлетворяют условию

$$\sum_{i=1}^r \{\Delta_{c_i}\}_{\max} \leq 0,17 \Delta_{MI_{\max}}, \quad (7.4)$$

где $\{\Delta_{c_i}\}_{\max}$ — наибольшее возможное значение i -й дополнительной погрешности в рабочих условиях применения средства измерения данного типа; $\Delta_{MI_{\max}}$ — наибольшее возможное значение суммарной погрешности средства измерения данного типа в рабочих условиях его применения; r — число дополнительных погрешностей, удовлетворяющих условию (7.4).

Например, в каналах измерения температуры CTD-систем нормированию подлежат, как правило, значения дополнительных погрешностей и вид функции влияния только давления и скорости обтекающего водного потока, а в каналах измерения электрической проводимости задаются функции влияния от температуры, а также давления и скорости потока. В измерителях параметров течения, наоборот, основное внимание при нормировании дополнительных погрешностей уделяют погрешностям, вызванным изменениями положения приборов в пространстве.

В свою очередь для нормирования динамических погрешностей $\Delta_{\text{дин}}$ этих СИ для каждого конкретного измерительного канала используют свои динамические характеристики. Например, для каналов измерения температуры, электрической проводимости и направления течения, как правило, ограничиваются нормированием постоянной времени реакции этих каналов на изменение входного информативного параметра. В каналах измерения скорости задают амплитудно-частотную характеристику.

Это обусловлено тем, что океанографические СИ не всегда можно рассматривать как линейные в динамическом отношении, к которым применим ГОСТ 8.009-84. Поэтому более точное определение правил нормирования динамических погрешностей, адекватно отражающих реальную картину взаимодействия объекта и океанографических средств измерения, требует, по-видимому, еще дополнительных исследований и разработок. Основой для этого должны стать метрологические модели таких измерительных систем [14, 100, 17].

Контроль метрологических характеристик всех океанографических СИ предполагает проведение поверки образцов этих приборов на их соответствие КНХМ, заданным техническим заданием или потребителями получаемой информации. Задачей данной операции является определение основной, дополнительной и по возможности динамической составляющих погрешности всех образцов измерительных приборов, находящихся в эксплуатации или поступающих в обращение с завода-изготовителя или после ремонта. Поверки выполняются при проведении экспериментальных испытаний приборов. Различают госприемочные, госконтрольные, приемо-сдаточные, ведомственные и межведомственные испытания с целью установления или проверки КНМХ измерительной техники. По результатам этих испытаний после сравнения значений полученных погрешностей с заданными КНМХ принимается решение о направлении данного экземпляра СИ в обращение [79, 80, 109].

В наиболее полной мере экспериментальные исследования выполняются при госиспытаниях, после которых Госстандарт дает (или не дает) разрешение к серийному производству данной измерительной аппаратуры и к ее неограниченному применению. В равной степени все вышеизложенное относится к автономным океанографическим СИ. На госиспытаниях этих приборов контролируются значения основных дополнительных и динамических погрешностей, а на приемо-сдаточных, — только значения основных. Данное обстоятельство обусловлено тем, что основные погрешности определяются не конструкцией прибора, а технологией его производства, которая может изменяться от образца к образцу. Поэтому приемо-сдаточным испытаниям обычно подвергают все экземпляры автономных океанографических СИ.

Особую роль приобретает контроль метрологических характеристик, выполняемый при интеркалибрации океанографических СИ по различным национальным поверочным схемам [49, 89, 139]. В этом случае поверке подлежат не только сами образцы испытуемой измерительной аппаратуры и даже не типы СИ, но и сами национальные поверочные схемы вместе с образцовым и испытательным оборудованием, входящим в их состав. Результаты таких сравнений и сличений позволяют правильно интерпретировать и оценивать достоверность материалов экспериментальных океанографических исследований, полученных в результате международного обмена гидрометеорологическими данными.

7.2. Методы и средства поверки *CTD*-измерителей

Поверка *CTD*-измерителей, как правило, выполняется одновременно с определением индивидуальных градуировочных характеристик этих приборов по каждому измерительному каналу. Затем данные градуировок заносятся в паспорт или формуляр испытуемого СИ. Эти паспортные характеристики используются (см. п. 5.3) при обработке информации, полученной с помощью конкретного прибора. В процессе поверок также определяются значения и вид функций влияния неинформативных параметров. Наличие информации о функциях влияния позволяет корректно вносить поправки в показания СИ по результатам автокалибровок измерительных каналов, как это выполняется в *CTD*-измерителе АЦИТ-У-02.

Поверка измерительных каналов *CTD*-измерителей осуществляется с помощью специального поверочного оборудования, прошедшего метрологическую аттестацию и включающего в себя образцовые средства измерения температуры, электрической проводимости и гидростатического давления. Данная метрологическая операция в отношении каналов измерения температуры и давления опирается на действующие государственные поверочные схемы: по каналу температуры — на ГОСТ 8.079-79 и ГОСТ 8.080-80, по каналу давления — на ГОСТ 8.017-79. Поверка канала электрической проводимости в современных СИ опирается на Шкалу практической солености, 1978 ШПС-78. В этой шкале в качестве первичного эталона принята относительная электрическая проводимость раствора KCl с концентрацией 32,4356 г на 1 кг раствора дистиллированной воды при температуре 15°C и нормальном атмосферном давлении. Относительная электрическая проводимость такого раствора принимается равной точно единице. Вторичным стандартом является нормальная морская вода по ГОСТу 18456-82 с соленостью 35 ‰ при тех же внешних условиях [82]. Эта нормальная вода в СССР выпускается аналитической лабораторией ИО АН [111] и практически используется для проведения поверок всех *CTD*-систем.

Такой подход к метрологической аттестации канала электрической проводимости обусловлен тем, что действующая Государственная поверочная схема по удельной электрической проводимости растворов электролитов по ГОСТ 8.457-82 не удовлетворяет требованиям практической океанологии в части определения солености по измеренной электрической проводимости морской воды. Этот ГОСТ позволяет аттестовать рабочие средства с погрешностью не выше $\pm 0,05\%$, тогда как ШПС-78 — на порядок выше. В соответствии с этим поверка измерительного канала электрической проводимости может производиться с использованием любого СИ компараторного типа, например, электросолемера ГМ-65.

В процессе такой поверки испытуемый *CTD*-измеритель целиком помещается последовательно в два теплоизолированных бака с образцовым раствором KCl . В одном из них относительная элек-

трическая проводимость R_t раствора по отношению к нормальной воде должна примерно соответствовать концу диапазона измерения, т. е. равняться 1,3; а во втором — его середине, т. е. 0,65. Растворы в баках имеют температуру T_1 , близкую к температуре лабораторного помещения поверки. Теплоизоляция баков должна поддерживать постоянно температуры T_1 в пределах $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Температура может контролироваться с помощью обычного равноделенного ртутного термометра или по каналу температуры самого поверяемого измерителя. Тогда в баке с раствором с относительной проводимостью $R_{T_1} = 1,3$ будет выполняться градуировка прибора, а во втором баке — его поверка. Измерение электрической проводимости R_{T_2} образцовых растворов, вообще говоря, может происходить уже при другой температуре T_2 пробы, чем она имела в испытательном баке. При использовании для этих целей электросолемера ГМ-65 с цепью термокомпенсации требование поддержания стабильности температуры пробы составляет не более $0,1^\circ\text{C}$ [26]. При этом для перевода значения проводимости пробы R_{T_2} , измеренного при температуре T_2 , к ее значению R_{T_1} при другой температуре T_1 , которое эта проба имела в испытательном баке, можно пользоваться следующей формулой из работы [26]:

$$R_{T_1} = R_{T_2} \left\{ 1 + 10^{-5} (R_{T_2} - 1) (T_2 - T_1) [96,7 - 72,0R_{T_2} + 37,2R_{T_2}^2 - (0,63 + 0,26R_{T_2})(\bar{T}_1 + T_2 - 30)] \right\}. \quad (7.5)$$

На основании вышеизложенного, организована градуировка и поверка каналов измерения температуры, электрической проводимости и гидростатического давления измерителя АЦИТ на заводе-изготовителе. При градуировке каналов температуры используется активный термостат ТВП-2, заполненный слабым спиртовым раствором. В связи с малым внутренним объемом применяемого термостата у поверяемых образцов измерителей датчик температуры снимается с верхней крышки корпуса прибора и отдельно от него помещается в указанный термостат. В термостате последовательно устанавливается температура -2 ; $+20$; $+36^\circ\text{C}$. Контроль за температурой в термостате осуществляется с помощью ртутного равноделенного термометра по ГОСТу 13648-68 с погрешностью измерения $\pm 0,02^\circ\text{C}$. На каждой поверяемой точке делается выдержка в 10 мин для того, чтобы чувствительный элемент испытываемого датчика принял температуру раствора спирта. Для повышения производительности градуировочных работ одновременно в термостате размещаются датчики от четырех-пяти приборов. При этом сама измерительная схема АЦИТа остается снаружи термостата и функционирует при температуре лабораторного помещения. Подключение чувствительного элемента датчика АЦИТа, помещенного в термостат, к его измерительной схеме осуществляется с помощью специального удлинительного кабеля калиброванного значения сопротивления и емкости. Для исключе-

ния влияния кабеля на показания прибора в другое плечо мостовой измерительной схемы канала температуры включается балансный резистор и емкость, равные параметрам использованного удлинительного кабеля. Получаемые при такой градуировке значения кода K_2 АЦИТа по каналу температуры для всех трех градуировочных точек шкалы заносятся в формуляр данного образца измерителя. Одновременно выполняется первичная поверка этого измерительного канала. Для этого дополнительно при температуре $+10^\circ\text{C}$ и $+25^\circ\text{C}$ снимают показания с образцовых равноделенных термометров и испытываемых АЦИТов по каналу температуры. Считается, что конкретный образец измерителя успешно прошел первичную поверку при заданной допустимой погрешности в $\pm 0,07^\circ\text{C}$, если в градуировочных точках среднее квадратическое отклонение в разбросе показаний по температуре не превысило $0,01^\circ\text{C}$, а различия в показаниях АЦИТа и образцового термометра были меньше $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Результаты измерений температуры АЦИТом вычисляются на основании градуировочных кодов при температуре -2 , 20 и 36°C по формуле (5.2). Такая раздельная поверка датчика температуры и измерительной схемы АЦИТа вызвана малым внутренним объемом существующих водяных термостатов, не позволяющим выполнять поверку методом полного погружения прибора. Это влечет за собой ухудшение метрологических характеристик АЦИТа, поскольку, во-первых, не удастся полностью скомпенсировать в канале измерения температуры емкость переходного кабеля. Во-вторых, опорные резисторы этой схемы и все другие измерительные элементы поверяемого АЦИТа находятся при одной температуре лабораторных условий, а чувствительный элемент датчика температуры — при другой. Причем данное СИ обладает индивидуальной функцией влияния температуры на работу измерительной схемы, значение которой при поверках не определяется. В-третьих, необходимость в частичной разборке прибора и расчет температурных поправок даже по типовой функции влияния существенно снижают производительность труда при проведении поверочных работ. Кроме того, раздельная поверка и градуировка каналов электрической проводимости и температуры практически в 2 раза увеличивает трудоемкость работ при приемо-сдаточных испытаниях *СТД*-измерителей.

Для исключения вышеназванных недостатков обычно используют установки, позволяющие производить одновременную поверку каналов температуры и электрической проводимости *СТД*-систем методом полного погружения [89, 132]. В ААНИИ был разработан соответствующий градуировочный стенд (рис. 7.1), состоящий из пассивного термостата 9 на 200 л, стандартного активного термостата 1 типа ТПВ-6 с рабочей камерой на 30 л, теплообменника 3, змеевика-радиатора 2 и малоомощной перекачивающей помпы 4. В пассивном термостате, выполненном в виде цилиндрической емкости с герметичной крышкой и с теплоизоляцией из пенопласта, может размещаться одновременно до пяти приборов АЦИТ или АЦИТ-У-02. Термостат 9 заливается морской

водой с соленостью 35 ‰ и относительной электрической проводимостью, близкой к 1,0 при температуре 15 °С. Температура в термостате измеряется ртутными равноделенными термометрами 7 с погрешностью не более $\pm 0,01$ °С. Равномерность температурного поля в объеме пассивного термостата обеспечивается активным перемешиванием воды с помощью механической пропеллерной мешалки 5, а также за счет непрерывной циркуляции морской

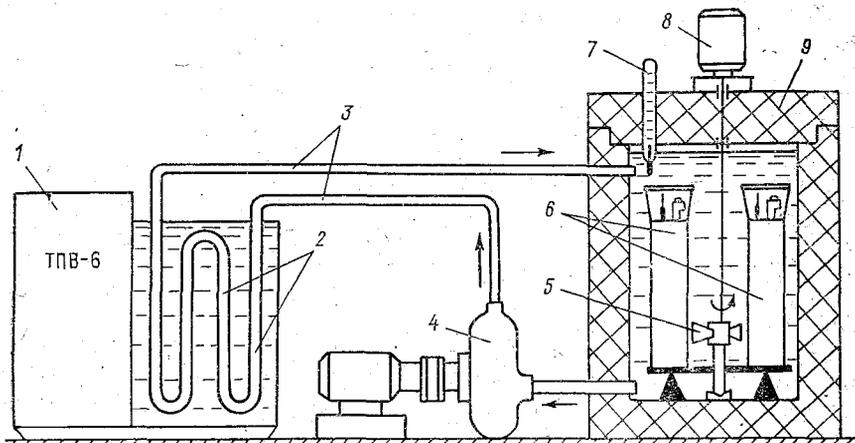


Рис. 7.1. Стенд для градуировки и поверки каналов измерения температуры и электрической проводимости АЦИТа.

1 — ТПВ-6; 2 — змеевик-радиатор; 3 — теплообменник; 4 — помпа; 5 — мешалка; 6 — АЦИТы; 7 — термометр; 8 — двигатель; 9 — термостат.

воды через теплообменник 3. Результаты измерений температуры и электрической проводимости считываются с приборов АЦИТа по акустическому каналу связи через приемный гидрофон, размещаемый внутри емкости. Приборы АЦИТа работают в режиме цикличности измерения 30 с со сдвигом на 5—6 с для исключения взаимных помех.

Теплообменник 3 выполняет функцию переноса тепла из рабочей камеры термостата ТПВ-6 в емкость пассивного термостата 9. Для этого в рабочей камере первого термостата устанавливается змеевик-радиатор, выполненный из стальной трубы диаметром 22 мм. Скорость перекачки морской воды через теплообменник (40 л/мин) выбрана с таким расчетом, чтобы обеспечить достаточно быстрый теплообмен и в то же время не вызвать нагрева воды от трения о стенки трубопроводов. Для ее перекачки используется сравнительно маломощная помпа 100 Вт с напором около 0,1 кг/см². В стенде используется нагнетательный насос нестандартной конструкции, разработанный специально для данных целей. Насос отличается высоким КПД, длительным ресурсом работы, герметичностью вращающихся уплотнений, удобством теплоизоляции от окружающей среды. Соединительные трубопроводы также имеют тканевую теплоизоляцию. Теплоизоляция

необходима для предотвращения образования конденсата из воздуха, что может сопровождаться большими тепловыми потерями и снижением холодопроизводительности установки.

Диапазон рабочей температуры пассивного термостата в нормальных лабораторных условиях при его использовании в комплекте с активным термостатом ТПВ-6 составляет от -2 до $+30$ °С. Время выхода термостата на режим в крайние точки диапазона в соответствии с паспортными данными ТПВ-6 и с учетом поправок на дополнительный объем воды и тепловые потери составляет не более 6 ч в точку -2 °С от комнатной температуры и не более 2 ч в точки $+15$ и $+25$ °С.

В установленном режиме дрейф температуры за 10 мин не превышает 0,01 °С.

Градуировка канала электрической проводимости воды производится только при солености воды 35 ‰. При этом получается достаточный перепад электрической проводимости от 0,637 до 1,236 отн. ед. за счет изменения температуры от -2 до $+25$ °С. Градуировка канала электрической проводимости в полном диапазоне от 0,1 до 1,3 отн. ед. производится по образцовому магазину сопротивления, например Р336 класса 0,2. Для этого магазин с помощью «сухого» витка подключается к индуктивному датчику электрической проводимости или через специальное контактное приспособление к потенциальному электроду и на корпус кондуктометрической ячейки. Полученные по магазину абсолютные значения пересчитываются затем в относительные через геометрическую константу датчика или по формулам (5.10).

Методика метрологической аттестации такого стенда по ГОСТ 24555-81 включает в себя определение следующих основных характеристик: диапазона рабочих температур, градиентов температуры в рабочем объеме равномерности температурного поля, показателя временной стабильности температуры в установленном режиме, времени выхода на рабочий режим. Равномерность температурного поля может проверяться с помощью платинового термометра ТСП-365-01 в комплекте с измерительной схемой, имеющей разрешающую способность не менее 0,001 °С. В процессе аттестации необходимо опустить термометр в термостат на шланге через отверстие в верхней крышке последовательно на три горизонта: на глубину 10 см от поверхности, в центр камеры и на расстояние 10 см от дна. Отсчеты температуры следует производить вблизи центральной оси термостата и на расстоянии 5 см от боковой стенки, всего шесть измерений.

Градуировка канала измерения давления выполняется при полном погружении испытуемого образца АЦИТа в камеру высокого давления, заполненную маслом. Подъем давления в камере до 60 МПа выполняется с помощью масляного насоса со скоростью до 60 МПа/ч. В качестве образцового средства измерения давления применен грузопоршневой манометр МП-60 класса 0,5. Градуировка производится при повышении избыточного давления в камере при следующих значениях 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 20; 30;

40; 50 и 60 МПа. Полученные значения соответствующих кодов K_9 по каналу давления испытуемого образца прибора заносятся в его формуляр. Поверка осуществляется в процессе снижения давления в камере при тех же значениях, что и градуировка.

Считается, что образец измерителя АЦИТ успешно выдержал первичную поверку, если расхождения в его показаниях при прямом и обратном ходе давления не превысят $\pm 0,5\%$ верхнего предела диапазона измерения. Основным недостатком такой методики является низкая производительность, так как в камеру можно помещать только один прибор. Кроме того, в масляной камере нет возможности провести полное исследование дополнительных погрешностей от давления по каналам температуры и электрической проводимости.

Для более полного исследования характеристик каналов электрической проводимости *СТД*-измерителей с кондуктометрическими ячейками может быть предложена термостабилизированная камера высокого давления (рис. 7.2), пригодная для заполнения морской водой или раствором KCl с известной соленостью [64]. Корпус 6 такой камеры может иметь форму полого толстостенного цилиндра, а для работы с испытуемыми приборами 7 размерами с АЦИТ-У-02 внутренний объем данной камеры должен быть не менее 40 дм³. Внутри корпуса камеры на оси цилиндра следует расположить лопасть винта 8 для перемешивания образцового раствора. Вращение винта 8 с магнитами 3, запрессованными на концах лопастей, обеспечивается с помощью вращающегося магнитного поля. Это поле создается расположенными снаружи герметичного корпуса 6 камеры электромагнитами 2. Эти электромагниты расположены равномерно по внешнему периметру корпуса 6. Для создания вращающегося по окружности магнитного поля последовательно на каждый из указанных электромагнитов подается напряжение питания. Сам корпус 6 выполнен из титанового сплава ВТ-3 и помещен в пассивный термостат 9 из пенопласта. Он служит для поддержания стабильной температуры в диапазоне от -2 до $30^\circ C$ с погрешностью $\pm 0,02^\circ C$.

Высокое давление в камере создается с помощью масляного насоса, аналогичного примененному в установке высокого давления для градуировки АЦИТа. Для передачи гидростатического давления от масла к образцовому раствору, заполняющему камеру, используется демпфер 5 из эластичной резины. Контроль за давлением может осуществляться с помощью грузопоршневого манометра МП-60, а за температурой — непосредственно по показаниям испытуемого измерителя. В качестве образцового раствора предполагается использовать субнормальную морскую воду с соленостью 35 ‰. Тогда при известных значениях температуры и давления всегда возможно определить его относительную электрическую проводимость и сопоставить с показаниями испытуемого измерителя. Нагрев раствора производится с помощью тена 1, размещенного непосредственно в растворе, а охлаждение — с помощью термобатарей 4, располагаемой под дном корпуса 6.

Камера такой конструкции вполне пригодна для проведения контрольных и государственных испытаний различных *СТД*-систем

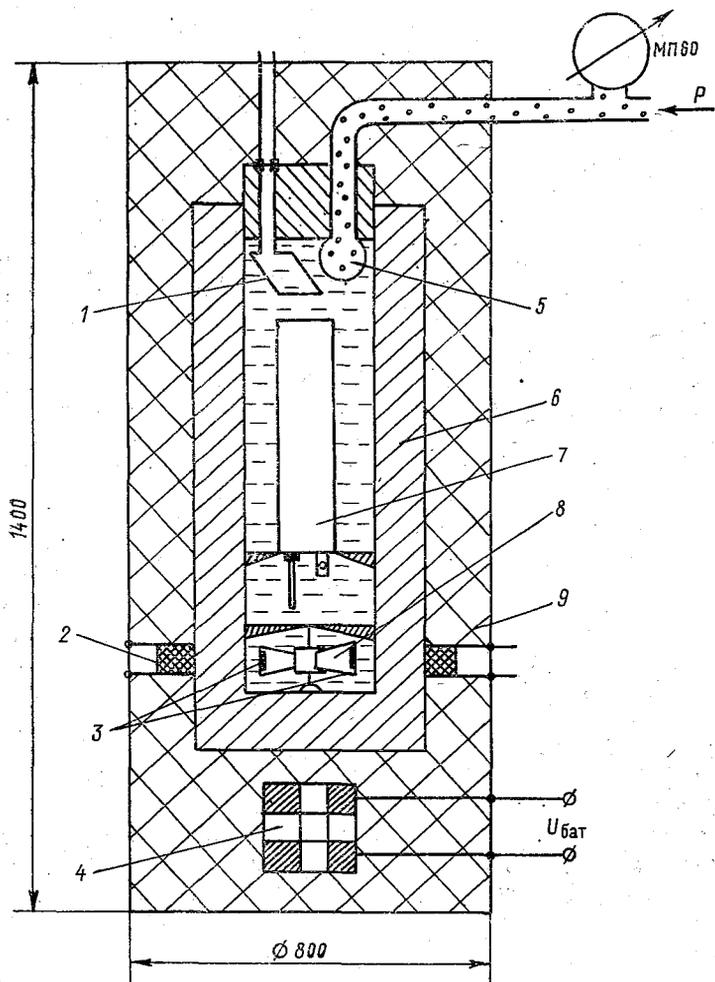


Рис. 7.2. Термостабилизированная камера высокого давления с морской водой.

1 — тен; 2 — электромагниты; 3 — магниты; 4 — термобатарея; 5 — демпфер; 6 — корпус; 7 — испытуемый прибор; 8 — винт; 9 — теплоизоляция.

с кондуктометрическими ячейками электрической проводимости при определении значений их дополнительных погрешностей от давления, а также — функций влияния давления на показания каналов измерения электрической проводимости.

7.3. Методы и средства поверки измерителей течения и волнения

При проведении поверки средств измерения течения и волнения контролю подлежат все измерительные каналы, связанные с получением конечных результатов о течении или волнении. Например, организация испытаний измерителя течения АЦИТ включает в себя поверку каналов измерения ортогональных составляющих скорости водного потока, азимутального угла ориентации корпуса прибора и угла его отклонения от вертикали в плоскости крепления кронштейна.

В процессе приемо-сдаточных испытаний в АЦИТе выполняется раздельная градуировка и одновременно первичная поверка каждого из каналов измерения составляющей скорости водного потока, согласно положениям общегосударственной поверочной схемы по ГОСТ 8.486-83. Для этого двухкомпонентный пропеллерный датчик каждого конкретного образца АЦИТа снимается с прибора и отдельно от его измерительно-регистрирующей схемы испытывается в прямолинейном гидрологическом бассейне.

При этом определяется индивидуальная градуировочная характеристика АЦИТа по каналу скорости и его основная погрешность.

Испытания заключаются в перемещении данного образца датчика на тележке вдоль бассейна с контролируемой средней скоростью. Скорость тележки V_T устанавливается равной 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; м/с. На каждой скорости выполняется три прогона датчика. Одновременно фиксируется число N оборотов пропеллеров, пройденной тележкой путь S и время t . Для фиксирования оборотов пропеллеров на их оси устанавливается разрезная резиновая муфта с двумя магнитами, а на стойку датчика крепится геркон, который срабатывает от указанных магнитов при вращении пропеллеров. Сигналы с герконов регистрируются на ленте самописца вместе с метками пути и времени.

Далее по этим данным рассчитывается скорость движения тележки

$$V_T = S/t \quad (7.6)$$

и частота вращения пропеллера

$$f_v = N/t. \quad (7.7)$$

Исходя из принципа обратного подобия получается значение скорости тележки V_T эквивалентно скорости водного потока V , действующего на этот датчик в реальных условиях применения данного средства измерения.

Далее методом наименьших квадратов по всем поверяемым точкам скорости определяется индивидуальная градуировочная характеристика конкретного образца прибора в виде (2.23), которая заносится в формуляр. Считается, что этот экземпляр измерителя успешно прошел первичную поверку и может быть направ-

лен в эксплуатацию, если среднее квадратическое отклонение σ_V между скоростью тележки и скоростью водного потока $V_{изм}$, рассчитанной по полученной градуировочной характеристике, не превышает половины предельно допустимого значения погрешности по скорости $\Delta_{доп}^V$, заданной КНМХ на это СИ. (см. табл. 1.2).

Сравнение выполняется отдельно для каждой поверяемой точки и пропеллера двухкомпонентного датчика скорости потока.

В последнее время вышеописанная поверка каналов скорости АЦИТа дополнена проверкой коэффициентов m_V преобразования частоты вращения пропеллеров в цифровой выходной код K_4 и K_5 по четвертому и пятому параметрам. Для этого на датчике скорости испытуемого АЦИТа устанавливается вспомогательное приспособление, аналогичное тому, которое было использовано в бассейне. Затем измеритель АЦИТ в сборе помещается в однонаправленный поток воздуха таким образом, чтобы оба пропеллера вращались, а источник потока воздуха, например обычный вентилятор, находился слева относительно главной оси корпуса прибора, совпадающей с узлами его крепления к тросу. При этом каждый из пропеллеров совершает не менее 2000 оборотов одновременно. Фиксируется с помощью частотомеров точное число оборотов $N_{н(в)}$, совершенных нижним (верхним) пропеллером и эквивалентное им приращение кода ΔK_5 и ΔK_4 по каждому из параметров.

Значение искомого коэффициента рассчитывается по формуле

$$m_V = N_{н(в)} / \Delta K_5 \quad (7.8)$$

Конкретный экземпляр АЦИТа считается пригодным к эксплуатации, если в процессе вышеописанных испытаний наблюдается убывание кодов по четвертому и пятому параметрам, а коэффициент m_V находится в пределах $7,35 \pm 0,01$ об/ед. кода.

На типовых и государственных приемочных испытаниях АЦИТа также контролировалась дополнительная погрешность датчика скорости потока по отклонению от диаграммы направленности от круговой в горизонтальной плоскости. Для этого испытуемые образцы датчиков подвергались испытаниям в прямолинейном гидрологическом бассейне при углах разворота φ оси вращения нижнего пропеллера датчика от направления движения тележки: ± 15 , ± 30 и $\pm 45^\circ$. Испытания выполнялись для скоростей движения тележки: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 и 2,0 м/с (см. табл. 5.2).

В АЦИТе по каналам измерения углов вертикальной и азимутальной ориентации корпуса используются индивидуальные градуировочные характеристики, которые определяются при приемодаточных испытаниях и заносятся в формуляры конкретных образцов приборов. Первичная поверка этих приборов фактически не выполняется, а производится оценка случайных составляющих указанных погрешностей. Если эти погрешности не превышают допустимых значений, то данный экземпляр измерителя поступает в эксплуатацию. Градуировка канала азимутального угла ориентации производится в естественном геомагнитном поле пу-

тем разворота АЦИТа вокруг своей вертикальной оси с шагом в 10° на поворотном круге. Положение этого круга в магнитном поле помещения, где поверяются АЦИТы, контролируется с точностью до 1° с помощью магнитной буссоли БШ-1, а горизонтальность расположения проверяется с помощью нивелиров. Градуировка канала вертикальной ориентации корпуса осуществляется на специальной установке, на которой выполняется наклон испытуемого прибора в плоскости кронштейна на углы ± 15 и $\pm 30^\circ$.

Принципиальным отличием вновь создаваемых средств измерения вектора скорости течения от прибора АЦИТ с точки зрения метрологической аттестации и поверки является то, что в них конечные результаты получаются не путем простого преобразования сигналов с датчиков, несущих информацию об одной гидрофизической величине x_i , а после обработки по алгоритму векторного осреднения сразу сигналов с датчика потока и компаса. Традиционный подход к контролю метрологических характеристик таких измерительных приборов предполагает организацию их комплексной сквозной поверки в полном диапазоне изменений и различном сочетании значений измеряемых величин. В данном случае этими величинами являются скорость и направление движения воды. Однако в настоящее время в СССР и, по-видимому, за рубежом отсутствуют образцовые СИ и вспомогательное оборудование для проведения сквозной поверки векторных измерителей течения типа АЦИТ-У-01 и «Поток-2М». Для АЦИТа-У-01 принята отдельная система нормирования погрешностей измерения проекций скорости течения и азимутальной ориентации корпуса прибора. Пределы допускаемых значений этих погрешностей АЦИТа-У-01 соответственно составляют $\Delta v_{\text{доп}} = \pm 0,015 \pm 0,05V$ и $\Delta \beta_{\text{доп}} = \pm 8^\circ$. Такая

система нормирования позволяет исключить взаимозависимость в оценке точности измерения скорости и направления течения [56].

В соответствии с этим была разработана и аттестована поэлементная поверка данного СИ, в совокупности охватывающая весь прибор целиком. Из общей структурной схемы АЦИТ-У-01 (см. рис. 3.8) выделены три основных метрологически значимых элемента: двухкомпонентный пропеллерный датчик скорости водного потока, компас и блок векторного осреднения.

Предложенная методика поверки векторных измерителей течения с вертушечными датчиками скорости потока включает в себя два этапа. На ее первом этапе производится градуировка и поверка датчиков скорости, а на втором — поверка компаса и блока векторного осреднения. Для проведения первого этапа датчик скорости демонтируется с корпуса измерителя, доставляется в прямоугольный бассейн, где с ним проводятся испытания, аналогичные ранее описанным, по отношению к датчику скорости АЦИТа. При этом значения скорости тележки устанавливаются равными 0,1; 0,2; 0,5; 0,5; 1,0 и 2,0 м/с, а уравнение (2.27) преобразования скорости набегающего потока V в частоту f_v враще-

ния пропеллера определяется при градуировке только для нижнего лопастного винта и в виде:

$$V = k_V f_V,$$

где V — скорость, м/с; f_V — частота об./с.

Затем по полученному значению гидрометрического шага k_V устанавливается частота считывания $f_{сч}$ в данном экземпляре при-

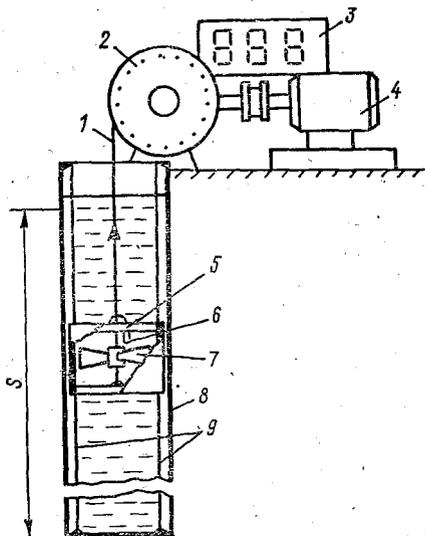


Рис. 7.3. Установка для проверки пропеллерных датчиков скорости в вертикальной трубе.

1 — трос; 2 — диск меток; 3 — отсчетное устройство; 4 — двигатель; 5 — держатель; 6 — геркон; 7 — испытуемый пропеллер; 8 — труба; 9 — направляющие.

бора. Тем самым осуществляется приведение индивидуальной градуировочной характеристики датчика потока к номинальному виду. Первичная проверка на этом этапе предполагает сравнение значений скорости потока, рассчитанной по формуле (2.27) при найденном значении k_V , с истинными, соответствующими скорости движения тележки V_T , и оценку полученных расхождений Δ_d с допустимыми погрешностями датчика $\Delta_{доп}^d$, заданными соот-

ношением вида:

$$\Delta_{доп}^d = \pm 0,01 \pm 0,03V. \quad (7.9)$$

Измерители АЦИТ-У-01, у которых датчики удовлетворяют условию $\Delta_d < \Delta_{доп}^d$, считаются прошедшими первый этап проверки.

Подобную проверку и градуировку датчиков предполагается выполнять на каждом экземпляре АЦИТ-У-01, поступающем в эксплуатацию. Поэтому с целью снижения трудоемкости приемосдаточных испытаний при серийном производстве можно использовать упрощенную методику градуировки и проверки датчиков пропеллерного типа не в прямолинейном бассейне, а в вертикальной трубе, заполненной водой (рис. 7.3). Установка для проверки про-

пеллеров датчиков АЦИТ-У-01 в такой трубе 8 с рабочей длиной 12—15 м дополнительно включает в себя двигатель 4 привода, подъемный трос 1, направляющие тросы 9, диск 2 меток пути, держатель 9 пропеллера 7 с типовым обтекателем и отсчетное устройство 3. Тогда градуировка пропеллеров с их одновременной поверкой будет состоять в простом подъеме в трубе 8 держателя 5 с установленным в нем испытуемым пропеллером 7. В процессе выполнения такой операции пропеллер 7 свободно вращается с частотой f_v .

Отличия проведения градуировки пропеллеров на такой установке от традиционного бассейна заключаются в том, что здесь подсчитывается не число N_i оборотов на фиксированной длине пути S_i , как в бассейне, а измеряется с точностью до 5 см длина пути S_i , пройденного вертушкой в трубе 8 при совершении ей фиксированного числа оборотов, равных порядка 30. Число оборотов фиксируется герконом 6, расположенным на стойке держателя 5. Кроме того, испытания проводятся не в сборе датчика, а в держателе 5, конструкция которого в точности соответствует типовой, примененной в поверяемом СИ. При соответствующей мощности двигателя 4 привода стабильность поддержания скорости подъема пропеллера в диапазоне от 0,1 до 2 м/с будет не ниже требуемых 10 %. Тогда динамика вращения пропеллера не будет оказывать влияние на значение его гидрометрического шага k_v .

Первичная поверка АЦИТ-У-01 в бассейне согласно ГОСТ 8.486-83 или в вертикальной трубе на первом этапе испытаний дополнена контролем начального момента трогания $M_{тр}$ каждого лопастного винта, входящего в двухкомпонентный датчик испытуемого АЦИТа. В процессе проведенных экспериментальных исследований было установлено, что $M_{тр} = 10^{-5}$ Н·м соответствует порогу трогания винта менее 0,015 м/с. Результаты таких испытаний оцениваются путем визуального наблюдения за вращением в воде испытуемого пропеллера во время разматывания нити с грузом не более 0,02 Н, закрепленной на его оси вращения. Устойчивое вращение пропеллера свидетельствует о том, что в диапазоне скоростей от 0,02 до 0,1 м/с погрешность датчика скорости не превосходит допустимое значение, заданное формулой (7.9). Это обусловлено тем, что возможный разброс гидрометрических шагов пропеллеров АЦИТ-У-01, изготовленных из пропилена методом литья под давлением, не превышает ± 10 %, а их порог трогания гарантированно ниже скорости 0,015 м/с.

Наряду с определением составляющей основной погрешности Δ_d датчика скорости потока при государственных испытаниях измерителей АЦИТ-У-01 на первом этапе также выполнялось определение дополнительных и динамических погрешностей его датчика скорости. К указанным погрешностям из КНМХ измерителя АЦИТ-У-01 относятся следующие:

— дополнительные погрешности Δ_ϕ^v измерения скорости течения, обусловленные отклонением пространственной характеристики датчика потока в горизонтальной плоскости от круговой,

— динамическая погрешность $\Delta_{\text{дин}}^V$ измерения скорости от орбитального движения датчика в воде, обусловленная нелинейной реакцией пропеллера на переменный по величине водный поток.

Порядок проведения испытаний в бассейне для определения значений дополнительной погрешности $\Delta_{\text{ф}}^V$ аналогичен подобным типовым испытаниям АЦИТа на скорости $V_T = 0,5$ м/с. При этом за погрешность $\Delta_{\text{ф}}^V$ принимается

$$\Delta_{\text{ф}}^V = V_T - V_{\text{изм}} - \Delta_{\text{доп}}^{\text{д}} (0,5), \quad (7.10)$$

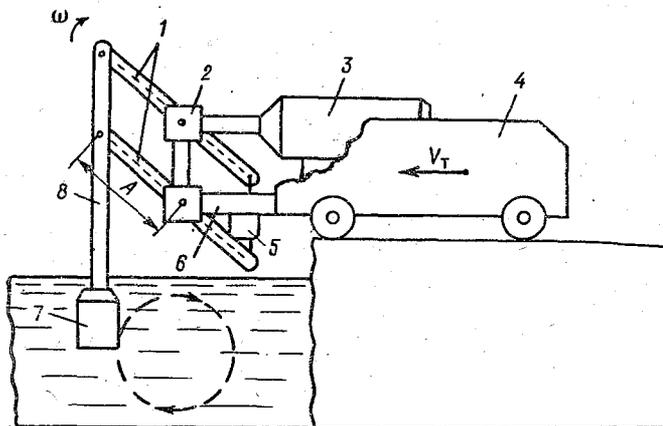


Рис. 7.4. Установка для динамических испытаний датчиков скорости.

1 — тяги; 2 — червячная передача; 3 — двигатель; 4 — тележка; 5 — противовес; 6 — рама; 7 — испытуемый датчик; 8 — штанга.

где $\Delta_{\text{доп}}^{\text{д}} (0,5)$ — допустимая погрешность датчика для $V = 0,5$ м/с;

$$V_{\text{изм}} = k_V \sqrt{f_{\text{в}}^2 + f_{\text{н}}^2}, \quad (7.11)$$

где $f_{\text{н}}$, $f_{\text{в}}$ — частота вращения соответственно нижнего и верхнего пропеллера испытуемого датчика.

Для определения динамической составляющей погрешности $\Delta_{\text{дин}}^V$ при орбитальном движении датчика по круговой траектории в вертикальной плоскости используется специально созданная в ААНИИ установка [58]. Установка включает в себя качающийся механизм (рис. 7.4) и регистрирующую аппаратуру. Качающийся механизм предназначен для придания испытуемому датчику движения по круговой траектории, лежащей в вертикальной плоскости, с угловой скоростью ω , а регистрирующая аппаратура служит для фиксирования результатов. Конструкция механизма позволяет устанавливать его на тележку в бассейне ГГИ. Подобная установка также имеется в распоряжении Национальной администрации по океану и атмосфере США и смонтирована в Гидрологи-

ческом бассейне Военно-морского центра им. Д. Тейлора [139].

При одновременной работе качающего механизма и движении тележки бассейна с постоянной скоростью V_T испытуемый датчик совершает в воде бассейна сложное движение со скоростью V , описываемое уравнением вида:

$$V = V_T + 2\pi\omega A_V \cos(2\pi\omega t). \quad (7.12)$$

В состав такого качающего механизма входят электрический двигатель 3 привода типа ИЭ-1015А мощности 400 Вт, напряжения питания 220 В с номинальной скоростью вращения вала 700 об/мин, червячная передача тяги 1 длины А, штанга 8 для установки испытуемого датчика 7 массой до 5 кг, противовес и рама 6 для крепления к тележке 4 бассейна. В механизме предусмотрено дискретное изменение длины A_V тяги с шагом 70 мм от 70 до 490 мм и плавная регулировка угловой скорости вращения ω от 0,05 до 0,23 об/с изменением напряжения питания на двигателе. Система крепления датчика на штанге позволяет устанавливать его под различными углами к направлению движения тележки с шагом в 15° , что позволяет исследовать искажения диаграммы направленности в динамическом режиме функционирования измерителя течения.

Данная установка использовалась при государственных испытаниях измерителя АЦИТа-У-01 при линейной скорости движения тележки 0,5 м/с и угловой скорости вращения датчика 0,13 об/с по радиусу 0,3 м. Направление движения тележки совпадало с осью вращения нижнего пропеллера. Динамическая погрешность $\Delta_{\text{дин}}^V$ вычислялась как разница между скоростью водного потока,

определенной по формуле (2.27) по зафиксированной средней частоте \bar{f}_V вращения нижнего пропеллера, и скоростью V_T движения тележки. На всех испытанных образцах датчиков динамическая погрешность $\Delta_{\text{дин}}^V$ не превысила значения 0,02 м/с, заданной КНМХ.

Результаты других исследований датчика потока АЦИТа-У-01 на описанной установке приведены в табл. 7.1.

Наряду с первым этапом проверки во всех видах испытаний АЦИТа-У-01 выполняется второй ее этап, заключающийся в имитации действия на измеритель вектора скорости течения при разных известных углах β_i азимутальной ориентации корпуса прибора. Для этого испытуемый образец полностью в сборе располагается на поворотном круге, где он, поворачиваясь вместе с кругом вокруг своей оси, последовательно с шагом в 10° занимает все положения азимутальных углов от 0 до 360° . Проверка производится при вращении корпуса измерителя по и против часовой стрелки. На каждом шаге выполняется вращение нижнего лопастного винта датчика скорости потока на фиксированное число N_H оборотов, которое имитирует действие вектора скорости с модулем

$$|V| = N_H k_V / t_0, \quad (7.13)$$

Таблица 7.1

**Результаты динамических испытаний датчиков потока АЦИТ-У-01
на радиусе вращения 0,3 м**

Номер вертушки	Напряжение на двигателе привода, В	Частота вращения датчика, об/с	Скорость, м/с		Погрешность	
			тележки	измеренная	абсолютная, м/с	относительная, %
1	0	0	0,521	0,521	0	0
	70	0,1	0,602	0,605	-0,003	-0,5
	90	0,13	0,509	0,513	-0,004	-0,8
	120	0,18	0,552	0,561	-0,009	-1,6
	150	0,22	0,560	0,565	-0,005	-1,0
	200	0,29	0,571	0,571	0	0
	200	0,29	0,250	0,282	0,032	12,2
2	0	0	0,556	0,566	0	0
	70	0,09	0,551	0,534	-0,017	-3,1
	90	0,13	0,541	0,552	0,011	2,0
	120	0,17	0,509	0,512	0,003	0,6
	150	0,22	0,544	0,538	-0,006	-1,1
	200	0,29	0,514	0,548	0,034	6,6
	200	0,29	0,250	0,255	0,050	20,0
3	0	0	0,250	0,550	0	0
	70	0,09	0,542	0,538	-0,004	-0,5
	90	0,13	0,543	0,546	0,003	0,5
	120	0,17	0,512	0,509	-0,003	-0,5
	150	0,22	0,520	0,527	-0,007	-1,5
	200	0,29	0,522	0,540	0,018	3,4
	200	0,29	0,258	0,272	0,014	4,8

где t_0 — интервал времени осреднения, установленный в испытуемом приборе.

При этом измеренное значение имитируемого вектора фиксируется на индикаторном табло бортового блока БОД в виде широтной $V_{ш}$ и меридиональной $V_{м}$ составляющих этого вектора.

Таким образом, на втором этапе поверки измерителя АЦИТа-У-01 определяются вторая составляющая основной погрешности Δ_B измерения проекции скорости, вызванная отклонением характеристики блока векторного осреднения от номинальной, и погрешность Δ_β измерения ориентации прибора. Номинальная характеристика блока векторного осреднения соответствует виду, заданному уравнениями (3.43). Искомые значения погрешности Δ_B для каждой поверочной точки рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta_B &= V_{м} - N_{н} k_V \cos \beta / t_0; \\ \Delta_B &= V_{ш} - N_{н} k_V \sin \beta / t_0, \end{aligned} \quad (7.14)$$

а погрешности Δ_β по формуле

$$\Delta_\beta = \arctg (V_{м} / V_{ш}) - \beta. \quad (7.15)$$

Имитация действия вектора скорости производится в полном диапазоне измеряемых прибором скоростей течения от 0,02 до 2 м/с. Считается, что данный образец измерителя успешно прошел этот вид испытаний, если на всех углах β разворота его корпуса в прямом и обратном направлении значения Δ_B и Δ_β для обеих проекций не превосходят соответственно допустимых $\Delta_{\text{доп}}^B = \pm 0,01 \pm 0,04V$ на этот вид испытаний и $\Delta_{\text{доп}}^\beta = \pm 8^\circ$, заданной КНМХ АЦИТа-У-01. Результаты, полученные на первом и втором этапах проводимых испытаний в отношении погрешностей Δ_d и Δ_B

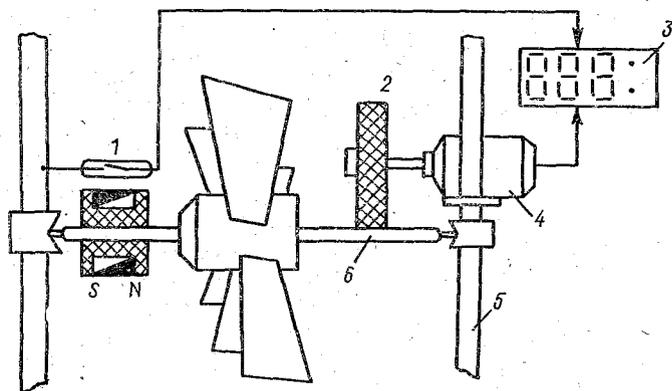


Рис. 7.5. Устройство вращения пропеллера датчика скорости.

1 — геркон; 2 — фрикцион; 3 — устройство отсчета и управления; 4 — двигатель; 5 — стойка; 6 — ось.

измерения скорости течения датчика и блоком векторного осреднения при одновременном выполнении условий $\Delta_d \leq \Delta_{\text{доп}}^d$ и $\Delta_B \leq \Delta_{\text{доп}}^B$, подтверждаются в целом соответствие данного экземпляра АЦИТа-У-01 требованиям КНМХ к допустимой погрешности $\Delta_{\text{доп}}^V$. Аналогичным образом выполняется контроль каждого экземпляра АЦИТа-У-01 на допустимую погрешность Δ_ψ^V отклонения его от вертикали в пределах $\psi = \pm 10^\circ$.

Для придания вращения пропеллерам испытуемого АЦИТа-У-01 при его нахождении на поворотном угле служит специальное вспомогательное устройство (рис. 7.5). В состав этого устройства входят два двигателя 4 постоянного тока ДПМ-20Н1-1 и блок 3 управления этими двигателями с цифровым индикатором числа оборотов, совершаемых пропеллерами. В процессе испытаний двигатели закрепляются на стойках 5 датчика скорости и вращение от их валов передается через фрикционную передачу 2 на ось 6 пропеллеров. Для фиксирования числа совершаемых оборотов служит геркон 1, сигналы с которого поступают в блок 4 управления. После совершения пропеллером заданного числа N_i оборотов, имитирующих требуемое значение модуля $|V|$ вектора

скорости, этот блок дает команду на остановку двигателей привода.

Данная установка, равно как и методика поверки, также с успехом может быть использована при проведении испытаний векторно-интегрирующего измерителя течения «Поток-2М», у которого в качестве чувствительного элемента датчика скорости применен пропеллер, по конструкции аналогичный АЦИТу-У-01.

В настоящее время все отечественные метрологические аттестованные средства измерения скорости течения используют только вертушечные датчики скорости. Такие датчики имеют существенный 20 %-ный разброс характеристик от образца к образцу, поэтому приемлемая 5 %-ная точность измерения скорости достигается только при наличии индивидуальных градуировочных характеристик. В соответствии с этим описанный выше объем и порядок проведения приемо-сдаточных испытаний по каждому конкретному экземпляру таких СИ характерен для всех моделей измерителей течения, выпускаемых в СССР. Можно надеяться, что вновь создаваемые акустические и электромагнитные измерители будут обладать типовыми характеристиками датчиков скорости и их поверка будет существенно упрощена, например, сведена к контролю только электрических характеристик измерительных каналов скорости. В равной степени это относится к акустическим зондирующим профилографам. Можно предположить, что приемо-сдаточные испытания таких СИ будут ограничены проверкой правильности измерения частоты сдвига акустического сигнала со специального имитатора и правильности аппаратурной реализации алгоритма обработки в конкретном экземпляре прибора.

Наибольшие трудности в настоящее время вызывает организация поверки средств измерения параметров поверхностного волнения. Это обусловлено отсутствием как образцовых СИ, так и общепризнанной государственной поверочной схемы. В соответствии с этим в ААНИИ применительно к устройству измерения волнения по колебаниям гидростатического давления, описанным в п. 3.6, предложена методика контроля его метрологических характеристик, включающая поверку датчика гидростатического давления в полном диапазоне изменения от поверхности до глубин 20 м, согласно поверочной схеме по ГОСТ 8.017-79. В дополнение к этой поверке по входу датчика давления выполняется имитация гармонических колебаний гидростатического давления, вызванного волнением. Такие колебания создаются с помощью специально разработанной в ААНИИ установки (рис. 7.6). Она состоит из двигателя 2 постоянного тока, вращающейся штанги 3 и емкости 1 с водой, поступающей по гибкому шлангу 4 на входной штуцер 5 испытуемого датчика давления. В процессе вращения указанной штанги 3 емкость 1 с водой начинает равномерно двигаться по круговой траектории. В результате высота водяного столба и, следовательно, гидростатическое давление P на входе штуцера меняется по косинусоидальному закону

$$P = 2\pi R \omega g \cos(2\pi\omega t), \quad (7.16)$$

где R — радиус вращения емкости 1 ; ω — угловая скорость вращения штанги 3 .

С помощью системы крепления радиус вращения R может меняться от 0,1 до 1 м, что при коэффициенте затухания давления с глубиной $\gamma=0,1$ эквивалентно изменению высоты поверхностного волнения от 1 до 10 м. Изменения напряжения на двигателе

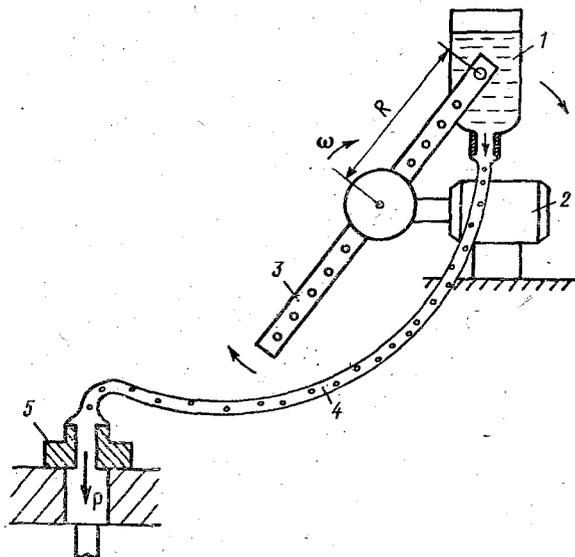


Рис. 7.6. Установка для динамических испытаний гидростатического волнографа.

1 — емкость; 2 — двигатель; 3 — штанга; 4 — шланг; 5 — штуцер.

позволяют изменять угловую скорость от 0,1 до 1 об/с. При пересчетном коэффициенте $\gamma_r=0,5$ это позволяет имитировать волнение воды с периодом от 2 до 20 с. Такие вариации параметров волнения соответствуют реальному диапазону изменений характеристик водной поверхности открытых акваторий. Результаты испытаний, проведенных на описанной установке, в целом подтвердили точностные характеристики канала измерения волнения станции ДУ-МГ. В качестве численных оценок этих характеристик принимались расхождения между значениями амплитуды и периода колебаний давления, созданными на установке и зафиксированными испытываемым устройством.

7.4. Контроль метрологических характеристик океанографических приборов в натуральных условиях

В целом ряде случаев в процессе длительных экспедиционных исследований на океанских полигонах отсутствует возможность организации поверки используемых океанографических СИ в пол-

ном соответствии с методами, изложенными ранее (см. п. 7.2, 7.3). Это обусловлено отсутствием портативных передвижных технических средств, пригодных для организации поверки данного класса отечественной измерительной техники в экспедиционных условиях.

В отношении автономного измерителя АЦИТ была разработана методика проведения контроля его метрологических характеристик в судовых условиях с использованием только того оборудования, которое имеется в достаточном количестве. Данная методика предполагает контроль каналов измерения температуры, электрической проводимости, гидростатического давления и скорости течения. Суть ее в отношении первых трех измерительных каналов заключается в проведении совместных синхронных измерений испытуемым образцом АЦИТа и средствами измерения, приравненными к образцовым. Измерения выполняются в однородных слоях воды океана со стабильными термохалинными характеристиками [57]. В таком случае названные слои выступают в качестве естественных образцовых мер. Для обеспечения должного качества результатов контроля необходимо, чтобы нестабильность температуры и электрической проводимости в выбранных слоях не превышала половины значения допустимых погрешностей проверяемого средства измерения. В отношении приборов типа АЦИТ термохалинные характеристики слоя воды должны сохраняться в пределах $\pm 0,03^\circ\text{C}$ и $\pm 0,03\%$ за весь период совместных измерений. При этом стабильность поддержания горизонта следует обеспечивать в пределах 10 м. Наличие в открытых районах океана таких слоев воды подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями [76, 96]. При выборе слоев с конкретными термохалинными характеристиками также стремятся перекрыть весь ожидаемый диапазон изменчивости данного океанографического параметра при выполнении последующих наблюдений с помощью испытуемого СИ. В качестве средств измерений, приравненных к образцовым, при этих работах используют специальные поверочные глубоководные опрокидывающиеся термометры ТГ I группы, к которым прилагаются таблицы инструментальных поправок через 2°C , электросолемер ГМ-65 и термоглубомеры ТГМ с аналогичной ТГ таблицей поправок. Возможно в порядке исключения применять ТГ и II группы, но имеющие в области измеряемых температур поправки, не превосходящие $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Отбор проб воды на соленость производится с помощью батометров, например БМ-48.

Поиск и локализация в океане слоев воды с требуемыми характеристиками может производиться с помощью любой зондирующей аппаратуры: зонд-батометр, гидрозонд или зонд ИСТОК-6. Зонд-батометр и гидрозонд также могут быть использованы в качестве несущей платформы испытуемых АЦИТов, термометров ТГ, термоглубомеров и батометров. Тогда при проведении таких измерений выполняется следующий набор операций. Визуальный внешний контроль испытуемых АЦИТов (см. п. 4.3),

проверка их работоспособности, закрепление вместе с ТГ, ТГМ и батометрами на раме зонд-батометра. Затем выполняется совместное зондирование океана с выдержкой на 5—10 мин в слоях воды, обладающих необходимой стабильностью термохалинных характеристик (рис. 7.7 а). После этого приборы поднимаются на борт судна, снимаются отсчеты, определяется соленость взятой пробы морской воды на электросолемере ГМ-65. Затем полученные значения солености пересчитываются по формуле Шкалы практиче-

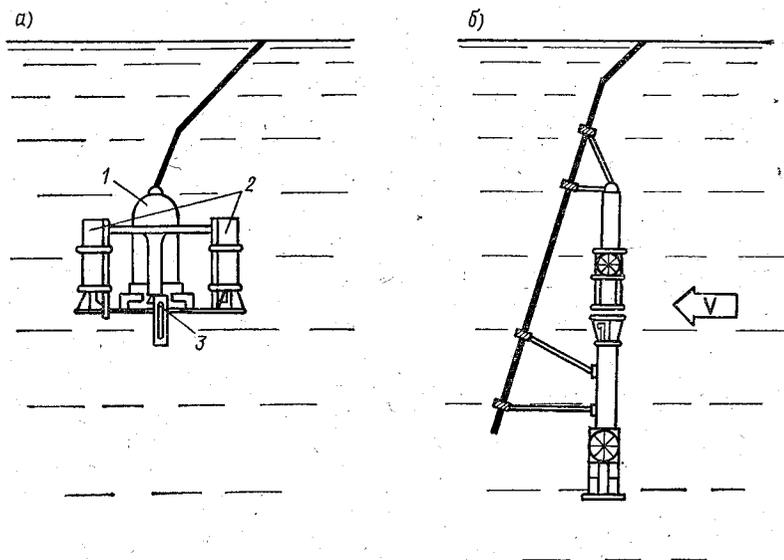


Рис. 7.7. Сравнительные испытания в натуральных условиях.

а — CTD-систем АЦИТ; б — датчиков скорости АЦИТа; 1 — зонд-батометр; 2 — испытываемые АЦИТы; 3 — термометры ТГ.

ской солености, 1978 в относительную электрическую проводимость в месте проведения измерений. С магнитофонных лент АЦИТов также считываются показания, обрабатываются по прилагаемым градуировочным характеристикам и полученные результаты образцовых и поверяемых СИ сравниваются между собой.

Критерием соответствия испытываемых АЦИТов предъявляемым к ним требованиям, могут выступать значения допустимых погрешностей, заданные КНМХ на эти СИ. В тех случаях, когда полученные при совместных измерениях отличия в показаниях образцовых и испытываемых приборов меньше соответствующих значений допустимых погрешностей, то данные АЦИТы могут продолжать эксплуатироваться с указанными в их формулярах градуировочными характеристиками. В противном случае этим образцам необходимо присвоить новые значения градуировочных

констант. Здесь вполне уместно воспользоваться результатами проведенных совместных измерений.

Несколько сложнее дело обстоит с поверкой канала измерения скорости. В судовых условиях довольно просто можно организовать только контроль передаточного числа m_v этого канала, помещая датчики приборов под однонаправленный поток воздуха. Для контроля характеристик пропеллеров необходимо с помощью груза определить значение момента трогания пропеллеров, входящих в датчик, а также выполнять сравнительные измерения скорости течения с помощью проверяемого образца АЦИТа и другого образцового СИ. В качестве такого образцового СИ могут выступать специально поверенный в бассейне датчик скорости от АЦИТа с известной и метрологически гарантированной градуировочной характеристикой. Необходимые сравнительные измерения возможно проводить с борта дрейфующего со скоростью 0,5—1 уз судна, поместив оба прибора вместе на глубину 50—100 м (см. рис. 7.7 б).

Проведение сравнительных синхронных измерений в натуральных условиях в одной точке океана разнотипными и однотипными СИ одних и тех же океанографических параметров является важным элементом разработки метрологического обеспечения всех вновь создаваемых приборов такого профиля. Эти исследования позволяют проверить адекватность и рациональность выбранного КНМХ, а также проводить экспериментальную проверку на физическое соответствие алгоритмов обработки сигналов с датчиков в приборах, предназначенных для определения многопараметрических характеристик гидрофизических полей океана. Выполнение испытаний в натуральных условиях должно стать неотъемлемым элементом разработки любого нового океанографического СИ или физико-математической модели его функционирования, корректная и достоверная проверка адекватности которой может производиться только в условиях эксплуатации. В этой связи исключительно важным является создание у нас в стране метрологически аттестованных океанографических полигонов [116], позволяющих улучшить обеспечение единства всех океанографических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 680020 СССР, МКИ² G 08с 19/28. Устройство для телеизмерения гидрологических параметров/Р. А. Балакин, И. С. Ковчин (СССР). № 2489476/18—10; Заявл. 23.05.77; Оpubл. 15.08.79, Бюл. № 30.— 1 с.
2. А. с. 750361 СССР, МКИ² GO/N 27/02. Устройство для измерения электропроводности жидкости/Р. А. Балакин, О. Г. Седов, И. А. Зевельбанд (СССР).— № 2496721/18—25 (22); Заявл. 01.06.77; Оpubл. 23.07.80, Бюл. № 27.— 1 с.
3. А. с. № 808986 СССР, МКИ³ G 01р3/54, 5/06. Устройство для определения скорости и направления вращения/И. С. Ковчин, С. А. Юновизов (СССР).— № 2759857/18—10; Заявл. 28.04.79; Оpubл. 28.02.81, Бюл. № 8.— 1 с.
4. А. с. 942113 СССР, МКИ³ G 08с 19/28. Устройство для телеизмерения гидрологических параметров/Р. А. Балакин, В. Г. Горелик, А. Н. Зушинский, В. Н. Титов и И. В. Честнова (СССР). № 3216956/18—24; Заявл. 15.12.80; Оpubл. 7.07.82, Бюл. № 25.— 1 с.
5. А. с. 951073 СССР, МКИ³ G 01с 17/26. Гидрологический магнитный компас/Р. А. Балакин, А. П. Канаев и Я. М. Кравченко (СССР).— № 3234531/18—10; Заявл. 12.01.81; Оpubл. 18.08.82, Бюл. № 30.— 1 с.
6. А. с. 1075132 СССР, МКИ³ G 01N 5/16. Кондуктометр/Р. А. Балакин (СССР).— № 3439989/25; Заявл. 15.05.82; Оpubл. 15.02.84, Бюл. № 7.— 1 с.
7. А. с. 1150543 СССР, МКИ³ G 01р 5/06. Устройство для измерения морских течений/И. С. Ковчин (СССР) МКИ³.— № 3649810/24—10; Заявл. 10.10.83; Оpubл. 15.04.85, Бюл. № 14.— 2 с.
8. А. с. 1283834 СССР, МКИ³ G 11В 5/09. Устройство для воспроизведения цифровой магнитной записи в старт-стопном режиме/И. С. Ковчин, В. С. Харитоненков (СССР).— № 3888864/24—10; Заявл. 24.04.85; Оpubл. 15.01.87, Бюл. № 2.— 1 с.
9. А. с. 1325301 СССР, МКИ³ G 01Д 5/12. Устройство для автоматического измерения гидрологических параметров/И. С. Ковчин (СССР).— № 3923884/24—21; Заявл. 08.07.85; Оpubл. 23.07.87, Бюл. № 27.— 2 с.
10. А. с. 1418623 СССР, МКИ³ G 01р 13/00. Устройство для определения направления вращения/И. С. Ковчин, С. А. Юновидов (СССР).— № 4029262/24—10. Заявл. 26.02.86; Оpubл. 23.08.88, Бюл. № 31.— 1 с.
11. А. с. 1437916 СССР, МКИ³ G 11с 11/00. Запоминающее устройство/И. С. Ковчин (СССР).— № 4122923/10—24; Заявл. 24.09.86; Оpubл. 15.11.88, Бюл. № 42.— 1 с.
12. А. с. 1444957 СССР, МКИ³ НОЗМ7/12. Преобразователь кодов/И. С. Ковчин, В. С. Харитоненков (СССР) МКИ³.— № 4174088/24; Заявл. 04.01.87; Оpubл. 30.11.88, Бюл. № 46.— 2 с.
13. А. с. 1520451 СССР, МКИ³ G 01р 5/06. Устройство для измерения скорости и направления течения/И. С. Ковчин, С. А. Юновидов (СССР).— № 4216945/24—10; Заявл. 30.03.87; Оpubл. 7.11.89, Бюл. № 41.— 2 с.
14. Абрамов В. М. Динамические измерения океанологических полей: Теоретические основы.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.— 165 с.
15. Абрамов В. М., Заграничных С. А., Ковчин И. С. и др. О термометрической погрешности платиновых датчиков температуры морской воды//Труды ААНИИ.— 1989.— Т. 419.— С. 73—86.
16. Абрамов В. М., Ковчин И. С. Моделирование динамики глубоководной станции для измерения придонных течений//Труды ААНИИ.— 1988.— Т. 413.— С. 118—125.
17. Азимов А. М., Гордов А. Н. Точность измерительных преобразователей.— Л.: Энергия, 1975.— 124 с.

18. Артеменко Н. П. О демпфировании колебаний магнитных систем измерителей течений типа БПВ-2//Труды ААНИИ.— 1963.— Т. 254, вып. 2.— С. 65—68.
19. Балакин Р. А. Сравнительные характеристики датчиков электропроводности морской воды индуктивно-трансформаторного типа и трехэлектродной ячейки//Докл. конф.: Технические средства для государственной системы контроля природной среды.— Обнинск, 1981.— С. 225—228.
20. Балакин Р. А. Усовершенствованный датчик электропроводности морской воды//Труды ААНИИ.— 1985.— Т. 389.— С. 119—124.
21. Балакин Р. А. Метод линеаризации платинового термометра при измерении температуры морской воды//Труды ААНИИ.— 1985.— Т. 389.— С. 124—129.
22. Балакин Р. А. Оценка точности управляемых трансформаторных делителей напряжения для автоматизированных гидрологических измерителей//Труды МГИ.— 1982.— Вып. 5.— С. 53—62.
23. Балакин Р. А. Автономный цифровой измеритель гидрологических параметров//Проблемы автоматизации судовых гидрологических наблюдений (сборник докладов на всесоюзном семинаре).— 1977.— С. 66—71.
24. Балакин Р. А., Зушинский А. Н., Паньшин И. А. Предварительные результаты разработки мареографа «Цунами»//Труды ААНИИ.— 1989.— Т. 419.— С. 6—13.
25. Балакин Р. А., Ковчин И. С. Результаты разработки и экспериментальных исследований измерителя течения АЦИТ-М//Труды ГОИН.— 1985.— Вып. 163.— С. 84—89.
26. Балакин Р. А., Ковчин И. С. Аттестация средств измерения электрической проводимости морской воды на основе Шкалы практической солености, 1978//Измерительная техника.— 1989.— № 6.— С. 31—36.
27. Басманов А. С., Широков Ю. Ф. Микропроцессоры и однокристалльные микроЭВМ: Номенклатура и функциональные возможности/Под ред. В. Г. Домрачева.— М.: Энергоатомиздат, 1988.— 128 с.
28. Бахтиаров Г. Д., Калинин В. В., Школин В. П. Аналого-цифровые преобразователи.— М.: Советское радио, 1980.— 280 с.
29. Белоглазов А. В. и др. Полупроводниковые преобразователи силы и давления на основе гетерозиптаксиальных структур «кремний на сапфире»// Приборы и системы управления.— 1982.— № 5.— С. 21—27.
30. Бельшев А. П., Клеванцов Ю. П., Рожков В. А. Вероятностный анализ морских течений.— Л.: Гидрометеиздат, 1983.— 263 с.
31. Беляев Б. Н. Прикладные океанологические исследования.— Л.: Гидрометеиздат, 1986.— 142 с.
32. Беляев М. Ф., Слабаков Х. С., Шехватов Б. Ф. Применение вибрационных преобразователей давления для измерения поверхностного волнения//Океанология.— 1980.— Т. 26, вып. 2.— С. 331—335.
33. Буйлов В. Б. Комплекс программ обработки измерений прибором АЦИТ//Фонды алгоритмов и программ.— 1987.— № 2572359.00039-01 ЗУ ЛУ.— 76 с.
34. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи.— М.: Энергоатомиздат, 1983.— 136 с.
35. Воловский В. В., Селин Е. А. Автономный двухкоординатный интегрирующий измеритель морского течения//Автоматизация научных исследований морей и океанов. Ч. 1. Симпозиум 1971.— Севастополь, 1972.— С. 185—189.
36. Глуховских Б. Х. Исследования морского ветрового волнения.— Л.: Гидрометеиздат, 1966.— 283 с.
37. Гостев О. Ф., Трубкин И. П., Чиквиладзе Г. Н. Автономный водноизмерительный буй//Труды ГОИН.— 1988.— Вып. 184.— С. 15—22.
38. Грендбойс Аналого-цифровой преобразователь на двух БИС//Электроника.— 1974.— Т. 47, № 13.— С. 22—33.
39. Григоров О. Н. Электрокинетические явления.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1973.— 212 с.
40. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах.— Л.: Энергия, 1980.— 248 с.

41. Денисов А. С., Кудрявцев Н. Ф. Двухкомпонентный регистратор морских течений в слое, охваченным действием ветровых волн//Труды ААНИИ.— 1972.— Т. 306.— С. 243—245.
42. Доценко С. В. Измерение пространственных неоднородностей электропроводности//Труды МГИ.— 1969.— Т. 41.— С. 29—45.
43. Доценко С. В. Теоретические основы измерения физических полей океана.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 152 с.
44. Забурдаев В. И., Соловьев Р. Н. К вопросу схемной компенсации температурной погрешности датчиков давления типа ПДВ при измерениях глубины погружения гидрофизических приборов//Морские гидрофизические исследования.— 1975.— № 4.— С. 138—140.
45. Забурдаев В. И. Погрешности градуировки измерителей температуры морской воды, вызванные кондуктивным теплообменом и перегревом чувствительного элемента измерительным током//Тезисы докл. II Всесоюз. семинара: Технические средства для государственной системы наблюдений и контроля природной среды (ГСКП), часть II, 12—14 октября 1983 г.— Обнинск, 1983.— С. 46.
46. Извеков М. Ф., Кудрявцев Н. Ф. Колебания систем автономных буйковых станций под действием волнения и их влияния на точность измерения течения//Труды ААНИИ.— 1961.— Т. 210.— С. 21—28.
47. Интеркалибрация измерителей течения типа БПВ-2, ЦИИТ и ЦИИТ-3 на полигоне Полимоде/О. А. Гушин, В. Д. Егорихин, Б. В. Титов//Океанологические исследования.— 1980.— Т. 32.— С. 57—67.
48. Ионоселективные электроды//Под ред. Р. Дарста: Пер. с англ.— М.: Мир, 1972.— 430 с.
49. Калашников П. А. Первичная обработка гидрологической информации.— Л.: Гидрометеиздат, 1985.— 151 с.
50. Капиев Р. Э. Измерительно-вычислительные комплексы.— Л.: Энергоатомиздат, 1988.— 176 с.
51. Карандеев К. Б. Методы электрических измерений. Дифференциальные, мостовые, комплексированные.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952.— 332 с.
52. Карандеев К. Б. Трансформаторные измерительные мосты.— М.: Энергия, 1977.— 326 с.
53. Кинесберг В. А. и др. Полупроводниковый датчик давления «Кристалл»//Приборы и системы управления.— 1974.— № 7.— С. 26—27.
54. Клеванцова Т. П. и др. Способ линеаризации градуировочной характеристики платиновых терморезисторов//Приборы и системы управления.— 1973.— № 4.— С. 56—63.
55. Ковчин И. С. Опыт ААНИИ по эксплуатации и совершенствованию измерителя АЦИТ//Технические средства и методы изучения океанов и морей: Тезисы докл. и сообщений Всесоюз. совещания.— Геленжик.— 1985.— С. 18.
56. Ковчин И. С. Оценка погрешностей измерения скорости течения двухкомпонентным датчиком потока//Метрология.— 1987.— Вып. 7.— С. 21—25.
57. Ковчин И. С. Опыт по повышению эффективности использования АЦИТ//Проблемы Арктики и Антарктики.— 1987.— Вып. 63.— С. 114—119.
58. Ковчин И. С. Установка для моделирования динамического режима функционирования датчиков скорости потока//Труды ААНИИ.— 1988.— Т. 413.— С. 121—127.
59. Ковчин И. С. Результаты эксплуатации и исследований АЦИТ//Труды ААНИИ.— 1988. Т. 409.— С. 112—121.
60. Ковчин И. С. Состояние и перспективы технического обеспечения высокоширотных морских экспедиций//Проблемы Арктики и Антарктики.— 1991.— Вып. 66.— С. 51—63.
61. Ковчин И. С., Юновидов С. А. Совершенствование измерителя гидрологических параметров АЦИТ//Труды ГОИН.— 1987.— Вып. 184.— С. 57—63.
62. Ковчин И. С., Юновидов С. А. Автоматизированный комплекс для измерения параметров течения//Тезисы докл. Секция физика и химия океана. III съезд советских океанологов. Ленинград, 14—19 сентября 1987 г.— Л., 1987.— С. 64—66.

63. Ковчин И. С., Юновидов С. А. Измерительный комплекс параметров течения АЦИТ-У//Серия: Приборы и оборудование, ВДНХ СССР.— М., 1987.— 11 с.

64. Ковчин И. С., Шамонтьев В. А., Гильченко Г. Н. Метрологическая аттестация методов и средств гидрометеорологических измерений в Арктике и Антарктике//Тезисы докл.: Полярная и региональная океанология. III съезд советских океанологов, Ленинград, 14—19 сентября 1987 г.— Л., 1987.— 190 с.

65. Колесников А. Г., Беляев В. И., Парамонов А. Н. О системном подходе к исследованию физических полей океана//Проблемы получения и обработки информации о физическом состоянии океана.— Севастополь, 1967.— С. 5—15.

66. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи): Учеб. пособие для вузов.— Л.: Энергоатомиздат, 1983.— 320 с.

67. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. 2: Учеб. пособие для вузов.— М.: ГИТЛ, 1955.— 580 с.

68. Маклаков А. Ф., Снежинский В. А., Чернов Б. С. Океанографические приборы.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 383 с.

69. Мастеров Ю. П. Автономный радиоволнограф для гидрологического обеспечения морского бурения//Метеорология и гидрология.— 1979.— № 1.— С. 110—113.

70. Механика. Берклеевский курс физики. Т. 1.— М.: Наука, 1971.— 480 с.

71. Микропроцессоры. В 3 кн. Кн. 1. Архитектура и проектирование микро-ЭВМ. Организация вычислительных процессов: Учеб. для вузов/П. В. Нестеров, В. Ф. Шальгин, В. Л. Горбунов и др.; Под ред. Л. Н. Преснухина.— М.: Высшая школа, 1986.— 495 с.

72. Микропроцессоры. В 3 кн. Кн. 2. Средства сопряжения. Контролирующие и информационно-управляющие системы: Учеб. для вузов/В. Д. Вернер, Н. В. Воробьев, А. В. Горячев и др.; Под редакцией Л. Н. Преснухина.— М.: Высшая школа, 1986.— 383 с.

73. Микропроцессоры: Справочное пособие для разработчиков судовой РЭА/Г. Г. Гришин, А. А. Мошков, О. В. Ольшанский и др.— Л.: Судостроение, 1987.— 520 с.

74. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления: Справочник/С. Т. Хвощ, Н. Н. Варлиньский, Е. А. Попов.— Л.: Машиностроение, 1987.— 640 с.

75. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации/В. Б. Смолов, Б. П. Угрюмов, В. К. Шмидт и др.— Л.: Энергия, 1976.— 336 с.

76. Монин А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г. Изменчивость Мирового океана.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 262 с.

77. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9: Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах/Ч. I: Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах.— Л.: Гидрометеиздат, 1984.— 310 с.

78. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками.— Л.: Энергия, 1970.— 423 с.

79. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений.— Л.: Энергоатомиздат, 1985.— 248 с.

80. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерения: (ГОСТ 8.009—84, Методический материал по применению ГОСТ 8.009—84, РД 50—453—84).— М.: Изд-во стандартов, 1985.— 150 с.

81. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин.— Л.: Энергия, 1970.— 360 с.

82. О введении Шкалы практической солености, 1978 и Международного уравнения состояния морской воды, 1980//Океанология.— 1982.— Т. 22, вып. 2.— С. 337—343.

83. О динамических погрешностях океанологических измерителей модуля скорости течения с роторными преобразователями/В. М. Абрамов,

- С. А. Заграничнов, Г. П. Клещева, И. С. Ковчин//Океанология.—1988.—Т. 28, вып. 3.—С. 502—506.
84. Одноплатная микроЭВМ на основе БИС КР588/В. А. Бобков, В. В. Горовой, В. А. Лаврусенко, Д. Н. Черняковский//Микропроцессорные средства и системы.—1988.—№ 1.—С. 13—18.
85. Озмидов Р. В. Статистические характеристики горизонтальной микротурбулентности в Черном море//Труды ИОАН.—1962.—Т. 60.—С. 114—129.
86. Опыт измерения уровня моря при помощи АЦИТ/Р. А. Балакин, Ю. В. Бензема, В. Х. Герман и др.//Метеорология и гидрология.—1982.—№ 8.—С. 115—117.
87. О результатах измерений некоторых динамических характеристик приотлепных буйковых станций/И. С. Ковчин, А. В. Гусев//Труды ГОИН.—1989.—Т. 185.—С. 126—134.
88. Остроухов А. В., Шамраев Ю. И. Морская гидрометрия.—Л.: Гидрометеиздат, 1981.—446 с.
89. Парамонов А. Н., Кушнир В. М., Забурдаев В. И. Современные методы и средства измерения гидрологических параметров.—Киев: Наукова думка, 1979.—248 с.
90. Парамонов А. Н., Кушнир В. М., Заикин В. М. Автоматизация гидрофизического эксперимента.—Л.: Гидрометеиздат, 1982.—222 с.
91. Персин С. М. Основы теории и проектирования автоматических измерительных систем.—Л.: Гидрометеиздат, 1975.—319 с.
92. Персональный микрокомпьютер «Электроника-МК85»/Л. М. Лемко, В. В. Гладков, С. В. Ермаков, В. Н. Жуков//Микропроцессорные средства и системы.—1987.—№ 4.—С. 10—12.
93. Рубичев Н. А. Особенности метрологического обеспечения на этапе проектирования ИИС со сжатием информации//Измерительная техника.—1985.—№ 7. С. 9—10.
94. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях.—Л.: Гидрометеиздат, 1977.—725 с.
95. Саркисян А. С. Методы и результаты вычислений циркуляции Мирового океана.—Л.: Гидрометеиздат, 1986.—152 с.
96. Саруханян Э. А., Смирнов Н. П. Водные массы и циркуляция Южного океана.—Л.: Гидрометеиздат, 1986.—227 с.
97. Смирнов Г. В. Проектирование модульных систем для автоматизации океанографических экспериментальных исследований: Автореф. дис. д-ра техн. наук.—Севастополь, 1984.—44 с.
98. Смирнов Г. В., Кушнир В. М., Шадрин А. Б., Шамрай Б. В. Интегрированные мультипроцессорные системы для гидрофизических исследований: Препринт.—Севастополь, 1984.—52 с.
99. Спутниковая геофизика/Б. А. Нелепо, Ю. В. Терехин, В. К. Косырев, Б. Е. Хмыров.—М.: Наука, 1983.—253 с.
100. Солонченко Г. Н. Метрологические свойства измерительных информационных систем: Учебное пособие.—Л.: Изд. ЛПИ, 1985.—80 с.
101. Степанюк И. А. Океанологические измерительные преобразователи.—Л.: Гидрометеиздат, 1986.—269 с.
102. Титов В. Б., Кривошея В. Г. О недостатках измерения модуля скорости самописцев течения БПВ//Океанология.—1971.—Т. 2, вып. 5.—С. 906—912.
103. Трохан А. М. Гидроаэрофизические измерения.—М.: Изд-во стандартов, 1981.—336 с.
104. Ульев В. А., Клементьев В. А., Гродецкий Ю. А. Гидрологический зонд для арктических экспедиций//Методы и технические средства для изучения Мирового океана: Тезисы докл. Всесоюз. школы-семинара.—Геленжик, 1983.—14 с.
105. Федоров Б. Г., Телец В. А., Тегтяренко В. П. Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи.—М.: Радио и связь, 1984.—120 с.
106. Федоров К. Н., Прохоров В. И. О фактической инерционности измерителя температуры и достоверности определения солёности в океане

с помощью термосезондов//Изв. АН СССР, ФАО.— 1972.— Т. 8, № 9.— С. 998—1003.

107. Ферриты и магнитоэлектрики/Под ред. Н. Д. Горбунова, Г. А. Матвеева.— М.: Советское радио, 1968.— 176 с.

108. Фремке А. Ф. Телеизмерения.— М.: Высшая школа, 1968.— 262 с.

109. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование: Учеб. пособие для вузов.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 438 с.

110. Цифровой интегрирующий измеритель скорости течения и температуры «Поток-2»/В. И. Прохоров, В. Я. Макаров, О. Н. Лавриков и др.// Технические средства и методы исследования Мирового океана: Тезисы докладов Всесоюз. школы-семинара. Т. 1.— М., 1987.— 81 с.

111. Цурикова А. П., Нестерова М. П., Литвинова А. Ф. Нормальная вода и ее роль в определении хлорности и электропроводности морской воды//Химико-океанологические исследования.— М., 1977.— С. 195—199.

112. Хажуев В. И. Методы и средства измерения удельной электрической проводимости жидкости//Труды Метрологических институтов СССР.— 1976.— Вып. 194 (254).— С. 25—32.

113. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 2-х томах: Пер. с англ.— М.: Мир, 1983, т. 2.— 590 с.

114. Шули А. Электронная аппаратура в океанографии: Пер. с англ.— Л.: Гидрометеоиздат, 1967.— 64 с.

115. Яглом А. М. Об учете инерции метеорологических приборов//Труды ГЕОФИАН.— 1954.— Вып. 24 (151).— С. 112—162.

116. Ястребов В. С. Методы и технические средства океанологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1986.— 272 с.

117. Acoustic Doppler Current Profilers: RD-SC/DR Series: RD Instruments//San Diego, 1986.— 6 p.

118. Adaptive Recording Current Meter: Model 585: Marsh-Mc. Birney//Gaitherburg, 1979.— 6 p.

119. A three acoustic current meter for small scale turbulence/K. D. Lawson, N. L. Brown, D. H. Gohson, R. A. Matthey//ISA; ASIT 6 269.— 1976.— P. 501—508.

120. Beardsley R. G. A comparison of the vector averaging current meter and New Edgerton, Germeshausen and Mooring in Coastal Ocean Dynamic Experiment 1//J. Geophys. Res.— February 15, 1987.— Vol. 92, N C2.— P. 1845—1959.

121. Beckman dissolved oxygen monitor polarographic oxygen sensor//Techn. Mem. Beckman Instruments. Inc. Advanced Technology Operations, ANAHEJM.— California, 1981.— 12 p.

122. Bevir M. K. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeter//J. Fluid Mech.— 1970.— Vol. 43 (3).— P. 577—590.

123. Brown N. L. A precision microprofiler//IEEE Ocean's 74 Conf. in Halifax Nova Scotia.— 1974.— Vol. 2.— P. 270—278.

124. Cannon G. A., Pritchard D. W. A biaxial propeller currentmeter systems for fixed-mount applications//J. Mar. Res.— 1971.— N 29.— P. 181—190.

125. Current meter (Electromagnetic. Integrated oceanographic/water quality measuring stations): Series 195, 196.— InterOcean Systems, Inc. (3540 Aero Court).— San Diego, 1980.— 6 p.

126. Current meter (Self contained strip chart recording): Series 135, 135M.— InterOcean Systems, Inc. (3540 Aero Court).— San Diego, 1980.— 4 p.

127. Data acquisition handbook.— Santa Clara: National Semiconductor, 1977.— 350 p.

128. Davis R. E., Weller R. A. Propeller current sensors//Instruments and Methods in Air-Sea Interaction.— Nato School, Ustaoset, Norway, 1978.— P. 46.

129. Dibble T. L., Sollitt Ch. K. Frequency response characterization of current meters//Ocean's 81 Conf.— San Diego, 1981.— P. 250—256.

130. Evans L. The integrating A/D converter//Application bulletin A 017.— Intersil Inc., 1977.— 4 p.

131. Fofonoff N. P., Hayes S. P., Millard R. G. and ect. Brown CTD microprofiler: Method calibration and data handling//Technical Rep. N. P. 083-004. Unpubl. manuscript.—Wood Hole, 1974.—64 p.
132. Fozdar F. M., Parker G. J., Imberger J. Matching temperature and conductivity sensor response characteristics//J. Phys. Oceanogr.—November, 1985.—Vol. 15.—P. 1557—1569.
133. Gregg M. C., Meagher T. B. The dynamic response of glass rod thermistor//J. Geophys. Res.—1980.—Vol. 85, N C5.—P. 247—265.
134. Griffiths G., Gollar P. G. Some comparative studies of electromagnetic sensor heads in laminar and near-turbulent flow in towing tank//Calif. Ocean's 80 Conf.—San Diego, 1980.—P. 260—268.
135. Gutkosky R. D. Active and passive sets for comparison of audio frequency admittances//J. Res. NBS.—1964.—Vol. 82.—68 p.
136. Karrer H. E., Leach J. A. A quartz resonator pressure transducer//IEEE Trans. Ind. Electron. and Control. Instrum.—1969.—Vol. 16, N 1.—P. 44—50.
137. Laboratory verification an acoustic current meter error model//T. N. Mero, G. F. Apell, J. R. McCullough, B. Magnell//IEEE, Ocean's 81 Conf.—1981.—P. 239—244.
138. Marks W., Tuckerman R. A telemetering accelerometer wave buoy//Ocean wave spectra. Proc. Conf., Easton, Md, Englewood Cliffs., N. T.: Prentice Hall Inc.—1963.—P. 281—284.
139. Measurement comparison of United States and Soviet calibration facilities and several ocean current meter/G. L. Solomon, A. N. Kalvaitis, J. S. Kovchin, V. I. Prochorov//NOAA, Techn. Mem. NOS 31.—Rockville, 1984.—72 p.
140. Recording averagering current meter RCM-7 and RCM-8: AANDERAA INSTRUMENTS.—Datashet: 1988.—4 p.
141. Recording current meter RCM 4s: AANDERAA INSTRUMENTS.—Datashet: 1985.—4 p.
142. Saunders K. D. Horizontal response of the NBIS acoustic current meter//IEEE, Ocean's 80 Conf.—1980.—P. 321—328.
143. Saunders P. M. Intercomparison of VACM and acoustic current meter//Polymode News.—1978.—N 12.—P. 126—143.
144. Saunders P. M. Overspeeding of Savonius rotor//Deep-Sea Res.—1980.—Vol. 27A.—P. 755—759.
145. S4 current meter: Advanced engineering for reliability of sea: InterOcean Systems, Inc. (3540 Aero Court).—San Diego: 1983.—4 p.
146. SCOR Working Group 21. An intercomparison of some current meters. III. UNESCO technical papers in marine sciences 23.—Paris: UNESCO, 1975.—43 p.
147. Suber Logging Systems S. L. S.: Provisional documentation.—Brest: 1981.—148 p.
148. The smart instruments from Neil Brown: Smart CTD, Smart ACM: Neil Brown Instruments Systems, Inc., 1140 Route 28A, Cataumt, MA 02534/(617)//San Diego, 1985.—2 p.
149. US Patent N 4152934. Vector measuring current meter.—May, 1979.—8 p.
150. Van Landingham I. W., Greene M. W. An in situ molecular oxygen profiler//Marine Techn. J.—1971, July—August.—Vol. 5, N 4.—P. 11—23.
151. World S. Development of the vector measuring current meter//New York: Oceans'79, 5th, Annu. Comb. Conf.—San Diego, N. Y., 1979.—P. 307—311.
152. Water Level Recording WLR-5: AANDERAA INSTRUMENTS.—Datashet: 1985.—4 p.
153. Wave-Track Buoy System, tipe 949, 956: Endeco.—1981.—4 p.
154. Weller R. A., Davis R. E. A vector measuring current meter//Deep-Sea Res.—1980.—Vol. 27A.—P. 565—582.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автокалибровка 129
Адаптер 211
Аналого-цифровое преобразование 84
Апертура 107
Аттестация метрологическая 223

Блок береговой 169, 176
— интеререйсный (БИФ) 214
— обмена с ЭВМ 193
— обработка данных (БОД) 187
Буйковая станция 7, 22, 148, 154

Вектор скорости течения 6
Волнографы 120, 170
Высота волны 124

Геркон 100, 140, 162
Герметизация 151, 155, 166
Генератор 54
Гидрофизические величины 6
Глубина 121, 203
Градуировка 223, 230

Давление гидростатическое 44
Датчик
— гидростатического давления 44, 133
— гидрофизических (океанографических) величин 84, 111, 212 и преобразователи
индуктивные 36, 46
— ориентации 69
— скорости течения 57
— — — двухкомпонентный 59, 65
— температуры 28, 130
— электрической проводимости 35
Динамические испытания 67, 237
Дистанционное устройство морское, гидрологическое (ДУ-МГ) 24, 170

Затухание волнового давления 122
Зонд 17, 89
Зондирование океана 17, 167, 241

Измерения сравнительные 241
Измеритель автономный 3
— автономный океанографических величин 7, 111, 211
— автономный цифровой АЦИТ 10, 138
— донный 171

- скорости течения 11, 13, 155
- АСМ-2 17
- АЦИТ-01 11, 155
- АЦИТ-02 11, 162
- «Вектор» 11
- «Поток-2М» 11
- MARK-III 18
- RCM-4, -5, -7, -8 21
- SLS-11 20

Информационно-измерительная система (ИИС) 22, 162, 176

Канал связи 23

- гидроакустический 144
- радио 24, 176
- кабельный 169, 184

Компас 69

- феррозондовый 81

Компаратор кодов 107, 124

Комплекс программ обработки данных АЦИТа 200, 207

— нормируемых метрологических характеристик (КНМХ) 218

Компоненты скорости течения 60, 113

Коррекция характеристик СИ 133

Магнитофон записи—воспроизведения 144, 185, 190

Масштаб времени измерения реальный 162, 176

Микропроцессор 210

Модель объекта метрологическая 7

- СИ 80, 220

Модуль аппаратный 17, 169

Научно-исследовательское судно (нис) 22

Обработка данных АЦИТа 202

Осреднение скорости течения векторное 112

Поверка метрологическая 223, 230

Погрешность измерения 7, 218

Поправка 130

Преобразователь скорости течения акустический 66

- вертушечный 57

- электромагнитный 63

Приборы океанографические 10

Пропеллер 57

Приборостроение океанографическое 27, 96, 106, 209

Профилограф течения, акустический 25

Размыкатель троса 23, 182

Ретранслятор акустика—радио 23, 171.

Самописец уровня моря 178

Сбор океанографической информации 183, 192

Сжатие океанографической информации 106

Система телеизмерительная 23

Скорость течения 57, 112

Соленость воды 203
Средства измерения адаптивные 106
Стенд для градуировки и поверки *CTD*-систем 226
Станция гидрологическая телеизмерительная 167

Тензорезистор 48
Термистор 32
Терморезистор 28
Трубка Бурдона 46

Уставка 128
Устройство обработки данных (УОД) АЦИТа 184

Функция передаточная 73
— преобразования 7

Характеристики СИ динамические 33, 74, 220

Электрическая проводимость 9, 35

Ячейка трех-, четырехэлектродная кондуктометрическая 40

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Общие сведения об автономных океанографических средствах измерений	6
1.1. Характеристика объекта измерения	—
1.2. Современные измерители гидрофизических величин	10
1.3. Океанографические информационно-измерительные и телеизмерительные системы	22
Глава 2. Датчики океанографических величин	28
2.1. Датчики температуры морской воды	—
2.2. Датчики электрической проводимости морской воды	35
2.3. Гидростатические датчики глубины, уровня и волнения	47
2.4. Датчики скорости течения	69
2.5. Магнитные компасы и датчики ориентации	69
Глава 3. Методы и средства преобразования океанографической измерительной информации	84
3.1. Аналого-цифровые преобразователи	—
3.2. Преобразователи напряжение—частота	92
3.3. Цифровые измерительные преобразователи	96
3.4. Сжатие информации	106
3.5. Методы и средства измерения скорости течения	112
3.6. Методы и средства измерения волнения	120
3.7. Структурные методы и преобразователи повышения точности измерений	128
Глава 4. Автономные измерители АЦИТ	138
4.1. Измеритель автономный цифровой АЦИТ	—
4.2. Совершенствование измерителя АЦИТ	145
4.3. Методика работы с измерителями АЦИТ	148
4.4. Векторный измеритель течения АЦИТ-У-01	155
4.5. STD-измеритель АЦИТ-У-02	162
4.6. Телеизмерительные океанографические станции на базе АЦИТа	167
4.7. Самописец уровня открытого моря «Цунами»	178
Глава 5. Аппаратно-программные средства обработки информации автономных измерителей	183
5.1. Бортовая аппаратура приема информации с измерителей	—
5.2. Аппаратные средства сопряжения измерителей с ЭВМ	192
5.3. Алгоритмы и программы обработки данных АЦИТ	199
Глава 6. Микропроцессоры и микроЭВМ в автономных океанографических приборах	209
6.1. Общие сведения и задачи микропроцессорной техники	—
6.2. Автономный микропроцессорный измеритель основных океанографических величин	211
6.3. Бортовая аппаратура на базе микроЭВМ	214

Глава 7. Метрологическое обеспечение океанографических средств измерений	218
7.1. Нормирование и контроль метрологических характеристик	—
7.2. Методы и средства поверки <i>CTD</i> -измерителей	223
7.3. Методы и средства поверки измерителей течения и волнения	230
7.4. Контроль метрологических характеристик океанографических приборов в натуральных условиях	240
Список литературы	244
Предметный указатель	251

— Монография

Ковчин Игорь Сергеевич

АВТОНОМНЫЕ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИИ

Редактор Т. А. Иванова. Художник И. А. Мазур. Художественный редактор Б. А. Бураков.
Технический редактор Н. Ф. Грачева. Корректор О. В. Андреева.

ИБ № 1812

Сдано в набор 11.10.90. Подписано в печать 22.03.91. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага книжная.
Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 16. Кр.-отт. 16. Уч.-изд. л. 18,03.
Тираж 670 экз. Индекс ОЛ-28. Заказ № 239. Цена 3 р. 10 к.
Гидрометеоздат. 199226. Ленинград, ул. Беринга, д. 38.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского
объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР
по печати. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.